

机械力活化滑石分离废水中锌镉离子

刘春琦¹, 马天¹, 毛永伟¹, 李钊¹, 陈敏², 代淑娟¹, 郭小飞¹, 赵通林¹

(1. 辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 武汉理工大学资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要:天然硅酸盐粘土矿物被普遍应用于净化重金属污染废水及其资源回收。本实验研究主要采用机械力活化技术, 有效地提高天然粘土矿物滑石的化学反应活性, 实现了混合溶液中锌镉离子的高效分离和回收。滑石在机械力活化后可以释放出大量镁离子和氢氧根离子, 并在硫酸根离子的作用下, 选择性地将锌离子以羟硫酸锌石的形式沉淀下来。通过调节机械力活化强度、反应温度、滑石用量和金属盐种类等影响因素, 获得了较佳条件下锌离子去除量 112.01 mg/g, 镉离子去除量 16.92 mg/g 的良好分离效果。机械力活化天然硅酸盐粘土矿物, 使其在处置重金属废水及分离回收多金属再生资源中呈现良好的应用潜力。

关键词:滑石; 机械力活化; 锌镉分离; 废水净化; 资源回收

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2025.02.008

中图分类号: TD985 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 02-0052-08

引用格式: 刘春琦, 马天, 毛永伟, 等. 机械力活化滑石分离废水中锌镉离子[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(2): 52-59.

LIU Chunqi, MA Tian, MAO Yongwei, et al. Efficient separation of Zn^{2+} and Cd^{2+} ions in solution by the mechanochemically activated talc[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(2): 52-59.

重金属指密度大于 4.5 g/cm^3 的金、银、铜、锌、镉和镍等贵金属元素, 其应用范围几乎涵盖了人类生产生活的全部领域, 是人类赖以生存的最重要的自然资源之一^[1], 其来源广、降解难、普遍毒性高^[2], 且易被人通过气体吸入体内、接触皮肤渗透与食物消化摄入等多种路径进入生物体内, 随着食物链物种的累积与传递, 损害人体健康^[3]。这也使得其污染防治, 特别是重金属污水的处置, 逐渐成为环保领域最受关注的问题之一^[4]。与此同时, 随着资源的不断开发殆尽, 及近年来国际形势导致的矿产资源生产受阻, 对重金属再生资源循环利用的需求也日益紧迫^[5]。

在各种重金属元素中, 锌与镉均被广泛应用于电子^[6]、农业^[7]和医疗^[8]等各领域, 是人类生产生活中应用范围最广的重金属资源之一, 而这

也同时导致了含锌和镉的水污染防治及再生资源回收问题的凸显, 其中最大的技术难点在于混合溶液中锌和镉两种离子的分离。由于同属于 II B 族元素, 相近的理化性质导致在实际工业生产中的锌与镉分离的难度很大。当前实现锌镉分离主要使用萃取法^[9]、膜分离法^[10]和化学沉淀法^[11], 而化学沉淀法因操作简易、成本效益高、处理效果好, 研究最为广泛^[12]。近年来, 由于粘土矿物具有的无毒无害、储量丰富和经济高效等优点, 其在环境保护与资源回收中的应用越发普遍^[13]。作为一种 2:1 型单斜晶系富镁硅酸盐类粘土矿物^[14], 滑石 ($\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2$) 因其天然赋存量高, 具有良好的吸附与阴阳离子迁移效力^[15], 在可回收资源与回收后的循环利用上显现出很高的应用潜力。天然滑石矿物的物理化学性质较为稳定, 为

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 辽宁省自然科学基金 (2020-BS-224); 辽宁省教育厅基金 (2020LNQN13); 辽宁科技大学优秀人才基金项目 (2019RC03); 兴辽英才科技创新领军人才项目 (XLYC2002028)

作者简介: 刘春琦 (1998-), 男, 硕士研究生。研究方向为矿物加工工程。

通信作者: 李钊 (1991-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为矿物加工工程。

在资源和环境应用中充分发挥其结构和性能特点，往往需要借助外力对其活化。在各类天然矿物的活化改性方法中，机械力活化法因其操作简单、绿色环保、高效便捷和应用领域广泛等特点，逐渐成为研究热点^[16]。本研究以行星式高能球磨机对滑石进行机械力活化改性，并研究了机械力活化后的滑石对混合溶液中锌和镉离子的分离效果及机制。重点考查了研磨强度、研磨时间、化学沉淀环境温度、滑石投加量、以及盐的

种类对锌镉分离效果的影响。

1 样品性质及实验方法

1.1 滑石原料性质

本研究使用广西某矿场所产滑石纯矿物块状矿石，为保证原料矿物特性统一，预先进行细碎磨矿至-0.074 mm。表 1 为滑石原矿的多组分分析，图 1 为滑石原矿的物相 X 射线衍射分析。

表 1 滑石原矿的多元素组分/%
Table 1 Components of multi-elements of the raw talc

MgO	Al ₂ O ₃	CaO	MoO ₃	SrO	Cl	BaO	SiO ₂	P ₂ O ₅	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O
32.09	0.392	1.87	0.006	0.006 8	0.051	1.75	61.23	0.018	0.022	0.966 7	1.58	0.008

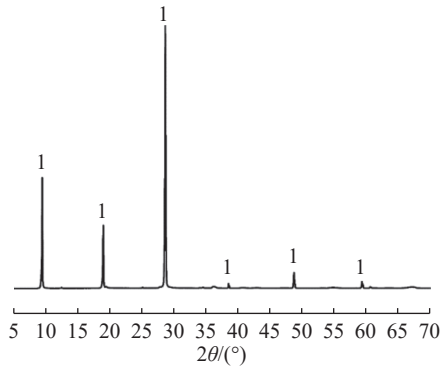


图 1 滑石原矿 XRD
Fig.1 XRD pattern of the raw talc

由多元素分析结果得到，滑石原矿中含量最高的元素为 Si、Mg、Ca，而 X 射线衍射分析图谱也显示其只含有滑石 $Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2$ 的晶体物相，且经综合对比计算后，样品中滑石占比约为 98.94%，证明该样品为高纯度滑石纯矿物。

1.2 滑石机械力活化实验方法

使用 P-7 行星磨进行滑石的机械力活化实验：将 10 颗半径为 5 mm 的二氧化锆研磨球置于内容积 45 cm³ 的二氧化锆研磨罐中，加入 2 g 滑石原矿，调整不同转速，分别研磨 120 min 后，取样待用。

1.3 机械力活化滑石分离回收锌镉离子实验方法

使用 THZ-82 型水浴恒温振荡器进行活化后的滑石处理锌镉混合溶液实验：于锥形瓶中投加不同浓度的锌镉混合溶液各 100 mL 及一定量机械力活化后的滑石，恒定振荡条件为 250 r/min×180 min，在不同温度下振荡后静置。提取上层清液经水系滤膜（0.22 μm）抽滤后，使用 AA-

6880 原子吸收分光光度计测量其中 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 的浓度；下层沉渣经去离子水多次清洗并抽滤后，自然干燥待用。

2 实验结果与分析

2.1 锌镉分离效果

2.1.1 溶液温度的影响

为研究反应温度对锌镉离子分离效果的影响，调整水浴振荡温度分别为 25、50、70 和 90 ℃，实验固定条件为：混合溶液中 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 初始浓度 500 mg/L，机械力活化滑石用量 0.25 g，机械力活化强度 500 r/min。

由图 2 可知，溶液温度对机械力活化滑石分离回收锌与镉离子效果的影响十分显著：在 25 ℃ 下反应后的混合溶液中， Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的残留量分别为 473.75 mg/L 和 500.00 mg/L，残余率高达 94.75% 和 100%，说明低温条件不利于机械力活化滑石与两种重金属离子的反应。而随着反应温度的升高，混合溶液中 Zn^{2+} 的残余量逐渐降低（50 ℃ 和 70 ℃ 时分别为 91.20% 和 76.81%），而 Cd^{2+} 的残余量则没有明显的降低。当温度升高至 90 ℃ 时， Zn^{2+} 浓度已降低至 219.97 mg/L，而 Cd^{2+} 仍残留有 457.70 mg/L，残余率仍高达 91.54%，二者的分离效果已非常明显。由此可见，反应温度的升高对机械力活化滑石沉淀去除 Zn^{2+} 具有较为明显的促进作用，这可以理解为温度升高会加速反应体系中离子的运动，进而提高碰撞几率，加速化学键的断裂与重建，同时促进了滑石结构中各种粒子的溶出，增强了与锌离子的反应几率。但是，相

同条件下, 镉离子却并没有同等强度的化学反应能力, 其原理需要进一步探讨。后续实验中, 为保证 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的充分分离均保持水浴振荡反应温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

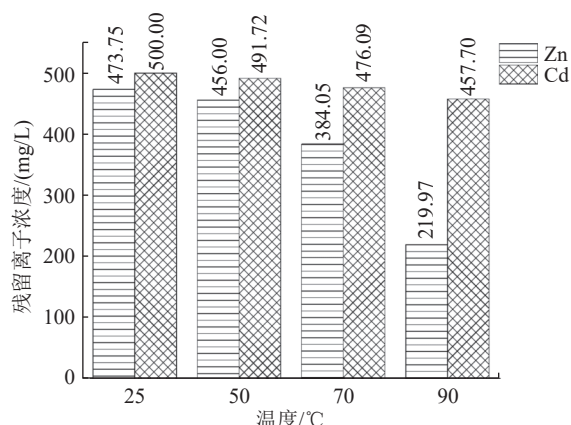


图2 溶液温度对 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 分离效果的影响

Fig.2 Effects of solution temperatures on separation of Zn^{2+} and Cd^{2+}

2.1.2 锌盐与镉盐种类的影响

在实际废水中, 锌镉混合溶液中的阴离子种类往往不同, 为研究锌盐与镉盐的种类对其分离效果的影响, 分别采用锌和镉离子初始浓度为 500 mg/L 的硫酸盐、硝酸盐或氯盐混合溶液为研究对象, 滑石用量 2.5 g/L , 机械力活化强度 500 r/min , 反应温度 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 处理结果见图3。

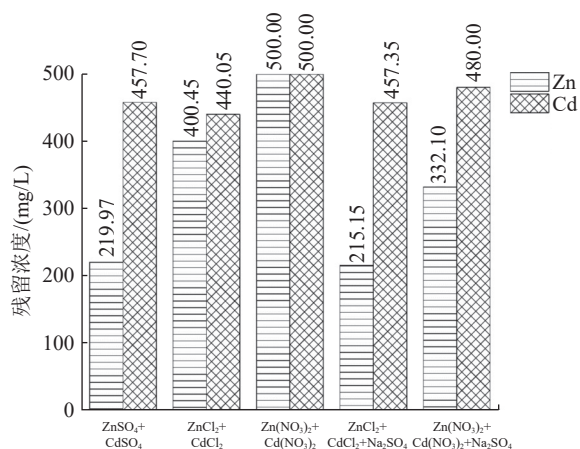


图3 锌盐和镉盐种类对 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 分离效果的影响

Fig.3 Effects of salt types on the separation of and

当废水中的锌和镉均以硫酸盐形式存在时, 反应后溶液残留浓度分别为 219.97 mg/L 和 457.70 mg/L ; 而混合氯盐溶液中反应后锌和镉离子的残余浓度则分别为 400.45 mg/L 和 440.05 mg/L ; 混合硝酸盐溶液中, 机械力活化滑石则几乎未与金

属离子发生反应, 离子残留浓度并没有任何降低。上述现象表明, 机械力活化滑石在混合硫酸盐溶液中对锌和镉离子的分离效果较高, 说明硫酸根离子可能起到了重要的调节作用。为进一步验证, 于相同条件下将 0.1 g 硫酸钠分别加入混合氯盐与硝酸盐溶液中, 反应后的氯盐溶液中锌、镉离子的残余量分别为 215.15 mg/L 和 457.35 mg/L , 硝酸盐中锌、镉离子的残余量分别为 332.10 mg/L 和 480.00 mg/L 。相较于硫酸钠添加前, 溶液中的 Zn^{2+} 残留浓度均有了较大程度的降低, 而 Cd^{2+} 依然基本全部残留于溶液中, 锌和镉分离效果得到了大幅度的提升, 证实了硫酸根离子的主导作用。由于实际废水中锌和镉元素也多以硫酸盐的形式存在, 因此后续实验中均采用硫酸盐作为研究对象。

2.1.3 机械力活化强度的影响

活化强度 (体现为球磨机转速) 是调控天然矿物机械力活化程度的关键因素, 其直接影响着矿物的晶体结构的稳定性和活性基团的溶出效率。实验对比研究滑石在不同强度下机械力活化后, 分离回收锌镉离子的效果。调节球磨机转速为 $0\sim 500\text{ r/min}$, 锌镉混合溶液初始浓度为 500 mg/L , 滑石用量为 2.5 g/L , 反应温度为 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

从图4a中可以看出, 随着活化强度的提升, 机械力活化滑石对锌镉离子的分离能力明显增强: 200 r/min 条件下的机械力活化滑石处理后, 溶液中的残留 Zn^{2+} 浓度为 469.58 mg/L , 而 Cd^{2+} 的残留浓度为 496.00 mg/L , 分离效果并不显著。当球磨机转速提升至 300 r/min 时, Zn^{2+} 的残留浓度为 310.06 mg/L , 转速 400 r/min 后残留浓度进一步降低至 243.95 mg/L , 而 Cd^{2+} 的残留浓度则依然保持在 480.50 mg/L 和 479.45 mg/L 的较高水平, 锌镉分离效果已十分明显。当球磨机转速进一步提升至 500 r/min 后, Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 的残留浓度分别为 219.97 mg/L 和 457.70 mg/L , 达到了较佳的分离效果。

由图4b可知, 随着球磨机转速的提升, 机械力活化滑石对重金属离子的去除量也有所增强: 磨机转速为 200 r/min 时, 滑石对锌离子的去除量仅为 12.17 mg/g ; 而当转速升高至 500 r/min 后, 去除量激增至 112.01 mg/g , 说明滑石机械力化学活化强度的提升增进了其与锌离子的反应效率。

而与此同时，机械力活化滑石与镉离子的反应则非常微弱，即使在 500 r/min 的高强度活化条件下，滑石对镉离子的去除量也只有 16.92 mg/g。机械力活化滑石与 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 反应效果的差异也实现了锌镉的有效分离。需要指出的是，虽然球磨机转速的继续提升可能会进一步促进锌镉离子的分离，但过高的转速会带来高温与能量损失，因此综合考虑 500 r/min 为较优活化强度。

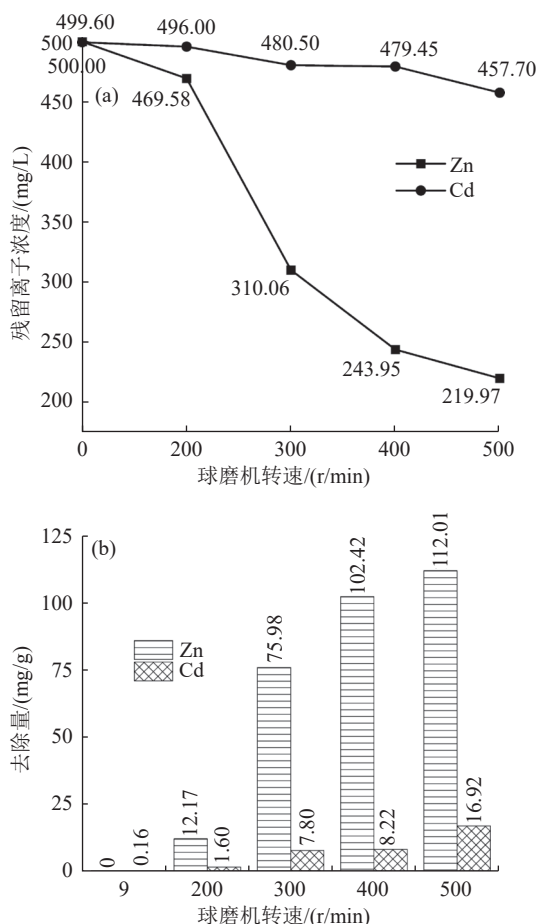


图4 滑石的机械力活化强度对 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 分离效果的影响

Fig.4 Effect of the intensity of mechanochemical activation on the separation of Zn^{2+} and Cd^{2+}

2.1.4 机械力活化滑石的使用量的影响

在工业废水和生活废水的实际处置过程中，净化药剂的用量对经济指标、二次污染、固液分离难度等都有着重要的影响。研究机械力活化滑石的使用量对锌镉分离所产生的影响，实验采用条件为：混合溶液锌和镉的均为浓度 500 mg/L，滑石用量 1.25 ~ 5 g/L，球磨机转速为 500 r/min，反应温度为 90 °C，结果见图 5。

由图 5a 可知，增加机械力活化滑石的使用

量，可以使溶液中 Zn^{2+} 的残留浓度逐渐降低，而 Cd^{2+} 的浓度变化则不大。这说明在一定的滑石用量范围内， Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的分离效果与机械力活化滑石的用量呈正相关。其中当滑石用量为 2.5 g/L 时，混合溶液中 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的残留浓度分别为 225.60 mg/L 和 479.45 mg/L，残留浓度差达到 253.85 mg/L，金属离子之间的分离效果明显。当滑石用量进一步增多时，锌镉离子残留浓度差异趋于稳定。

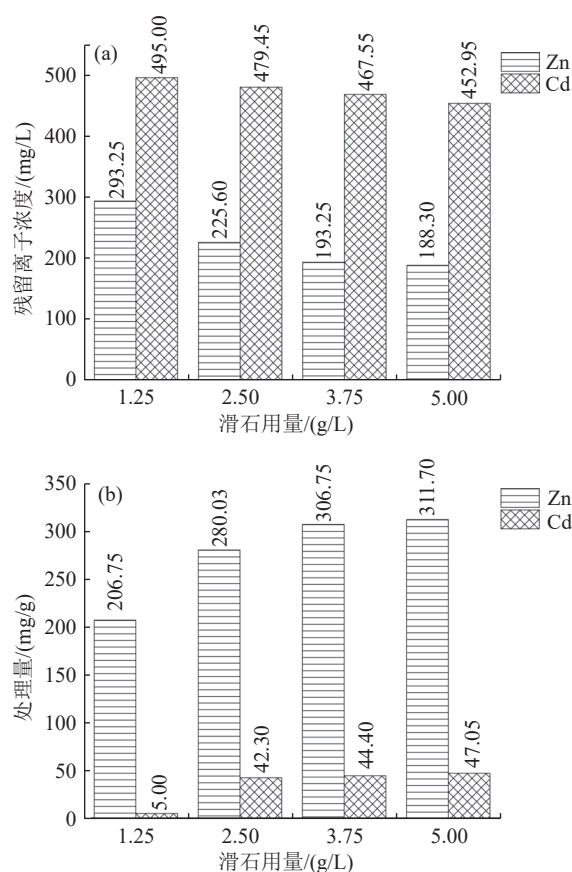


图5 机械力活化后滑石的使用量对 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 分离效果的影响

Fig.5 Effect of talc dosage on the separation of Zn^{2+} and Cd^{2+} after mechanochemical activation

而机械力活化滑石对锌镉离子的处理量也同样与用量之间呈现相似的变化趋势（图 5b）：当滑石用量为 2.5 g/L 时，其对 Zn^{2+} 的处理量达到 280.03 mg/g，而同条件下对 Cd^{2+} 的处理量只有 42.30 mg/g。进一步提高机械力活化滑石的用量，锌镉离子分离效果趋于稳定，证明机械力活化滑石的处理效果已逐渐接近其处理能力上限，且综合考虑经济效益等因素，2.5 g/L 为滑石的较优用量值。由图可以看出，机械力活化后的滑石对锌和镉的最大负载量分别为 311.70 mg/g 和 47.05 mg/g。

2.2 机理分析

2.2.1 机械力活化滑石的晶体 X 射线衍射物相分析

天然粘土矿物经, 会因粉磨作用而导致粒径减小、比表面积增大、化学反应活化能降低, 伴随化学键的断裂与重组, 以及理化活性的提升。从图 6 的机械力活化滑石的物相分析中可以看出, 当机械力活化强度较低时 (200 r/min), 滑石晶体的 XRD 主衍射峰强度依然很高, 证明其晶体结构仍稳定有序。当球磨机转速提升至 300 r/min 时, 滑石的主衍射峰强度大幅减弱, 此时高强度的机械作用导致滑石结构中原子排布的无序化, 降低了其晶格的稳定性。而当球磨机转速进一步升高后, 滑石稳定的晶格被彻底破坏, 呈现出非晶化, 不饱和键急剧增多, 矿物表面各类基团的活性大幅度提升, 促使矿物具有了更高的理化反应能力。

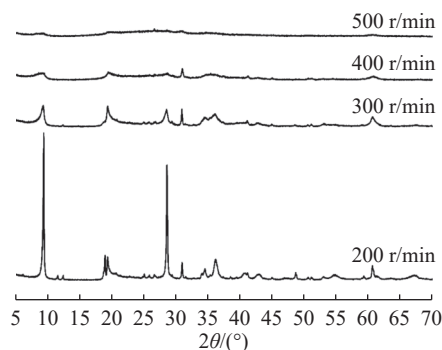


图 6 磨矿强度对机械力活化后的滑石的 XRD 谱图的影响

Fig.6 Effect of the intensity of mechanochemical activation on the XRD patterns

2.2.2 锌镉分离反应前后混合溶液中 Mg^{2+} 浓度和 pH 值的变化

通过对比机械力活化滑石在处理锌镉离子前后溶液中 Mg^{2+} 浓度和 pH 值的变化, 有利于从机理上明确机械力作用对滑石活性提升的机制。实验条件为: 球磨机转速为 500 r/min, 滑石用量 2.5 g/L, 锌镉混合溶液浓度为 500 mg/L, 反应温度为 90 °C。

由图 7 为滑石活化前后反应前后溶液中的镁离子浓度与 pH 值, 反应前滑石原矿中溶出镁离子浓度为 66.35 mg/L, 500 r/min 活化后滑石在锌镉分离反应后溶出的镁离子浓度大幅度提升至 186.80 mg/L。锌镉分离反应前, 溶液的初始 pH 值为 3.43, 呈弱酸性, 这是由于金属离子的水解导

致的。而反应后, pH 值提升至 6.68, 碱性明显提升。初始的锌镉混合溶液呈酸性是由于金属离子的水解导致, 而当机械力活化滑石与重金属离子反应时, 大量自由氢氧根离子和镁离子从矿物体相脱出并以游离态进入溶液中。这些游离的 Mg^{2+} 在与锌离子发生离子交换后大量剩余在溶液中, 而同步脱出的氢氧根离子会进一步加速 Mg^{2+} 的溶出以维持正负电荷平衡, 并使混合溶液整体 pH 值上升。机械力活化强度越高, 对滑石的晶体结构破坏越剧烈, Mg^{2+} 和氢氧根离子越容易自滑石结构中脱出至溶液中, 反应活性就越高。

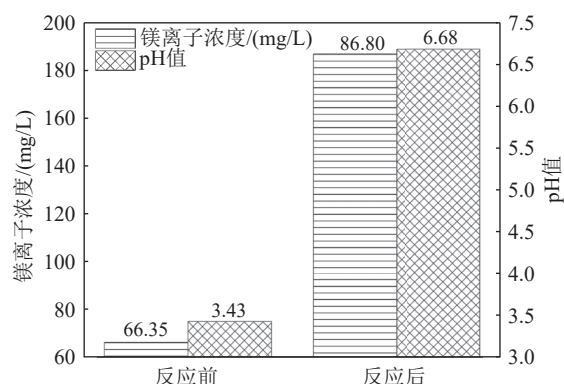


图 7 机械力活化滑石分离 Zn^{2+} 和 Cd^{2+} 反应前后混合溶液中 Mg^{2+} 溶出量与 pH 值的变化

Fig.7 Changes of Mg^{2+} dissolution and pH value in mixed solution before and after the separation of Zn^{2+} and Cd^{2+} by activated talc

2.2.3 作用产物物相及官能团分析

定量数据结果表明, 机械力活化滑石对锌镉分离的主要机制是选择性地将锌离子从溶液中沉淀去除, 而不与镉离子发生反应。通过对锌镉分离后锌沉渣物相和镉残液蒸发结晶物相进行分析, 有助于明确滑石与不同金属离子之间差异化反应机制。以 500 r/min 条件下机械力活化滑石 2.5 g/L 处理 500 mg/L 混合硫酸盐溶液后的沉渣和残液蒸发结晶为研究对象, 其 XRD 图谱见图 8。

由图 8(a) 可知, 反应后沉渣的晶体物相为羟硫硅锌石 $Zn_8(OH)_{13}[SiO(OH)_3SO_4]$, 而图 8(b) 中残液蒸发结晶后物相主要包括 $CdSO_4 \cdot Cd(OH)_2 \cdot xH_2O$ 、 $CdSO_4 \cdot xH_2O$ 、 $MgSO_4 \cdot xH_2O$ 。由此推断, 受机械力活化作用, 滑石晶体中的镁氧八面体和硅氧四面体结构被破坏, 部分镁、羟基和硅氧基团会从滑石表面溶出至溶液中, 成为游离态, 使溶液碱性增强; 在硫酸根离子存在的条件下, 与锌离子发生沉淀反应, 使锌以羟硫硅锌石的形式

沉淀并固定，而 Mg^{2+} 则会与残留的硫酸根离子配位，蒸发形成硫酸镁结晶。滑石结构中氢氧根离子和镁离子的溶出以电荷平衡的机制相互促进，推动锌离子选择性沉淀的发生。这一反应过程可由以下反应方程式表示：

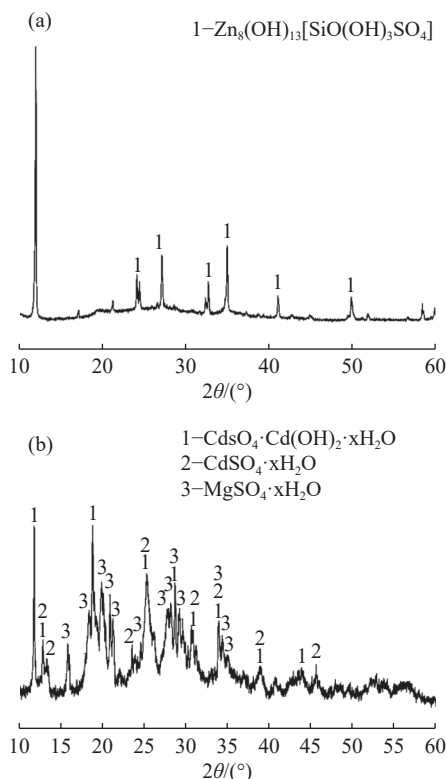
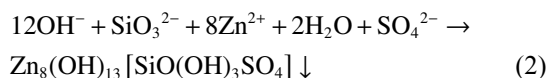
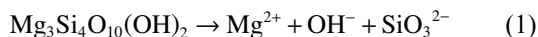


图8 机械力活化滑石在处理锌镉混合溶液后的沉淀(a)和残液烘干结晶(b)物相衍射图谱
Fig.8 XRD patterns of solid sediment (a) and crystallization after evaporation of residue liquid (b) of Zn-Cd mixed solution after disposed by mechanochemically activated talc

图9为在锌镉分离反应前后的滑石的红外光谱对比，对比反应前的 3461.77 cm^{-1} 为主要的羟基水分子伸缩振动峰外，可以看出锌镉分离反应后的沉淀在 3562.05 、 3488.27 、 2935.27 和 2867.77 cm^{-1} 四处出现了 O-H 的伸缩振动，以及 1648.92 、 796.50 cm^{-1} 两处的 H-O-H 的弯曲振动。更重要的是，反应后物料中在 1085.78 cm^{-1} 处出现了明显的硫酸根伸缩振动信号^[17]。说明混合溶液中硫酸根离子参与了反应过程，再一次证明了机械力活化滑石仅对溶液中含有硫酸根形式的锌盐具有选择性沉淀效果。

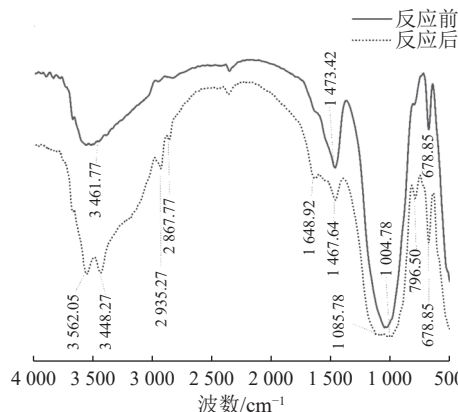


图9 机械力活化滑石在处理锌镉混合溶液前后的 FTIR
Fig.9 FTIR spectra of the mechanochemically activated talc before and after the treatment on Zn-Cd mixed solution

2.2.4 试样微观形貌分析

图10为机械力活化滑石在锌镉分离反应前后的 SEM 和对应的 EDS 分析结果。由图10(a)可以得到，机械力活化后的滑石，其原有的致密片状形貌已被破坏，变为无定形的非晶化形貌，而这种无定形状态在锌镉分离反应后仍然存在。而对比反应前后样品的能谱分析结果，可以看出在与处理重金属溶液后，固体样品中的镁含量大幅度减少，而新增了大量的锌和硫元素，表明机械力活化滑石在锌镉分离反应过程中，大量的 Mg^{2+} 脱出为离子态，反应形成的羟硫硅锌石 ($\text{Zn}_8(\text{OH})_{13}[\text{SiO}(\text{OH})_3\text{SO}_4]$) 沉积于滑石表面，而 Cd^{2+} 则残留于液相中，实现了 Zn^{2+} 与 Cd^{2+} 的分离。

3 结论

(1) 滑石作为 2:1 型层状硅酸盐粘土矿物，其自身的天然化学活性较低，通过机械力活化可以大幅增强其理化反应活性，提高与重金属离子的反应能力。

(2) 机械力活化作用破坏了滑石的晶格稳定性，使其非晶化，诱使体相结构中的羟基、镁、硅氧基团脱出至溶液中，成为游离态。

(3) 在硫酸根离子存在的条件下，溶液中的锌离子可以与游离的羟基和硅反应生成羟硫硅锌石沉淀，而镉离子则残留在溶液中，达到了锌镉有效分离的目的。

(4) 滑石在未活化时，其分离锌镉离子的效果较差；而经过机械活化后，其理化反应活性得到明显提升，在较佳条件为滑石用量 2.5 g/L ，球

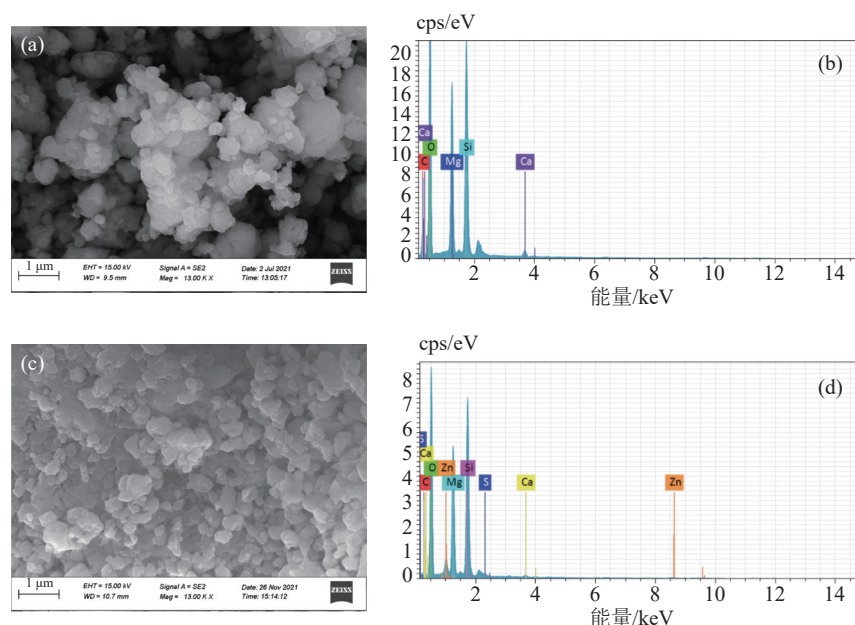


图 10 机械力活化滑石在锌镉分离反应前后的 SEM 及 EDS

Fig.10 SEM+EDS analysis of the mechanochemically activated talc before and after Zn-Cd separation

磨活化强度 500 r/min 时, 机械力活化后的滑石在 500 mg/L 浓度的锌镉混合溶液中对锌离子的去除量达到 112.01 mg/g, 而镉离子仅有 16.92 mg/g, 由此达到锌镉分离效果。

参考文献:

- [1] MESHARAM P, MISHRA A, ABHILASH, et al. Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids - A review[J]. *Chemosphere*, 2020, 242:125291.
- [2] 罗丽萍, 刘应冬, 范良千. 攀枝花地区煤矸石中重金属元素浸出行为研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):59-65.
- [3] LUO L P, LIU Y D, FAN Q L. Leaching behavior of main heavy metal from coal gangue in the Panzhihua[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):59-65.
- [4] 李杰峰. 煤矿复垦区土壤重金属形态分布与富集污染研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(1):116-120.
- [5] LI J F. Study on distribution of heavy metals in soil and concentrated pollution in coal mine reclamation area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(1):116-120.
- [6] JOSEPH L, JUN B M, FLORA J, et al. Removal of heavy metals from water sources in the developing world using low-cost materials: A review[J]. *Chemosphere*, 2019, 229:142-159.
- [7] 郭娟, 崔荣国, 闫卫东, 等. 2021 年中国矿产资源形势回顾与展望[J]. *中国矿业*, 2022, 31(1):11-17.
- [8] GUO J, CUI R G, YAN W D, et al. Outlook and overview of mineral resources situation of China in 2021[J]. *China Mining Magazine*, 2022, 31(1):11-17.
- [9] LECLER M T, ZIMMERMANN F, SILVENTE E, et al. Exposure to hazardous substances in cathode ray tube (CRT) recycling sites in France[J]. *Waste Management*, 2015, 39(may):226-235.
- [10] 李姣, 刘璐, 杨斌, 等. 镉及镉与铁、锌互作对水稻生长的影响[J]. *华北农学报*, 2018, 33(1):217-223.
- [11] LI J, LIU L, YANG B, et al. Effects of cadmium concentration and interaction of cadmium with iron and zinc interaction on rice growth[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2018, 33(1):217-223.
- [12] 王海峰, 张研, 任辉. 镉、锌制剂联合应用抑制肝细胞癌生长和转移的实验研究[J]. *中国实验诊断学*, 2006, 10(10):1197-1199.
- [13] WANG H F, ZHANG Y, REN H. Inhibition of growth and metastasis of human hepatocellular carcinoma by cadmium and zinc preparation combined treatment in a nude mouse xenograft model[J]. *Chinese Journal of Laboratory Diagnosis*, 2006, 10(10):1197-1199.
- [14] 林秋月, 赵国良, 陈少微, 等. 硫酸铵-锌试剂-Tween-80 体系萃取分离铜(II)、钴(II)、镍(II)、锌(II)、镉(II)、锰(II)[J]. *分析化学*, 2000, 28(6):706-708.
- [15] LIN Q Y, ZHAO G L, CHEN S W, et al. Extraction separation of copper(II), cobalt(II), nickel(II), zinc(II), cadmium(II)

and manganese(II) using ammonium[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2000, 28(6):706-708.

[10] 刘新芳, 何鼎胜, 马铭, 等. 三正辛胺-仲辛醇-煤油组合液膜分离镉锌的研究[J]. *无机化学学报*, 2003.

LIU X F, HE D S, MA M, et al. Study on separation of binary cadmium(II) and zinc(II) by a tri-n-octylamine-secondary octyl alcohol-kerosene hybrid liquid membrane[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2003.

[11] 祝旭初. 铬(VI)-二乙基二硫代甲酸钠共沉淀-原子吸收光谱法测定环境水样中铁、锰、锌、镉[J]. *理化检验(化学分册)*, 2010, 46(1):84-86.

ZHU X C. AAS Determination of iron, manganese, zinc, cadmium in environmental water samples after enrichment by coprecipitation with Cr(VI)-DDTC[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis Part B: Chemical Analysis*, 2010, 46(1):84-86.

[12] 张继华. 化学沉淀法处理磷化废水[J]. *工业水处理*, 2000(5):43-44.

ZHANG J H. Treatment of phosphate coating wastewater by chemical precipitation[J]. *Industrial Water Treatment*, 2000(5):43-44.

[13] BURAKOV, ALEXANDER E, et al. Adsorption of heavy metals on conventional and nanostructured materials for

wastewater treatment purposes: a review[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2018(148):702-712.

[14] 杨华明, 邱冠周, 王淀佐. 滑石粉超细粉碎过程的结构变化[J]. *硅酸盐学报*, 1999, 27(5):580-584.

YANG H M, QIU G Z, WANG D Z. Structural changes of talc powder during ultrafine grinding[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 1999, 27(5):580-584.

[15] 欧阳燎原, 陈渊淦, 汪惠惠, 等. 不同矿浆温度下滑石表面甲基纤维素脱附行为研究[J]. *矿产综合利用*, 2022 (2): 66-68.

OUYANG L Y, CHEN Y J, WANG H H, et al. The desorption behavior of methylcellulose from talc at different temperature of pulp[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022 (2): 66-68.

[16] LI Z, CHEN M, QU J, et al. Surface modification of basic copper carbonate by mechanochemical processing with sulfur and ammonium sulfate[J]. *Advanced Powder Technology*, 2017(28):1877-1881.

[17] AKYUZ T, AKYUZ S, GULEC A. Elemental and spectroscopic characterization of plasters from fatih mosque-istanbul (turkey) by combined micro-raman, FTIR and EDXRF techniques[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2015(149):744-750.

Efficient Separation of Zn^{2+} and Cd^{2+} Ions in Solution by the Mechanochemically Activated Talc

LIU Chunqi¹, MA Tian¹, MAO Yongwei¹, LI Zhao¹, CHEN Min², DAI Shujuan¹, GUO Xiaofei¹, ZHAO Tonglin¹

(1.School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China; 2.School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

Abstract: Natural silicate clay minerals are widely used in the purification of heavy metal polluted wastewater and resource recovery. In this case, mechanochemical activation technology has been used to effectively improve the chemical reaction activity of natural clay mineral talc, and enable the efficient separation and recovery of Zn^{2+} and Cd^{2+} ions in mixed solution. A large number of Mg^{2+} and OH^- were released from the structure of talc, after mechanochemical activation, and Zn^{2+} can be selectively precipitated in the form of bechererite, in the presence of SO_4^{2-} . By adjusting the mechanochemical activation intensity, reaction temperature, talc dosage and metal salt type, etc., a considerable separation effect with 112.01 mg/g of Zn^{2+} removal and 16.92 mg/g of Cd^{2+} removal was obtained, at the optimum conditions. The mechanochemical activation of clay minerals in nature shows a favorable application potential in the disposal of heavy metal wastewater as well as the separation and utilization of renewable polymetallic resources.

Keywords: Talc; Mechanochemical activation; Zinc-cadmium separation; Wastewater purification; Resources recovery