

# 基于机械力化学活化的云母基吸附材料的制备及其对镉的吸附性能研究

李凯<sup>1</sup>, 王超<sup>1</sup>, 张其武<sup>1</sup>, 刘岩矗<sup>1,2</sup>, 黄俊玮<sup>1,3</sup>

1. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
2. 瀚矿环保科技(上海)有限公司, 上海 200000
3. 中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450000

中图分类号: TD985; O647.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)04-0038-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.04.004

**摘要** 重金属离子的绿色高效去除技术一直是环境科学领域的研究重点。采用机械力化学法通过添加  $MgSO_4$  制备了云母基环境功能材料, 并考察了其对于溶液中  $Cd(II)$  的吸附性能。研究表明, 采用行星式球磨机, 在 600 r/min 转速下共磨云母原样和  $MgSO_4$  颗粒 1 h 即可得到该云母基吸附材料。当其用量为 5 g/L 时, 处理  $Cd(II)$  初始质量浓度为 100 mg/L、pH 为 6 的溶液,  $Cd(II)$  吸附率可达 87.79%。溶液中的  $Cd(II)$  通过与  $Mg(II)$  交换而被吸附固定在材料中。该研究为云母基矿物材料的制备提供了一条新的路径。

**关键词** 机械力化学; 云母; 环境功能材料; 重金属离子; 球磨

## 前言

云母是一类含钾、铝、镁、铁、锂等金属的铝硅酸盐层状矿物, 根据晶体结构中金属离子的不同可形成不同种类的云母。云母为 2:1 层状结构, 主要由两层硅氧四面体夹杂着一层铝氧八面体结构组成。云母因其优良的化学惰性、绝缘性、耐高温、耐酸、耐碱等特性, 广泛应用于建筑材料、塑料及橡胶填料、电绝缘材料、珠光颜料等领域<sup>[1-4]</sup>。经过提纯加工<sup>[5-10]</sup>后的云母通常采用化学沉淀法、溶胶凝胶法和机械力化学法等<sup>[11-14]</sup>进行功能化改性, 充分发挥其优良性能。

为了提高云母矿物对重金属离子的吸附性能, 常采用高温法和化学法等对云母进行改性。高温法改性可制备膨胀云母基样品, 显著提高阳离子交换反应效率。化学法改性是通过投加无机盐或氧化物并将其负载在云母表面增加其吸附性能, 方法简单便捷。近年来, 诸多学者对云母处理重金属离子污染进行了广泛

的研究, Salam 等人<sup>[15]</sup>制备的白云母/沸石铝硅酸盐复合材料能够高效去除水中  $As(V)$ 、 $Hg(II)$  和  $U(VI)$  等离子, 最大吸附量分别为 117、122.5、138.5 mg/g。夏银等人<sup>[16]</sup>采用饱和  $MgCl_2$  溶液对蛭石和云母(黑云母/金云母)混合天然矿物进行处理, 使云母矿物对重金属离子产生了良好的吸附效果, 对  $Cu^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Mn^{2+}$  的吸附量分别为 49.53、108.00、44.11、32.47 mg/g。罗东霞<sup>[17]</sup>选取了重金属  $Pb^{2+}$ 、云母矿物以及绿色木霉作为研究对象, 探索了在真菌生物作用下重金属在黏土矿物-水界面的微观环境化学行为。研究表明云母类矿物-绿色木霉复合物能有效吸附  $Pb^{2+}$ , 对  $Pb^{2+}$  的吸附能力大小顺序为金云母-绿色木霉复合物 > 黑云母-绿色木霉复合物 > 白云母-绿色木霉复合物, 且云母类矿物-绿色木霉复合物对  $Pb^{2+}$  的吸附能力大于原始矿物。利用云母的特殊层间结构经过各种改性手段后可以显著提升其离子交换性能, 绿色高效地解决水体中重金属离子污染问题。

收稿日期: 2022-05-12

作者简介: 李凯(1997—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事环境保护研究, E-mail: 2653250117@qq.com。

通信作者: 刘岩矗(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事环境保护研究, E-mail: liuyanchu@whut.edu.cn。

然而,用于重金属处理方面对云母矿物的高温改性法温度一般要控制在 900 ℃ 左右,对反应容器要求较高,能耗也较大;化学改性法也易引入新的金属离子或阴离子污染物。机械力化学是一门应用机械能诱导化学变化乃至化学反应的交叉学科,在矿物材料制备过程中,机械力化学活化是利用机械能来诱发矿物材料的组织、结构和性能的变化,以此来制备新功能的矿物基材料。机械力化学法作为常用的高效节能改性手段用于云母类复合材料制备,所制备的云母类复合材料兼具较好的抗紫外性能、亲油性和分散性,但机械力化学法在云母基环境功能材料的制备方面却鲜有应用。本文为克服高温改性法和化学改性法的缺陷,创新性地采用机械力化学法制备云母基环境功能材料,并对其去除 Cd(II) 离子的性能进行了研究。研究表明,通过机械力化学法制备的云母基环境功能材料能够高效去除溶液中的 Cd(II) 离子,且该制备方法具有绿色环保、节能高效等优点,为云母基矿物材料的制备提供了一条新的路径。

## 1 样品性质

本研究采用河北灵寿碎云母样品作为试验原样,通过 X 射线荧光光谱分析查明了云母原样中主要组分的含量,分析结果见表 1。

通过 X 射线衍射分析(日本 Rigaku 公司 RU-200B/D/MAX-RB)查明了原样中的矿物种类,XRD 图谱如图 1 所示。

表 1 云母原样化学成分 /%

Table 1 Chemical compositions of raw muscovite sample

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	烧失量
含量	53.46	27.40	7.53	5.03	0.94	0.68	0.54	0.36	0.04	3.92

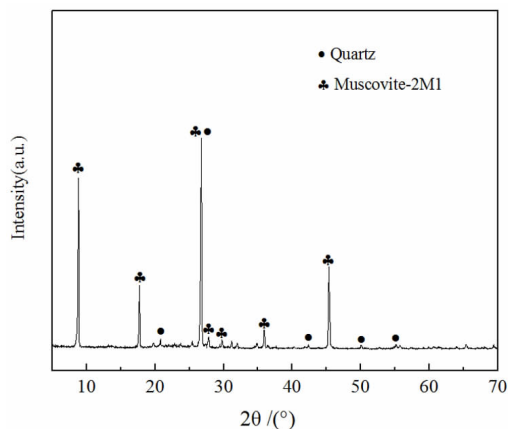


图 1 白云母原样 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of raw muscovite sample

由表 1 可知,该白云母原样中的主要化学组成为 SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、K<sub>2</sub>O,其含量分别为 53.46%、27.40% 和 7.53%,烧失量为 3.92%。

分析图 1 可知,该样品中主要矿物为白云母和石英,通过 XRD 图谱解析,结合化学成分分析结果,确定样品中的白云母含量为 65% 左右。

原样粒度分布对机械力化学活化参数的选取具有重要影响,该白云母原样的粒度分布如图 2 所示。

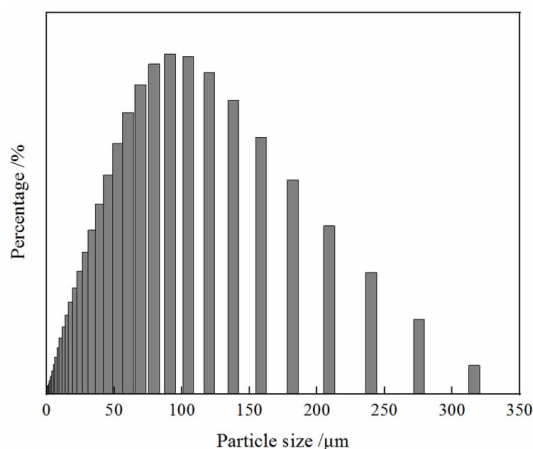


图 2 白云母原样粒度分布

Fig. 2 Particle size distribution of raw muscovite sample

分析图 2 可知,该白云母样品  $d_{50} = 72.27 \mu\text{m}$ ,  $d_{90} = 171.83 \mu\text{m}$ 。因此 90% 的原样粒度都在 171.83  $\mu\text{m}$  以下,最大的颗粒粒径在 350  $\mu\text{m}$  左右。

## 2 试验方法

### 2.1 吸附材料制备

本研究采用 Pulverisette-7 行星式球磨机进行云母基环境功能材料的制备,具体操作步骤如下:取一定量白云母样品及硫酸镁(两者总质量为 1 g)放置于的研磨罐(45 cm<sup>3</sup>)中,磨矿介质为 7 颗直径 15 mm 的锆球,球磨时间为 1 h,在一定球磨转速下球磨获得云母基环境功能材料。

### 2.2 重金属离子去除试验

重金属离子溶液的制备:用 CdSO<sub>4</sub>·8/3H<sub>2</sub>O 配制 Cd(II) 质量浓度为 1 000 mg/L 的标准溶液,试验中使用的 Cd(II) 溶液均由该溶液稀释获得。

称取 0.5 g 云母基环境功能材料样品,将其加入 Cd(II) 溶液中,在水浴恒温振荡器中振荡反应,反应结束后测定溶液中金属离子剩余浓度以计算离子去除

率。试验后将溶液样品过滤获得滤渣,并将滤渣在干燥箱中经长时间干燥后用作 SEM - EDS 测试,对残渣进行 1 200 °C 煅烧结晶后进行 XRD 测试分析。

### 3 试验及结果分析

#### 3.1 白云母样品机械力化学活化效果

将球磨时间固定为 1 h,考察 300 r/min 和 600 r/min 球磨转速对白云母结构改性的影响,并通过 XRD、FT - IR、SEM 等方法分析球磨活化效果。白云母原矿及经过 300 r/min 和 600 r/min 球磨后的物相变化如图 3 所示。

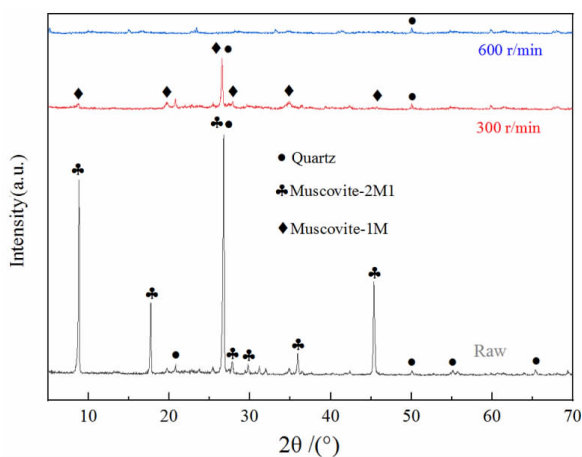


图 3 原样及 300 r/min、600 r/min 球磨后样品的 XRD 图谱  
Fig. 3 XRD patterns of raw material and the milled sample at 300 r/min and 600 r/min

原始白云母样品的 XRD 图谱显示出相对纯净的物相,在 8.88°、26.83°、45.47°处分别出现了较为明显的强衍射峰,这也分别对应于 muscovite - 2M1 的 (002)、(006) 和 (010) 晶面。经过 300 r/min 球磨的样品在 8.75°、17.58°、26.51°处分别出现了较为明显的强衍射峰,分别对应于 muscovite - 1M 的 (001)、(020) 和 (003) 晶面,这表明在 300 r/min 的球磨活化作用下使原矿从 muscovite - 2M1 物相转变为 muscovite - 1M1 中间物相。然而,600 r/min 球磨样品的物相几乎没有衍射峰存在,这表明白云母已经转变为无定形状态。

图 4 为放大 2 000 倍数下的白云母原矿 (a)、300 r/min (b)、600 r/min (c) 活化样品扫描电镜形貌特征。分析图 4 可知,白云母原矿具有规则的晶体性质,保持良好的平面结构。经过 300 r/min 球磨活化后,白云母被研磨成小颗粒,但仍能够保持局部的晶体结构。经过 600 r/min 球磨活化后,白云母完全成为无定形状

态,并发展成为团聚状态。

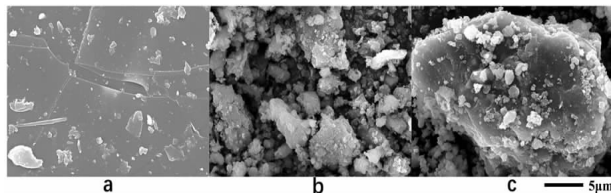


图 4 原样及 300 r/min、600 r/min 球磨活化后的白云母 SEM 形貌图

Fig. 4 SEM topography of the raw material (a), the milled sample at 300 r/min (b) and 600 r/min (c)

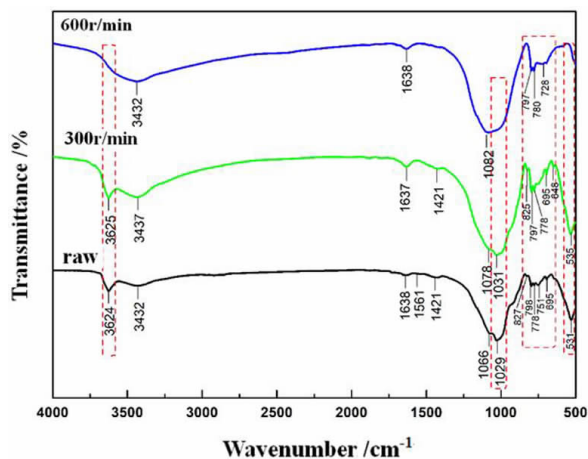


图 5 原样及 300 r/min、600 r/min 球磨活化后的白云母 FTIR 图谱

Fig. 5 FTIR spectrum of the raw material and the milled sample at 300 r/min and 600 r/min

图 5 为云母原样及 300 r/min、600 r/min 球磨活化后的白云母 FTIR 图谱,在白云母原样的光谱中可以观察到许多典型谱带。位于 3 642 和 3 432  $\text{cm}^{-1}$  处的振动峰分别对应于白云母层间结构水和表层结合水的 O - H 基团的拉伸振动峰<sup>[19]</sup>。1 638  $\text{cm}^{-1}$  处属于 O - H 组的弯曲振动峰,而 1 421  $\text{cm}^{-1}$  处对应于碳酸盐矿物杂质<sup>[20]</sup>。1 066、1 022 和 600 ~ 800  $\text{cm}^{-1}$  处振动归因于 Si - O 和 Si - O - Al<sub>IV</sub> 的弯曲振动,而 531  $\text{cm}^{-1}$  处归因于 Si - O - Al<sub>VI</sub> 的拉伸振动。与白云母原样相比,300 r/min 球磨后样品的红外特征峰变化不大,表明白云母的整体性未受到破坏。而在 600 r/min 研磨后样品的红外光谱中,许多振动峰都未能检出,例如在 3 624  $\text{cm}^{-1}$  处的 OH 基团拉伸振动峰,在 1 029  $\text{cm}^{-1}$  处的 Si - O 弯曲振动峰,在 600 ~ 800  $\text{cm}^{-1}$  处的 Si - O - Al<sub>IV</sub> 和 531  $\text{cm}^{-1}$  处 Si - O - Al<sub>VI</sub> 的拉伸振动峰。这些基团的消失表明白云母的层状结构在高强度机械力作用下被破坏。

上述检测分析结果表明,机械力活化作用主要是改变白云母的结构和形貌,当球磨转速逐步提升至300 r/min时,白云母的结构被轻微改变,原矿的 muscovite-2M1 晶体结构转变为 muscovite-1M。随着转速提升至600 r/min时,此时机械力活化强度较大,完全改变了白云母的晶体结构,使样品转变为非晶态,形成了团聚现象。机械力活化对白云母结构、形貌的改变为云母基环境功能材料去除重金属离子奠定了基础。

### 3.2 MgSO<sub>4</sub> 添加量对 Cd(II) 去除率的影响

根据白云母原样中 K 含量按照 Mg 和 K 元素的原子数量比,采用 2.1 所述的制备方法,在 600 r/min 转速下球磨 1 h 得到不同 MgSO<sub>4</sub> 添加量的云母基环境功能材料。重金属离子去除试验条件为:样品投加量为 5 g/L, Cd(II) 浓度为 100 mg/L, 溶液 pH 值为 6.0 ± 0.1, 保持 25 °C 恒温振荡反应 2 h。MgSO<sub>4</sub> 添加量对 Cd(II) 去除率的影响如图 6 所示。

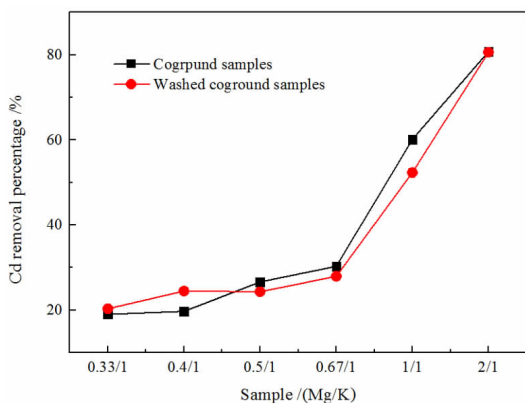


图 6 硫酸镁添加量对镉离子去除率的影响

Fig. 6 The effect of MgSO<sub>4</sub> addition on the removal rate of Cd(II)

分析图 6 可知,样品是否水洗对镉离子的去除几乎没有影响,表明在水洗过程中洗出的可溶性物质对镉离子的去除不起主要作用,样品中的固体成分是关键。随着硫酸镁添加量的增加,镉的去除率不断升高,当 Mg/K 原子数量比 = 2/1 时对 Cd(II) 的去除率可以达到 87.79%。

### 3.3 吸附材料用量对 Cd(II) 去除率的影响

采用 2.1 所述的制备方法,按照 Mg/K = 2/1 在 600 r/min 转速下球磨 1 h 得到云母基环境功能材料。重金属离子去除试验条件为: Cd(II) 质量浓度为 100 mg/L, 保持 25 °C 恒温振荡反应 2 h。白云母吸附材料

投加量对 Cd(II) 去除率的影响如图 7 所示。

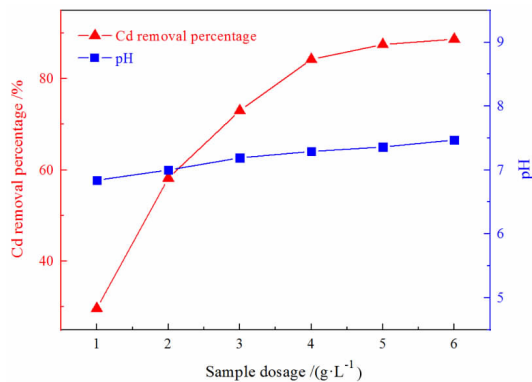


图 7 样品投加量对镉离子去除率的影响

Fig. 7 The effect of sample dosage on the removal rate of Cd(II)

分析图 7 可知,样品投加量对溶液的 pH 值影响不大,溶液 pH 值保持在 7 ~ 7.5 之间。随着样品投加量的增加, Cd(II) 的去除率先升高后趋于稳定,当投加量为 5 g/L 时, Cd(II) 的去除率为 87.79%, 再增加样品的投加量对 Cd(II) 去除率的提升影响有限,因此,确定样品投加量为 5 g/L 进行后续试验。

### 3.4 溶液初始 pH 值对 Cd(II) 去除率的影响

采用 2.1 所述的制备方法,按照 Mg/K = 2/1 在 600 r/min 转速下球磨 1 h 得到云母基环境功能材料。重金属离子去除试验条件为:白云母吸附材料投加量为 5 g/L, Cd(II) 质量浓度为 100 mg/L, 保持 25 °C 恒温振荡反应 2 h。由于 Cd(II) 在碱性条件下会产生氢氧化物沉淀而影响试验结果,因此溶液初始 pH 范围限定在 2 ~ 7, 溶液初始 pH 值对 Cd(II) 去除率的影响如图 8 所示。

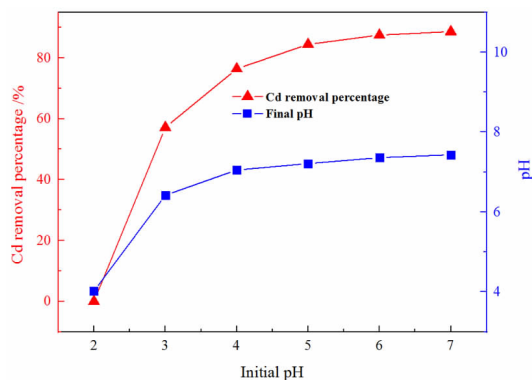


图 8 溶液初始 pH 对镉离子去除率的影响

Fig. 8 The effect of initial pH of solution on the removal rate of Cd(II)



分析图 8 可知,溶液的初始 pH 值对 Cd(II) 的去除率具有重要的影响,溶液初始 pH 为 2 时,由于酸性溶液中大量氢离子的存在,样品本身结构受到破坏从而难以去除 Cd(II)。Cd(II) 的去除率在溶液初始 pH 为 3 时迅速增加至 60% 左右,在溶液初始 pH 为 6~7 时进一步增加至 85% 以上。试验结果表明,在溶液初始 pH 为 3~7 时,溶液最终 pH 可以达到中性范围。许多研究表明,土壤的酸度对农作物的生长有很大的危害<sup>[21]</sup>,本研究制备的云母基环境功能材料可作为酸性土壤改良剂,不但可以固定土壤中的 Cd(II) 重金属污染物,还可以调剂土壤的酸碱度。

### 3.5 Cd(II) 去除机理分析

为了探究 Cd(II) 的去除机理,对与 Cd(II) 溶液反应前后的云母基环境功能材料样品 ( $Mg/K = 2/1$ ) 进行了 SEM-EDS 测试和 XRD 分析。

SEM-EDS 测试用来分析观测与 Cd(II) 反应前后样品的形态及元素分布特点。分析图 9 中 a 和 c 可知,通过 600 r/min 的机械力活化作用,与 Cd(II) 反应前后的样品均呈板状结构,非常小的云母颗粒呈现团聚状态。对比原样中的 Mg 含量 ( $MgO$  含量为 0.54%) 和添加  $MgSO_4$  球磨后样品 EDS 元素分析结

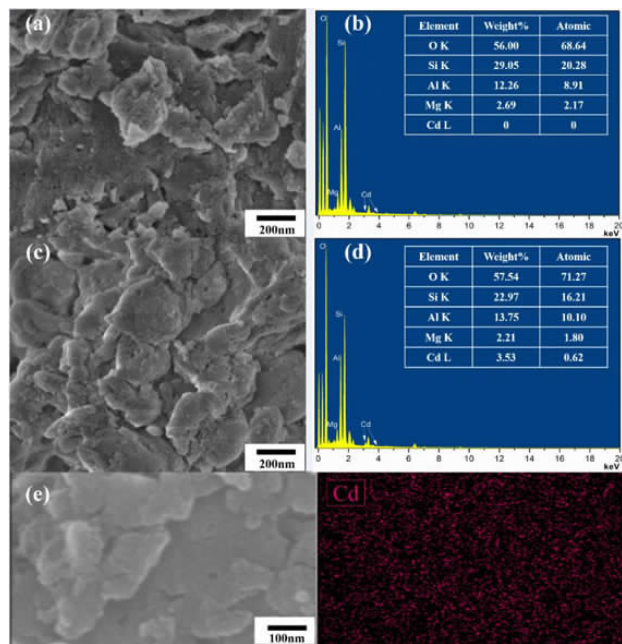


图 9 Cd(II) 反应前样品 SEM-EDS 分析(a, b)和 Cd(II) 反应后样品 SEM-EDS 分析(c, d)以及 Cd(II) 反应后样品 Cd 元素面扫图谱(e)

Fig. 9 SEM-EDS of before Cd(II) reaction (a, b) and after Cd(II) reaction (c, d) samples and Cd elemental mapping image of Cd-fixed sample (e)

果,经水洗后样品中除了 O、Si、Al 等主要元素外,还存在被机械力活化固定在云母结构内的 Mg 元素。分析图 9 中的 b 和 d 可知,与 Cd(II) 反应后,样品中 Cd 元素含量由 0 增加至 3.53%,同时可发现 Mg 元素含量由 2.69% 减少至 2.21%,表明在 Cd(II) 去除过程中发生了 Cd/Mg 离子的交换。分析图 9e 可知,与 Cd(II) 反应后样品可以观测到 Cd 元素均匀分散在样品上,表明 Cd(II) 已被成功固定在样品中。

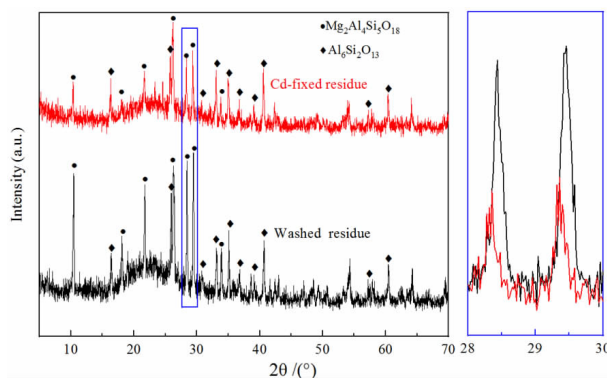
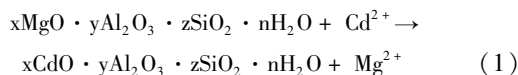


图 10 与 Cd(II) 反应前后的样品 XRD 图谱

Fig. 10 XRD patterns of samples before and after reaction with Cd(II)

白云母是典型的层状水合硅酸盐,在机械力作用下趋于非晶态,直接进行 XRD 分析不能得到研磨样品的结晶相,因此对样品进行煅烧以将这些无定形样品转变成结晶样品进行检测分析。图 10 为与 Cd(II) 反应前后水洗样品的 XRD 图谱,两种样品均能清楚地观察到堇青石 ( $Mg_2Al_4Si_5O_{18}$ ) 和莫来石 ( $Al_6Si_2O_{13}$ ) 相的峰。通过对比两种样品的特征峰可以发现,固定镉离子后的样品中莫来石相的峰强度没有明显变化,而堇青石相的峰强度明显减弱,这是由于与 Cd(II) 反应后样品中的 Mg 被 Cd(II) 取代导致样品中 Mg 含量减少而引起的。此外,图 10 中可以观测到与 Cd(II) 反应后堇青石相峰位置向较低的角度偏移,这是由于离子半径较大的 Cd(II) 取代了离子半径较小的 Mg(II) 导致晶格变大而引起的。

综上所述,云母基环境功能材料去除 Cd(II) 的机理可解释为溶液中的 Cd(II) 通过 Cd/Mg 离子交换而被固定在材料中。反应过程如式(1)所示:



## 4 结语

(1) 采用机械力化学法通过添加  $MgSO_4$  制备了云

母基环境功能材料,制备工艺条件为:球磨转速为 600 r/min,球磨时间为 1 h,Mg/K 为 2/1;当该样品投加量为 5 g/L 时,原始 Cd(II)浓度为 100 mg/L、pH 为 6 的溶液,镉离子的去除率可达 87.79%。

(2)SEM-EDS 测试和 XRD 分析结果揭示了该云母基环境功能材料去除 Cd(II)的机理为溶液中的 Cd(II)通过 Cd/Mg 离子交换被固定在材料中,从而被去除。

(3)相较于常见的碱沉淀法,使用机械力化学法制备的云母基环境功能材料能在中性 pH 附近去除 Cd(II),具有绿色环保、节能高效等优势,本研究可为相关矿物材料的制备提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] JIANG H K, JIANG L, ZHANG P, et al. Force-induced self-assembly of supramolecular modified mica nanosheets for ductile and heat-resistant mica papers[J]. *Langmuir*, 2021, 37(17): 5131-5138.
- [2] 徐启云. 某含钽铌锂云母多金属矿选矿工艺研究[J]. *湖南有色金属*, 2022, 38(1): 8-11+36.  
XU Q Y. Study on beneficiation process of a tantalum niobium lepidolite polymetallic ore [J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2022, 38(1): 8-11+36
- [3] 余力,戴慧新. 云母的加工与应用[J]. *云南冶金*, 2011, 40(5): 25-28+41.  
YU L, DAI H X. Processing and application of mica [J]. *Yunnan Metallurgy*, 2011, 40(5): 25-28+41.
- [4] 傅东,高建庭. 我国碎云母开发应用的若干问题及对策[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2014(3): 7-9.  
FU D, GAO J T. Some problems and countermeasures in the development and application of crushed mica in China [J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, 2014(3): 7-9.
- [5] 李凤,宋永胜,李文娟,等. 从某石墨尾矿中回收绢云母的选矿试验[J]. *金属矿山*, 2014(8): 170-174.  
LI F, SONG Y S, LI W J, et al. Beneficiation test of recovering sericite from a graphite tailings [J]. *Metal Mines*, 2014(8): 170-174.
- [6] 陈果,梁冠杰,刘猛. 甘肃某钨多金属矿中含钨白云母的选矿试验研究[J]. *矿业研究与开发*, 2018, 38(9): 59-62.  
CHEN G, LIANG G J, LIU M. Experimental study on beneficiation of rubidium bearing muscovite in a rubidium polymetallic ore in Gansu [J]. *Mining Research and Development*, 2018, 38(9): 59-62.
- [7] 陈杜娟,郭海宁,王志丰. 某钨矿中含钨黑云母的选矿试验研究[J]. *矿冶工程*, 2018, 38(5): 61-64.  
CHEN D J, GUO H N, WANG Z F. Experimental study on beneficiation of rubidium bearing biotite in a rubidium ore [J]. *Mining and Metallurgy Engineering*, 2018, 38(5): 61-64.
- [8] 厉平,高野,徐桐林,等. 辽宁某铁尾矿云母选矿试验研究[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2021(3): 53-55.  
LI P, GAO Y, XU T L, et al. Experimental study on mica beneficiation of an iron tailings in Liaoning [J]. *China Nonmetallic Mineral Industry Guide*, 2021(3): 53-55.
- [9] 田敏,张红新,赵恒勤,等. 某云母矿中稀有金属赋存状态分析及云母选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(5): 97-105.  
TIAN M, ZHANG H X, ZHAO H Q, et al. Occurrence state analysis of rare metals in a mica ore and Study on mica beneficiation process [J]. *Comprehensive Utilization of Mineral Resources*, 2021(5): 97-105.
- [10] 陈慧杰,于阳辉,潘卫,等. 新疆某白云母选矿试验研究[J]. *非金属矿*, 2021, 44(6): 66-68+73.  
CHEN H J, YU Y H, PAN W, et al. Experimental study on beneficiation of muscovite in Xinjiang [J]. *Nonmetallic Ore*, 2021, 44(6): 66-68+73.
- [11] 杨天宇,朱朋利,王凯,等. 云母粉表面改性及其在工业防腐涂料中的应用[J]. *中国涂料*, 2021, 36(12): 52-56+64.  
YANG T Y, ZHU P L, WANG K, et al. Surface modification of mica powder and its application in industrial anticorrosive coatings [J]. *China Coatings*, 2021, 36(12): 52-56+64.
- [12] 胡慧敏,张其武. 球磨调控非金属矿物反应活性实现重金属环境净化及资源再生利用[J]. *金属矿山*, 2020(10): 82-91.  
HU H M, ZHANG Q W. Ball milling regulates the reaction activity of non-metallic minerals to realize environmental purification and resource recycling of heavy metals [J]. *Metal Mines*, 2020(10): 82-91.
- [13] 夏延秋,李庆贺,王远慧,等. 白云母和高岭土作聚四氟乙烯润滑脂添加剂的摩擦学性能[J]. *石油炼制与化工*, 2021, 52(11): 56-63.  
XIA Y Q, LI Q H, WANG Y H, et al. Tribological properties of muscovite and kaolin as PTFE grease additives [J]. *Petroleum refining and chemical engineering*, 2021, 52(11): 56-63.
- [14] 刘岩鑫. 共磨白云母和钙镁盐制备钾硅肥及重金属离子固定剂[D]. 武汉:武汉理工大学, 2020.  
LIU Y C. Preparation of potassium silicon fertilizer and heavy metal ion fixative by Co-grinding muscovite and calcium magnesium salt [D]. Wuhan: Wuhan University of technology, 2020.
- [15] SALAM M A, ABUKHADRA M R, MOSTAFA M. Effective decontamination of As(V), Hg(II), and U(VI) toxic ions from water using novel muscovite/zeolite aluminosilicate composite: adsorption behavior and mechanism. [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2020, 27(12): 13247-13260.
- [16] 夏银,刘月迎,王丽娟,等. 蛭石对水中重金属离子的吸附性能[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(5): 1357-1363.  
XIA Y, LIU Y Y, WANG L J, et al. Adsorption properties of vermiculite for heavy metal ions in water [J]. *Journal of Silicate*, 2022, 50(5): 1357-1363.
- [17] 罗东霞. 绿色木霉对云母矿物吸附 Pb<sup>2+</sup> 的调控机制研究[D]. 兰州:兰州大学, 2021.  
LUO D X. Study on the regulation mechanism of trichoderma viride on the adsorption of Pb<sup>2+</sup> on mica minerals [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.
- [18] 崔迎辉. 改性蛭石对重金属离子 Pb(II)、Cr(VI)的吸附应用[D]. 成都:成都理工大学, 2017.  
CUI Y H. Adsorption and application of modified vermiculite for heavy metal ions Pb(II) and Cr(VI) [D]. Chengdu: Chengdu University of technology, 2017.
- [19] BO Y, LI B L, et al. Extraction of potassium from K-feldspar via the CaCl<sub>2</sub> calcination route[J]. *Chin J Chem Eng*, 2015, 23(9): 1557-1564.
- [20] MANOH MENON, SANDRA HEMLE, MADELEINE S, et al. Effects