

磁性多孔 MgO 的合成及其对 U(VI) 的吸附性能研究

宋鹏旺¹, 付玉琴², 周亮³, 蔡为钱¹, 熊玲珊¹, 王有群¹

- 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013;
- 江西省地质调查勘查院基础地质调查所实验测试中心, 江西 南昌 330000;
- 江西省地质局物化探大队实验测试中心, 江西 南昌 330201)

摘要:研究了以纳米四氧化三铁(Fe_3O_4)为内核、 MgCl_2 为镁源,制备磁性多孔氧化镁(m-MgO),并用于吸附水溶液中的 U(VI)。采用 FT-IR、XRD、VSM 及 Zeta 电位表征了 MgO 和 m-MgO 的理化性质,考察了溶液 pH、吸附剂用量、振荡时间对 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI)的影响,并探讨了吸附动力学。结果表明:m-MgO 吸附铀的最优条件为溶液 pH=3.5、吸附剂用量 10 mg、振荡时间 720 min;吸附过程符合准二级动力学模型和 Sips 等温吸附模型,理论吸附量为 454.16 mg/g,升高温度有助于吸附自发进行。m-MgO 有望用于从放射性废水中分离回收铀。

关键词:铀;磁性;吸附;氧化镁;多孔;分离;回收;去除

中图分类号:TL212;TQ424 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2617(2024)06-0665-07

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2024.06.011

在当前全球能源需求持续增长、传统能源资源日益匮乏形势下,世界各国均将铀资源的勘探、开发和利用置于高度优先的战略地位^[1],但与此同时,铀污染给人体和环境带来的潜在危害也不容忽视。铀在人体内的过量积累可能导致严重的健康问题,包括癌症、畸形等多种疾病^[2];铀矿开采和水冶及转化等过程中产生的含铀放射性废水,未经妥善处理排放会严重污染土地、水源和空气,破坏生态环境。此外,铀污染还具有隐蔽性、持久性和累积性^[3]。因此,采取有效措施对含铀废水进行处理具有十分重要的意义。

目前,低浓度含铀废水的处理方法主要包括化学沉淀法^[4]、离子交换法、溶剂萃取法^[5]、膜分离法^[6]和吸附法^[7]等,其中,吸附法因具有高效、快速和操作方便等优点而备受青睐^[8]。吸附剂作为吸附法的关键,其性能直接影响处理效果。MgO 是一种典型的碱金属氧化物,原料易得,安全无毒。目前,Mg-MOF-74 衍生的多孔 MgO/碳

复合材料^[9]、多孔氧化镁泡沫^[10]、超亲水表面纳米氧化镁生物碳复合材料均可高效吸附铀^[11]。由于纳米 MgO 尺寸较小,存在难以回收的问题^[12],但将磁性纳米材料与 MgO 结合则能同时达到磁性分离与增大比表面积的目的。因此,研究了以 Fe_3O_4 为磁核、 MgCl_2 为镁源,采用溶胶-凝胶法制备 m-MgO,并用于去除水溶液中的 U(VI)。通过 FT-IR、XRD、VSM 及 Zeta 电位表征了 MgO 和 m-MgO 的理化性质,系统探讨了影响吸附的主要因素、动力学、等温线和热力学,推测了 m-MgO 与 U(VI) 相互作用机制。

1 试验部分

1.1 原料、试剂与主要仪器设备

原料:铀标准溶液(1 000 mg/L),购于上海麦克林生化科技股份有限公司,不同铀初始质量浓度(20~200 mg/L)的溶液由铀标准溶液稀释得到。

试剂:氯化镁(AR)、盐酸(37%)、硝酸

收稿日期:2024-05-10

基金项目:江西省自然科学基金青年项目(20202BABL213026)。

第一作者简介:宋鹏旺(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为放射性废水处理。

通信作者简介:王有群(1988—),男,博士,副教授,主要研究方向为核化工。E-mail:wangyouqun@ecut.edu.cn。

(68%),购于国药化学试剂有限公司;氢氧化钠(AR)、2,4-二硝基苯酚(AR),购于西陇化工股份有限公司;十六烷基三甲基溴化铵(CTAB,AR),购于山东国化化学有限公司;氯乙酸(AR)、偶氮胂(Ⅲ)(AR)、乙酸钠(AR),购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

主要仪器设备:电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9073BS-III,天津泰斯特仪器有限公司),紫外-可见分光光度计(SP-721E,上海光谱仪器公司),红外光谱仪(FTS-65A,美国 Bio-RAD 公司),Zeta 电位仪(Stabino PMX 400,美国 Microtrac 公司),振动样品磁强计(8600 系列,Lake Shore 公司),多晶 X 射线衍射仪(D8 advance,德国布鲁克公司),孔隙率仪(V-Sorb 4800P,北京金埃谱科技有限公司)。

1.2 吸附材料的制备

将 5.76 g 无水乙酸钠和 2.16 g 氯化铁溶解在 80 mL 乙二醇中,200 °C 溶剂热法反应 10 h,将产物取出,用去离子水清洗后,于 60 °C 下干燥,记为 Fe₃O₄。

配制浓度为 8.9×10^{-4} mol/L 的含 CTAB 溶液,取 10 mL 作为阳离子表面活性剂;在恒定搅拌条件下,加入 500 mL 浓度为 1 mol/L 的 MgCl₂ 溶液,继续搅拌 1 h;然后,滴加浓度 1 mol/L 的氨水溶液,直至澄清溶液产生微量 Mg(OH)₂ 溶胶(pH=10.0);将溶胶搅拌 2 h 后放置 2 d,使溶胶缩合成固体凝胶纳米颗粒;过滤收集凝胶颗粒并用蒸馏水洗涤数次,直至滤液中无氯离子;将纳米颗粒在 100 °C 下干燥 24 h,并在 500 °C 高温炉中煅烧 3 h,以诱导 MgO 纳米颗粒结晶;最后,将适量 Fe₃O₄ 纳米颗粒悬浮在 50 mL 蒸馏水中,加入适量上述 MgO 颗粒,超声处理溶液 30 min,过滤,滤渣在 100 °C 下干燥 24 h,记为 m-MgO。

1.3 m-MgO 对铀的吸附试验

称取一定量 m-MgO 于不同锥形瓶中,分别加入 50 mL 一定浓度的铀标准溶液,在一定温度下振荡一定时间,移取振荡后溶液于 2 mL 离心管中离心,再移取一定体积的离心液于 25 mL 容量瓶中,采用偶氮胂Ⅲ分光光度法测定吸附后溶液中铀浓度,计算吸附量 q_t 。计算公式为

$$q_t = \frac{(\rho_0 - \rho_t)V}{m} \quad (1)$$

式中: q_t —m-MgO 对铀的吸附量,mg/g; ρ_0 —溶液中铀初始质量浓度,mg/L; ρ_t —吸附 t 时间时溶液中铀质量浓度,mg/L; V —溶液体积,L; m —m-MgO 质量,g。

2 试验结果与讨论

2.1 吸附材料的表征

图 1(a)为 MgO、m-MgO 和吸附铀的 m-MgO (m-MgO+U) 的 FT-IR 图谱。在 592、1 385 和 1 622 cm^{-1} 出现的峰分别是 Mg—O—MgO 和 O—Mg—O 伸缩和弯曲振动峰;在 3 450 cm^{-1} 处出现了 O—H 吸收峰,可能是由煅烧后样品中残留 Mg(OH)₂ 或样品吸附水引起;在 2 120 cm^{-1} 处出现了 Fe—O 的特征吸收峰,说明 Fe₃O₄ 成功负载至 MgO 表面;在 908 cm^{-1} 处出现了 UO₂²⁺ 的特征吸收峰,表明 m-MgO 已成功吸附 U(VI)^[13]。

图 1(b)为 Fe₃O₄、MgO、m-MgO 和 m-MgO+U 的 XRD 图谱。在 37°、42°和 62°处出现的峰为 MgO 的特征衍射峰,分别对应 MgO 的(111)、(200)和(220)晶面;对于 m-MgO、m-MgO+U 和 Fe₃O₄ 在 30°、35°、52°和 57°出现的衍射峰分别对应 Fe₃O₄ 的(220)、(311)、(422)和(511)晶面,说明 MgO 与 Fe₃O₄ 成功复合,且 m-MgO 吸附 U(VI) 后的结构未发生改变。

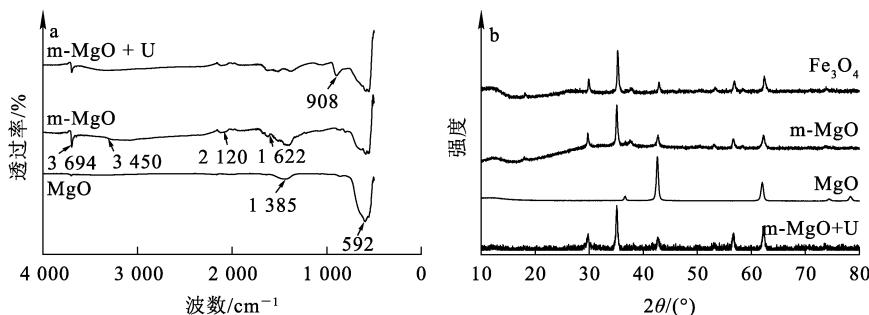


图 1 MgO、m-MgO 和 m-MgO+U 的 FT-IR(a)和 XRD(b)图谱

使用振动样品磁强计(VSM)测定 m-MgO 在磁场强度为-3 000~3 000 kA/m 范围内的比饱和磁化强度,结果如图 2 所示。可以看出:Fe₃O₄ 与 m-MgO 的比饱和磁化强度分别为 43.0、22.5 (A·m²)/kg,表明 Fe₃O₄ 与 MgO 成功复合。

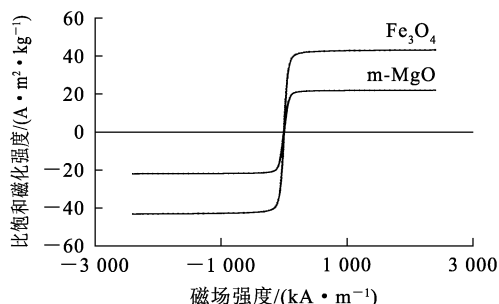


图 2 Fe₃O₄ 和 m-MgO 的磁滞回线

称取少量 m-MgO 材料分散于去离子水中进行磁分离试验,结果如图 3 所示。可以看出,在外加磁场作用下,m-MgO 材料会定向移动至磁铁一侧,使溶液变得澄清,说明 m-MgO 可借助外加磁场快速实现固液分离。

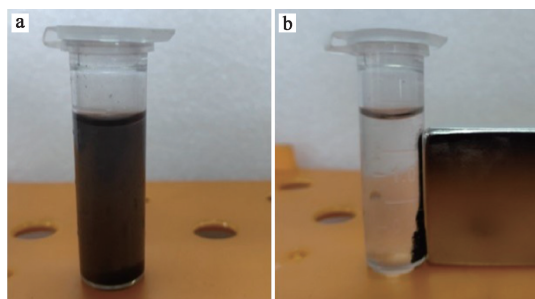


图 3 m-MgO 磁分离前(a)、后(b)的照片

不同 pH 下 Fe₃O₄、MgO、m-MgO 的 Zeta 电位如图 4 所示。可以看出:Fe₃O₄、MgO 和 m-MgO 的 Zeta 电位随 pH 升高而降低,等电点的 pH 分别是 4.7、5.3 和 3.7,表明 MgO 与 Fe₃O₄ 复合后,m-MgO 的等电点处 pH 负移,在 pH 较低时表面带负电。

图 5 为 m-MgO 和 MgO 的 N₂ 吸附-脱附等温线。可以看出:2 条吸附-脱附等温线均为第 III 类吸附等温线^[14],吸附气体量随组分分压增加而上升;曲线下凹是因为 N₂ 之间的相互作用比 N₂ 与 m-MgO 和 MgO 之间的相互作用更强,导致初期 N₂ 较难于吸附,吸附速率较慢,但随吸附继续进行,出现了自加速现象。

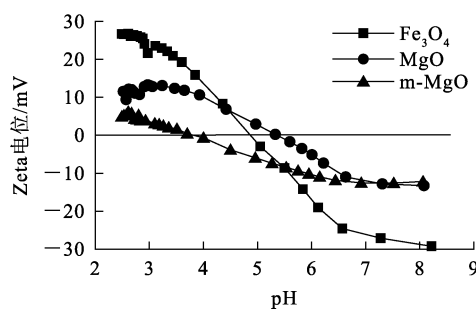


图 4 不同 pH 下 Fe₃O₄、MgO、m-MgO 的 Zeta 电位

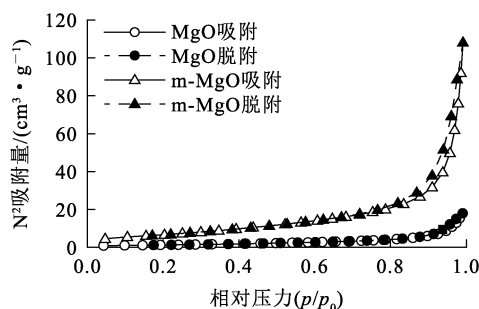


图 5 MgO 和 m-MgO 的 N₂ 吸附-脱附等温线

m-MgO 和 MgO 的比表面积及孔结构参数见表 1。可以看出:MgO 和 m-MgO 的比表面积(S_{BET})分别为 4.77 和 25.30 m²/g,总孔容(V_t)分别为 0.03 和 0.16 cm³/g,孔径(D_m)分别为 36.13 和 46.05 nm。这表明,MgO 与 Fe₃O₄ 复合后,比表面积和总孔容均增大,有利于 U(VI)的吸附^[14]。

表 1 MgO 和 m-MgO 的比表面积及孔结构参数

| 材料 | $S_{BET}/(m^2 \cdot g^{-1})$ | $V_t/(cm^3 \cdot g^{-1})$ | D_m/nm |
|-------|------------------------------|---------------------------|----------|
| MgO | 4.77 | 0.03 | 36.13 |
| m-MgO | 25.30 | 0.16 | 46.05 |

2.2 溶液 pH 的影响

在铀初始质量浓度 50 mg/L、温度 25 °C、振荡时间 720 min、吸附剂用量 10 mg 条件下,考察溶液 pH 对 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI)的影响,试验结果如图 6 所示。可以看出:溶液 pH 在 1.0~5.0 之间时,随 pH 升高,m-MgO 对 U(VI)的吸附量先增大后减小。这是因为当 pH<3.5 时,MgO 和 m-MgO 表面带正电,此时溶液中 U(VI)主要形态为 UO₂²⁺(见图 7),材料表面的正电荷与带正电荷的铀酰离子产生静电排斥,同时,由于大量存在的 H⁺与铀竞争吸附位点,导致材料的吸附能力较差;随 pH 升高,暴露出更多的吸附

位点,使得材料对铀的吸附能力进一步增强^[15],并在 pH=3.5 时吸附量达最大(223.10 mg/g);当 pH>3.5 时,U(VI)以 UO_2OH^+ 、 $(\text{UO}_2)_2(\text{OH})_2^{2+}$ 及 $(\text{UO}_2)_3(\text{OH})_3^+$ 等形式存在于溶液中,空间位阻增大,导致吸附量下降。由图 6 还可看出:pH 在 3.5~5.0 范围内时,MgO 对 U(VI)有较强的吸附能力,吸附量随 pH 变化较小,基本维持在 119.15 mg/g 左右,表明 MgO 对 U(VI)的吸附主要为表面配合作用^[16]。因此,确定 MgO 和 m-MgO 对 U(VI)吸附的最佳 pH 为 3.5。

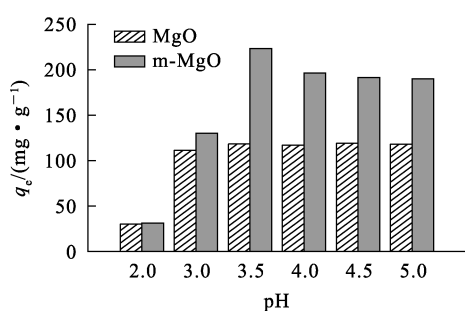


图 6 溶液 pH 对 MgO 和 m-MgO 吸附铀的影响

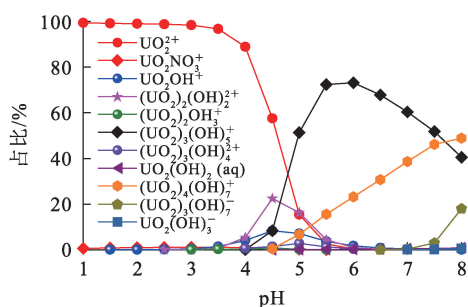


图 7 不同 pH 下 U(VI)的种态分布

2.3 吸附动力学

在铀初始质量浓度 50 mg/L、温度 25 °C、溶液 pH=3.5 和吸附剂用量 10 mg 条件下,考察反应时间对 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI)的影响,试验结果如图 8 所示。可以看出:随反应时间延长,MgO 和 m-MgO 对 U(VI)的吸附量逐渐增大,在吸附 720 min 后增大趋势变缓。因此,确定最佳反应时间为 720 min。

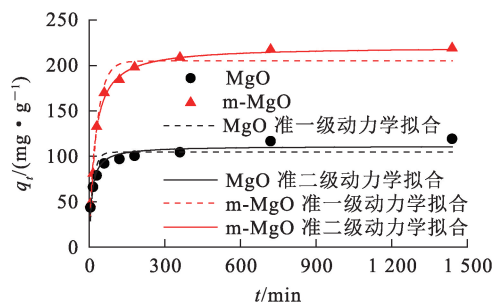


图 8 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI)的准一级、准二级动力学拟合曲线

为研究 MgO 和 m-MgO 对 U(VI)的吸附机制,分别采用准一级(PFO)和准二级(PSO)吸附动力学模型^[17]分析吸附过程。PFO 和 PSO 的动力学拟合曲线如图 8 所示,拟合参数见表 2。PFO 和 PSO 的表达式如下:

$$q_t = q_e(1 - e^{-k_1 t}); \quad (2)$$

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{1 + q_e k_2 t} \quad (3)$$

式中: k_1 —PFO 吸附速率常数, min^{-1} ; k_2 —PSO 吸附速率常数, $\text{g}/(\text{mg} \cdot \text{min})$; q_t —吸附 t 时间时的吸附量, mg/g ; q_e —平衡吸附量, mg/g 。

表 2 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI)的准一级和准二级动力学拟合参数

| 吸附剂 | $q_{e, \text{试验}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ | 准一级动力学模型 | | | 准二级动力学模型 | | |
|-------|--|--|-------------------------|-------|--|---|-------|
| | | $q_{e, \text{理论}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ | $k_1/(\text{min}^{-1})$ | R^2 | $q_{e, \text{理论}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$ | $k_2/(\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$ | R^2 |
| MgO | 116.57 | 104.60 | 0.065 | 0.79 | 111.12 | 8.76×10^{-4} | 0.94 |
| m-MgO | 218.32 | 204.92 | 0.034 | 0.97 | 230.80 | 2.18×10^{-4} | 0.99 |

由表 2 看出:MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI)的准二级动力学模型拟合线性相关度 R^2 均高于准一级动力学的 R^2 ;准二级动力学模型拟合的理论平衡吸附量与试验值更为接近。说明 MgO 和 m-MgO 对 U(VI)的吸附更符合准二级动力学模型,吸附主要是由化学作用控制。

2.4 吸附等温线

浓度是影响吸附剂去除 U(VI)的重要因素,在溶液 pH=3.5、温度 25 °C、振荡时间 720 min、吸附剂用量 10 mg 条件下,考察溶液中 U(VI)初始质量浓度对 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI)的影响,试验结果如图 9 所示。

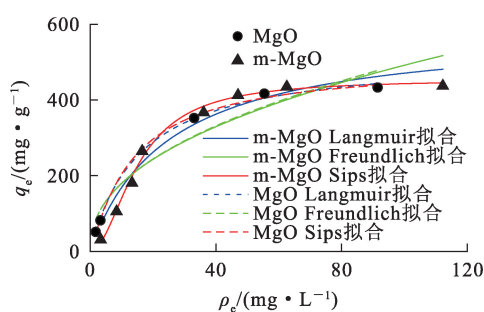


图 9 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI) 的吸附等温线

由图 9 看出:随溶液中 U(VI) 初始质量浓度升高, MgO 和 m-MgO 对 U(VI) 的吸附量先增大后趋于平衡, 这是因为随 U(VI) 质量浓度升高, 固相与液相之间的浓度梯度也逐步增大, 使得吸附作用逐渐增强; 但随 U(VI) 质量浓度持续升高, m-MgO 的吸附位点逐渐被占据, 无法吸附更多的 U(VI), 吸附量增幅减缓, 最终达到吸附饱和状态。

为进一步确定吸附材料与吸附质之间的相互作用机制, 试验分别采用 Langmuir、Freundlich 和 Sips 等温吸附模型对吸附过程进行拟合分析。

Langmuir 等温吸附模型假设吸附为单分子层吸附, 吸附剂表面性质均一。其非线性表达方程^[18] 见式(4):

$$q_e = \frac{k_L q_m \rho_e}{1 + k_L \rho_e} \quad (4)$$

式中: k_L —Langmuir 等温吸附平衡常数, L/mg, 与吸附能量有关, 数值越大, 吸附亲和力越大; q_m —最大吸附量, mg/g。

Freundlich 等温吸附模型假设吸附为多分子层吸附, 吸附位点分布不均匀, 其非线性表达式见式(5):

$$q_e = k_F \rho_e^{1/n} \quad (5)$$

式中: n —与吸附强度和吸附量相关参数; k_F —Freundlich 等温吸附平衡常数, $\text{mg}^{-1/n} \cdot \text{L}^{1/n} \cdot \text{g}^{-1}$, 与吸附强度和吸附量相关。

Sips 等温吸附模型假设吸附质分子在固体表面上的吸附可以是单层也可以是多层的, 但每一层的吸附都遵循 Langmuir 等温吸附的规律, 其非线性表达式见式(6):

$$q_e = \frac{q_m k_s \rho_e^\beta}{1 + k_s \rho_e^\beta} \quad (6)$$

式中: q_m —最大吸附量, mg/g; k_s —吸附能量相关参数, $\text{L}^\beta \cdot \text{mg}^{1-\beta} \cdot \text{g}^{-\beta}$; β —吸附强度相关参数。

通过计算试验数据, 以 q_e 对 ρ_e 作图, 得到 Langmuir、Freundlich 和 Sips 等温吸附模型的拟合曲线(见图 9)。根据曲线的斜率和截距计算相关拟合参数, 结果见表 3。

表 3 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI) 的等温吸附拟合参数

| 吸附剂 | Langmuir | | | Freundlich | | | Sips | | | |
|-------|--|--|-------|------------|---|-------|--|---|---------|-------|
| | $q_m /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | $k_L /$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$) | R^2 | n | $k_F /$ ($\text{L}^{1/n} \cdot \text{mg}^{1-1/n} \cdot \text{g}^{-1}$) | R^2 | $q_m /$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$) | $k_s /$ ($\text{L}^\beta \cdot \text{mg}^{1-\beta} \cdot \text{g}^{-\beta}$) | β | R^2 |
| MgO | 521.56 | 6.20×10^{-2} | 0.99 | 0.44 | 64.84 | 0.94 | 492.97 | 0.07 | 1.10 | 0.94 |
| m-MgO | 587.92 | 4.01×10^{-2} | 0.95 | 0.44 | 65.45 | 0.85 | 454.16 | 0.07 | 1.95 | 0.99 |

由表 3 看出: m-MgO 吸附 U(VI) 的 Sips 等温吸附拟合相关系数 R^2 为 0.99, 略高于 Langmuir 和 Freundlich 模型, 且最大吸附量为 454.16 mg/g, 与试验值(439.1 mg/g) 接近, 说明 m-MgO 吸附过程更符合 Sips 等温吸附模型, 材料表面的活性位点为非均匀分布, U(VI) 在 m-MgO 材料表面的吸附过程为非均相吸附; MgO 吸附 U(VI) 的 Langmuir 等温吸附拟合相关系数 R^2 高于 Sips 和 Freundlich 等温吸附模型, 说明 MgO 吸附 U(VI) 的过程更符合 Langmuir 等温吸附模型, 属于单层均一吸附。

2.5 吸附热力学

在铀初始质量浓度为 50 mg/g、溶液 pH =

3.5、振荡时间 720 min、吸附剂用量 10 mg 条件下, 考察温度条件对 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI) 的影响, 试验结果如图 10 所示。

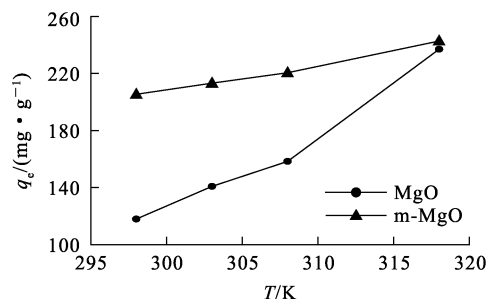


图 10 温度对 MgO 和 m-MgO 吸附 U(VI) 的影响

由图 10 看出:随温度升高,m-MgO 对 U(VI) 的吸附量逐渐增大,升高温度有利于 m-MgO 对 U(VI)的吸附。结合其他对吸附过程影响较大的因素,综合考虑,选择 25 °C (298 K)为最适宜温度。采用热力学函数进一步考察温度对 m-MgO 吸附 U(VI)的影响。通过计算吉布斯自由能变(ΔG)、焓变(ΔH)、熵变(ΔS,判断吸附类型^[19]。吸附反应的 ΔG、ΔH、ΔS 与热力学平衡常数 k_d 之间的关系见式(6)~(8)。

$$k_d = \frac{q_e}{\rho_e}; \quad (6)$$

$$\ln k_d = \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT}; \quad (7)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S. \quad (8)$$

式中: k_d —热力学平衡常数,L/g; R —理想气体摩尔常数,8.314 J/(K·mol); ΔH —焓变,J/mol; ΔG —吉布斯自由能变,J/mol; ΔS —熵变,J/(mol·K)。

$\ln k_d-1/T$ 关系曲线如图 11 所示,热力学参数计算结果见表 4。可以看出:m-MgO 吸附铀的 $\Delta H>0$ 、 $\Delta S>0$ 、 $\Delta G<0$,证实吸附是吸热熵增自发的过程,且随温度升高,ΔG 值逐渐减小,表明升高温度有利于吸附的自发进行。

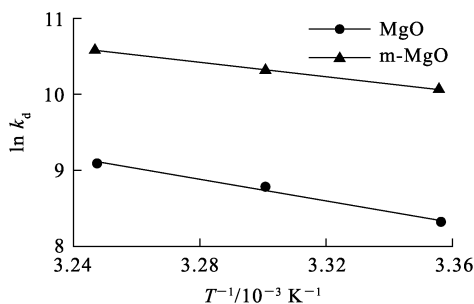


图 11 $\ln k_d-1/T$ 关系曲线

表 4 MgO 和 m-MgO 吸附铀的热力学参数

| 吸附剂 | $\Delta H/$ (kJ·mol ⁻¹) | $\Delta S/$ (J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹) | $\Delta G/$ (kJ·mol ⁻¹) | | |
|-------|--|--|-------------------------------------|-------|-------|
| | | | 298 K | 303 K | 308 K |
| MgO | 37.4 | 207.9 | -24.6 | -25.6 | -26.6 |
| m-MgO | 51.5 | 241.1 | -20.3 | -21.6 | -22.8 |

3 结论

以 Fe₃O₄ 为内核、MgCl₂ 为镁源成功制备了可用于吸附铀的复合磁性氧化镁(m-MgO)吸附

材料,m-MgO 的比表面积较 MgO 有大幅增加。m-MgO 对 U(VI) 的最佳吸附条件为:溶液 pH=3.5,吸附剂用量 10 mg,吸附时间 720 min。m-MgO 对 U(VI) 的吸附符合准二级动力学模型和 Sips 等温吸附模型,理论吸附量为 454.16 mg/g,吸附过程是熵增自发进行,升高温度有助于吸附。m-MgO 吸附材料有望用于从放射性废水中分离回收铀。

参考文献:

- [1] 李强,陈擎,王继斌,等.世界铀资源现状与我国核电发展资源保障的对策建议[J].中国矿业,2023,32(3):1-9.
- [2] 刘明,杨敏,李旭东,等.某铀矿冶工程非放射性职业病危害及其关键控制点分析[J].中国卫生工程学,2011,10(1):14-17.
- [3] HU H,GAO M,WANG T,et al. Efficient uranium adsorption and mineralization recycle by nano-MgO biochar with super-hydrophilic surface [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5). DOI: 10. 1016/j. jece. 2023. 110542
- [4] 樊红梅.化学沉淀法在水质处理中的应用与优化[J].化工管理,2024(2):32-35.
- [5] 勾阳飞,封宇,陈树森,等.低密度树脂的制备及其对矿浆中铀的吸附性能研究[J].湿法冶金,2023,42(3):269-275.
- [6] 蒋德祥,何辉.溶剂萃取法从辐照铀靶溶解液中提取分离铈的萃取价态选择: I Pu(IV)-Np(IV)[J].核化学与放射化学,2022,44(1):73-82.
- [7] 唐林飞,唐东山,牛洁,等.载铁花生壳炭的碳热还原法制备及其对铀的吸附性能[J].湿法冶金,2023,42(2):155-162.
- [8] 郭小义.沉淀/吸附法在电镀废水重金属处理中的应用[J].化工设计通讯,2022,48(9):47-48.
- [9] LYU Z,WANG H Y,CHEN C L,et al. Enhanced removal of uranium(VI) from aqueous solution by a novel Mg-MOF-74-derived porous MgO/carbon adsorbent [J]. Journal of Colloid and Interface Science,2019,537:1-10.
- [10] WANG Y S,CHEN Y T,LIU C,et al. Preparation of porous magnesium oxide foam and study on its enrichment of uranium [J]. Journal of Nuclear Materials,2018,504:166-175.
- [11] MOHAMED R M,SHAWKY A,MKHALID I A. Facile synthesis of MgO and Ni-MgO nanostructures with enhanced adsorption of methyl blue dye [J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids,2017,101:50-57.
- [12] 邓信忠,薛志爽,梁海,等.纳米氧化镁制备及对 Cd²⁺ 的吸附性能[J].有色金属工程,2022,12(10):138-144.
- [13] NAMVAR-MAHBOUB M, KHODEIR E, BAHADORI M, et al. Preparation of magnetic MgO/Fe₃O₄ via the green method for competitive removal of Pb and Cd from aqueous solution[J]. Colloids and Surfaces: A, 2020, 589. DOI: 10. 1016/j. colsurfa. 2020. 124419.

- [14] 薛志爽,邓信忠,梁海,等. 高比表面积超细氧化镁的制备及吸附水体中磷的性能[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(7):88-94.
- [15] BRYNZAK-SCHREIBER E, SCHÖGL E, BAPP C, et al. Microplastics role in cell migration and distribution during cancer cell division[J]. *Chemosphere*, 2024, 353. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2024.141463.
- [16] 廖玉梅,余杰,魏世强,等. FeMnNi-LDHs 对水中 As(III) 的吸附性能与机制[J]. *环境科学*, 2021, 42(1):293-304.
- [17] 张泽雨,周仲魁,张益硕,等. CTAB 改性铁柱撑膨润土的制备及其对废水中低浓度铀(VI)的吸附性能研究[J]. *湿法冶金*, 2023, 42(5):522-531.
- [18] MITTAL A, KURUP L, MITTAL J. Freundlich and Langmuir adsorption isotherms and kinetics for the removal of Tartrazine from aqueous solutions using hen feathers[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 146(1/2):243-248.
- [19] KUMAR S P, RAMAKRISHNAN K, KIRUPHA D S, et al. Thermodynamic and kinetic studies of cadmium adsorption from aqueous solution onto rice husk[J]. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2010, 27(2):283-284.

Preparation of Magnetic and Porous MgO and Its Adsorption Performance for U(VI)

SONG Pengwang¹, FU Yuqin², ZHOU Liang³, CAI Weiqian¹, XIONG Lingshan¹, WANG Youqun¹

(1. *State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;*

2. *Experimental Testing Center of the Basic Geological Survey Institute of Jiangxi Geological Survey and Exploration Institute, Nanchang 330000, China;*

3. *Experimental Testing Center of Physical and Chemical Exploration Brigade of Jiangxi Provincial Geological Bureau, Nanchang 330201, China)*

Abstract: The magnetic porous magnesium oxide (m-MgO) was prepared with nano-ferric oxide (Fe_3O_4) as the core and MgCl_2 as the magnesium source, and was used for adsorption of U(VI) in aqueous solution. The physicochemical properties of MgO and m-MgO were characterized by FT-IR, XRD, VSM and Zeta potential. The effects of solution pH, temperature, and oscillation time on the adsorption of U(VI) by MgO and m-MgO were investigated. The results show that the optimal conditions for uranium adsorption by MgO and m-MgO are pH=3.5, adsorbent dosage of 10 mg, and oscillation time of 720 min. The adsorption process conforms to the pseudo-second-order kinetic model and the Sips isotherm adsorption model, with a theoretical adsorption capacity of 454.16 mg/g, and the increase of temperature is conducive to the spontaneous adsorption. Therefore, m-MgO is expected to be used to separate and recover uranium from radioactive wastewater.

Key words: uranium; magnetism; adsorption; magnesium oxide; porous; separation; recycle; removing