

SA@PG复合材料对重金属去除性能研究

罗雨娜, 张娟, 陈金毅*

武汉工程大学化学与环境工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月28日

摘要

以海藻酸钠作为改性材料, 通过共混、交联和接枝反应改性磷石膏, 成功制备海藻酸钠接枝磷石膏复合材料(SA@PG), 用于水体中重金属Cd(II)、Cu(II)和Pb(II)的移除。系统地优化了吸附条件, 包括吸附时间、吸附剂用量和溶液pH值等。采用各种分析表征方法对SA@PG复合材料的形貌和结构进行表征, 结果表明, 复合材料具有三维多孔结构和多活性作用位点等优点, 这些优点使SA@PG具有良好的吸附能力, 对Cd(II)、Cu(II)和Pb(II)的最大平衡吸附量可达48.02 mg/g、58.86 mg/g和123.39 mg/g, 优于单独的PG。使用Langmuir、Freundlich 等温模型研究了SA@PG复合材料的吸附行为和机制, 结果表明为单分子层吸附; 热力学分析表明吸附过程是吸热和自发的。

关键词

磷石膏, 海藻酸钠, 重金属, 吸附

Research on Heavy Metal Removal by SA@PG Composite Material

Yuna Luo, Juan Zhang, Jinyi Chen*

School of Chemistry and Environmental Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan Hubei

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 28th, 2025

Abstract

Sodium alginate was used as a modified material to successfully prepare sodium alginate grafted phosphogypsum composites (SA@PG) for the removal of heavy metals from water by blending, cross-linking, and grafting reactions. The adsorption conditions, including adsorption time, adsorbent dosage and solution pH, were systematically optimized. Various analytical characterization methods

*通讯作者。

文章引用: 罗雨娜, 张娟, 陈金毅. SA@PG 复合材料对重金属去除性能研究[J]. 材料科学, 2025, 15(5): 1165-1175.
DOI: 10.12677/ms.2025.155122

were used to characterize the morphology and structure of SA@PG composites, and the results showed that the composites had advantages of three-dimensional porous structure and multiple active sites of action, which gave SA@PG good adsorption capacity, and the maximal equilibrium adsorption of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) could reach 48.02 mg/g, 58.86 mg/g, and 123.39 mg/g, which is better than PG alone. The adsorption behavior and mechanism of SA@PG composites were investigated using Langmuir and Freundlich isothermal model, and the results showed monomolecular layer adsorption; thermodynamic analyses showed that the adsorption process was heat-absorbing and spontaneous.

Keywords

Phosphogypsum, Sodium Alginate, Heavy Metals, Adsorption

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着工业化和城市化的快速发展,重金属污染已成为全球性的环境问题之一。统计数据显示,我国主要河流中仅有约 32%的水域符合国家饮用水水质标准。重金属离子 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II),被频繁从地表水、地下水甚至饮用水中检测出,这类重金属具有显著的生物难降解性和毒性特征,进入水体后通过食物链循环逐步富集于生物体内,对动植物及人类健康产生不可逆的危害[1]。特别值得注意的是,Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)等典型重金属离子因分子结构稳定,在环境中可长期保持活性并实现生物富集,其毒性作用可直接损伤人体器官功能、免疫系统、神经网络及生殖系统[2]。因此,开发兼具经济性与环境友好性的重金属废水处理技术已成为当前水污染治理领域的核心研究课题。

磷石膏(PG)是湿法磷酸生产过程中产生的一种工业副产物,其主要化学成分为 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,还含有少量未反应的磷酸、氟化物、重金属离子以及有机杂质[3]。全球每年磷石膏的产量超过 2 亿吨,大部分被堆存处理,不仅占用了大量土地资源,还可能因雨水冲刷导致磷、氟和重金属离子渗入地下水,污染环境[4]。磷石膏作为一种廉价且丰富的工业副产物,在环境治理和土壤改良等方面具有良好的发展前景,通过进一步研究其结构特性、改性方法、制备可回收利用且不会造成二次污染的改性磷石膏复合材料,实现对磷石膏的资源化利用,减少环境污染并创造经济价值。改性磷石膏复合材料作为一种新型的吸附材料具有成本低、环保而且热稳定性好等优势,已经引起了广泛的关注[5]。Zhao 等[6]利用十二烷基苯磺酸钠改性磷石膏, SDBS 通过化学作用以胶束的形式吸附在 PG 表面,然后 Cu(II)由于化学和静电作用被吸附在 SDBS@PG 的阴离子 SDBS 胶束上,对 Cu(II)吸附容量可达 23.33 mg/g。Li 等[7]从磷石膏改性厌氧消化蒸馏谷物(PADC)中提取的生物炭可以有效吸附水中的铈酸盐。Ma 等[8]研究了用氧化钙(CaO)改性磷石膏(PG)制备吸附剂 m-CaO-PG,并用于从废水中吸附去除 As(V), m-CaO-PG 对 As(V)的最大吸附量为 37.75 mg/g。因此,探索吸附容量大,吸附效率高的改性磷石膏复合材料作为去除水中的重金属离子的理想吸附性能具有重要意义。

海藻酸钠(SA)作为一种天然多糖,凭借其可生物降解性、生态兼容性、无毒性、资源丰富及经济实惠等特性,已在食品工业、医疗领域、消防材料、个人护理产品及农业技术等多个行业得到广泛应用[9]。其分子结构中存在大量羟基(-OH)和羧基(-COOH)官能团,这些活性基团能够促进配位螯合作用及与金属阳离子的离子交换,在废水处理中展现出对重金属离子的高效去除性能,但该材料在复杂水环境中存在

力学强度不足,对特定金属离子的选择吸附能力较弱以及活性位点数量受限等问题[10]。因此需要通过复合改性,提升吸附剂的性能,弥补 SA 在实际应用中的局限性。刘等[11]采用混合交联法制备一种新型单宁酸复合海藻酸钠(TA/SA)微球,考察了不同反应条件下 TA/SA 吸附 U(VI)行为的影响,并进行了吸附动力学和热力学研究,探讨了 TA/SA 微球对 U(VI)的吸附机理。孙等[12]制备一种新型海藻酸钠多胺吸附剂,通过构建三维网状物的形式,将其制备成能吸附 Cu(II)的水凝胶微球。由此可见,以海藻酸钠为改性剂,采用合适的复合方法能显著提高对重金属离子的去除性能。

本文以海藻酸钠作为改性材料,以共混、交联和接枝反应改性磷石膏,成功制备海藻酸钠接枝磷石膏复合材料(SA@PG),用于水体中重金属的移除。通过优化改性剂投加量等条件筛选性能最优的吸附剂;采用各种分析表征方法(SEM、EDS、FT-IR、XRD 等)对 SA@PG 复合材料的形貌和结构进行表征;深入研究了 SA@PG 去除水中 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)重金属阳离子的吸附性能和吸附机理。

2. 实验部分

2.1. 材料与仪器

磷石膏(湖北兴发化工集团有限公司);盐酸(HCl)、氢氧化钠(NaOH)、磷酸钠(Na_3PO_4)、硫酸钠(Na_2SO_4)、碳酸钠(Na_2CO_3)、氯化钾(KCl)、氯化镁(MgCl_2)、氯化铁(FeCl_3)、海藻酸钠(SA)等(均为分析纯,国药化学试剂有限公司)。

PTX-FA210S 型电子分析天平(华志电子科技有限公司)、TAS-990 型火焰原子吸收分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)、ZQZY-88AN 型恒温振荡器(上海知楚仪器有限公司)、电热鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司)。

2.2. 复合材料的制备与表征

2.2.1. SA@PG 的制备

首先对 PG 进行预处理,水洗 PG 去除其中的可溶性杂质,然后在 50℃的烘箱中干燥,并通过 100 目筛研磨,获得预处理后的 PG 样品。称取 2 g 海藻酸钠粉末,置于 100 mL 去离子水中,用磁力搅拌器在 400 r/min 和 80℃的温度下搅拌 3 h,在上述溶液中加入 1 g 预处理后的 PG,充分搅拌,形成均匀的悬浮液。用注射泵将悬浮液缓慢均匀滴入至 1 mol/L CaCl_2 溶液中,用磁力搅拌器在 200 r/min 和 25℃的温度下搅拌 3 h,随后将产物过滤,用去离子水冲洗至中性,在烘箱中 50℃的温度下干燥 12 h,得到最终 SA@PG。

2.2.2. SA@PG 的表征

SA@PG 复合材料进行系统表征,通过扫描电子显微镜(SEM)与能谱仪(EDS)联合观测材料微观形貌及元素分布;借助 X 射线衍射(XRD)解析晶体结构特征;并结合傅里叶变换红外光谱(FT-IR)分析表面官能团化学组成。

3. 结果与讨论

3.1. SA@PG 的表征分析

图 1 为 PG 和 SA@PG 复合材料的扫描电镜图像。与图 1(a)的 PG 相比,图 1(b)中 SA@PG 形态发生了明显的变化,随着海藻酸钠的接枝,材料表面粗糙程度增加,不再呈现出光滑较为规则的菱形片状,表现出非常明显的堆叠层和褶皱片状形态,出现这一现象的原因是由于海藻酸钠成功接枝在磷石膏表面,形成了丰富的缺陷[13]。

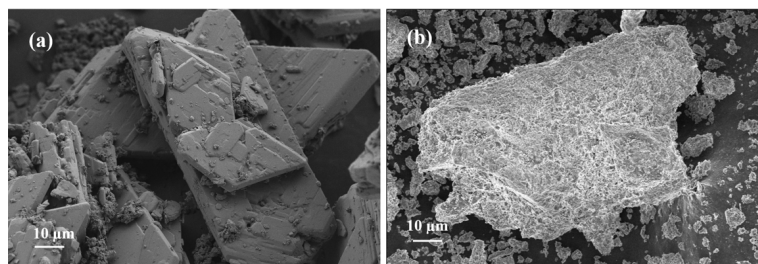


Figure 1. SEM images of PG(a) and SA@PG(b)

图 1. PG(a)和 SA@PG(b)的 SEM 图像

根据图 2(a)元素映射图确定了 SA@PG 的详细化学元素组成, 可以看到 C、O、Na 等元素呈均匀分布, EDS 能谱图 2(b)也验证了 SA 的成功修饰。

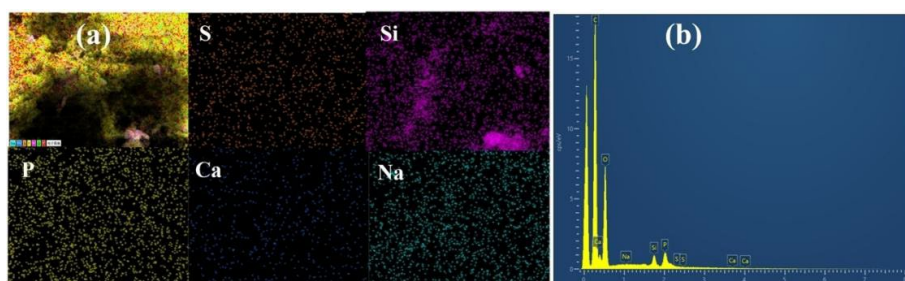


Figure 2. The element mapping diagrams(a) and EDS spectra (b) of SA@PG

图 2. SA@PG 的元素映射图(a)和能谱图(b)

从图 3(a)所示的 FT-IR 图可以看出, 在 1614 cm^{-1} 处有 O-H 的特征吸收峰[14], 海藻酸钠中羧基的振动峰位于 1624 和 1633 cm^{-1} [15]; 984 cm^{-1} 处存在属于 C-O 的振动峰[16], 3391 cm^{-1} 处存在属于 -OH 的伸缩振动峰[17], 1408 cm^{-1} 处存在属于 -COO- 的伸缩振动峰[18], 这些特征峰都说明海藻酸钠已经成功改性磷石膏, 并且复合材料 SA@PG 中含有大量官能团。

PG 和 SA@PG 复合材料的 XRD 光谱如图 3(b)所示, 根据谱图可以看出 SA@PG 的 XRD 衍射图非常平滑, 并且没有表现出尖锐和强峰, 证实了其无定形性质[19], 这是由于海藻酸钠的成功接枝, 这种特性为吸附过程提供了有利通道, 有利于吸附重金属离子。

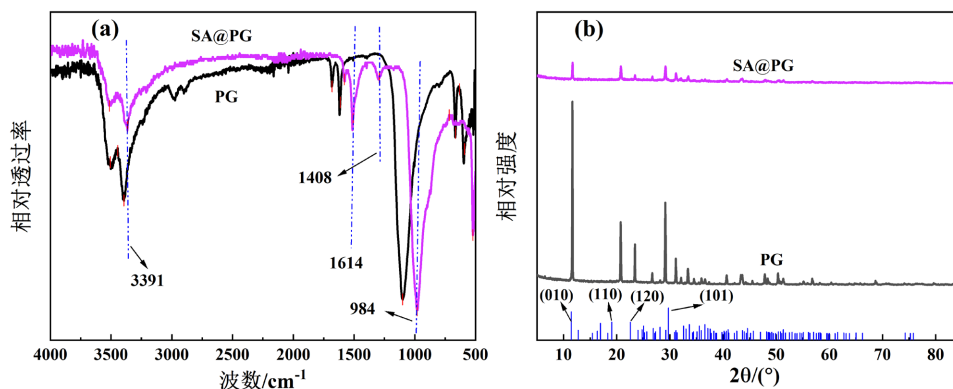


Figure 3. FT-IR spectra(a) and XRD pattern(b) of PG and SA@PG

图 3. PG 和 SA@PG 的 FT-IR 光谱图(a)和 XRD 图谱(b)

3.2. SA@PG 的制备条件优化

分别用 0、0.2、0.5、1、2 g SA 改性 1 g PG 制备复合材料, 以确定 SA 与 PG 的最佳比例。从图 4 可以看出, 未改性 PG 对 Pb(II)有一定的去除效率, 对 Cd(II)和 Cu(II)没有去除效率。当 SA 投加量为 1 g, 即复合材料制备过程中, SA 与 PG 质量比为 1:1 时, 复合材料对 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的吸附达到饱和, 用 SA 与 PG 以 1:1 的质量比制备 SA@PG 复合材料。

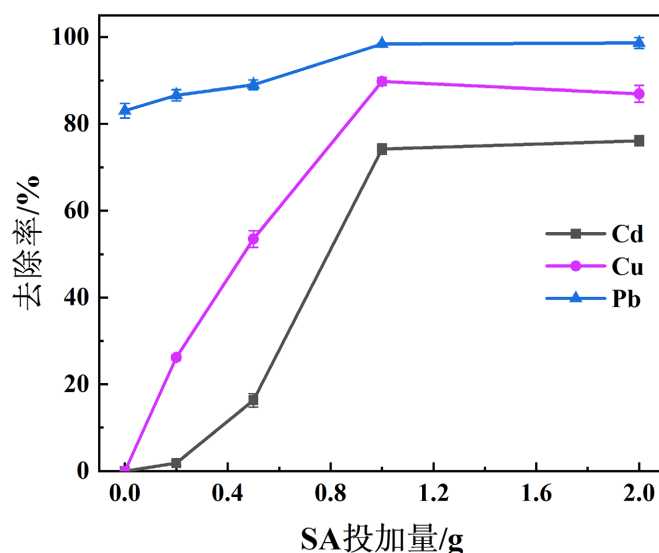


Figure 4. Effect of amount of SA modification on removal rate

图 4. SA 投加量对去除率的影响

3.3. SA@PG 复合材料去除重金属性能的影响因素研究

3.3.1. 溶液 pH

考察 pH 值分别为 2.5、3.0、4.0、5.0、5.5 时, SA@PG 对重金属吸附性能的影响, 从图 5(a)可以观察到, SA@PG 对三种重金属离子的去除率随着 pH 的升高而增大。在低 pH 环境下, 溶液中的高浓度氢离子使吸附位点质子化, 削弱了吸附材料对重金属阳离子的结合。当 pH 值升高时, 吸附材料表面的羧酸基团等官能团发生去质子化, 使材料表面电荷密度增加, 呈现更强的负电性, 所以在较高 pH 环境下, 吸附材料与重金属阳离子间的静电相互作用力增强, 从而提升了对重金属离子的吸附效率[20]。当 pH 值为 5.0 时, SA@PG 对三种重金属离子的去除率几乎达到 100%。因此, 在接下来的研究中, 三种重金属离子溶液的初始 pH 设置为 5.0。

3.3.2. 吸附时间

通过分析 0 min~240 min 内不同吸附时间对吸附效率的影响, 以确定 SA@PG 与重金属离子反应的最佳时长。如图 5(b)所示, SA@PG 对 Pb(II)的吸附效率在 30 min 内迅速提升, 达到 98.66%, 随后趋于稳定; 而对 Cu(II)和 Cd(II)的吸附过程则需更长的 210 min 才能达到平衡状态。这一差异表明该复合材料对 Pb(II)展现出更强的吸附优势。

3.3.3. SA@PG 投加量

研究了 SA@PG 在 0.25 g/L 至 1.25 g/L 浓度梯度下对 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)三种重金属离子的吸附, 如图 5(c)所示, 当投加量增至 10 mg, 即 0.5 g/L 时, Pb(II)的去除率在 30 min 达到 98.27%; 当 SA@PG

用量从 5 mg 即 0.25 g/L 增加至 20 mg 即 1 g/L 时, Cd(II)和 Cu(II)的去除率达到饱和, 这主要是由于复合材料添加量越高, 体系中提供的可直接用于作用的吸附位点越多[21]。随着复合材料用量的继续增加, 去除效率没有明显上升, 这是因为溶液中存在的重金属离子有限, 已达到吸附饱和。从经济性考虑, 选择 0.5 g/L SA@PG 作为去除 Pb(II)的最佳投加量, 选择 1 g/L SA@PG 作为去除 Cd(II)和 Cu(II)的最佳投加量。

3.3.4. 共存离子

探究阳离子(如 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+})及无机阴离子(如 Cl^{-} 、 SO_4^{2-} 、 PO_4^{3-})对吸附过程的影响具有重要意义。如图 5(d)所示, PO_4^{3-} 和 Cl^{-} 的存在使 SA@PG 对三种重金属离子的吸附有轻微影响, 去除效率的轻微降低很可能是由于带电离子占据了可用吸附位点[22] [23], 从而抑制了吸附。存在的阴离子 SO_4^{2-} 对 -OH 具有猝灭作用, 可作为非自由基途径的抑制剂, 从而影响静电吸附[24], 降低重金属离子的整体去除效率。而阳离子 Fe^{3+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 会与重金属离子竞争 SA@PG 表面吸附位点, 影响离子交换过程, 使复合材料对三种重金属离子去除率降低。

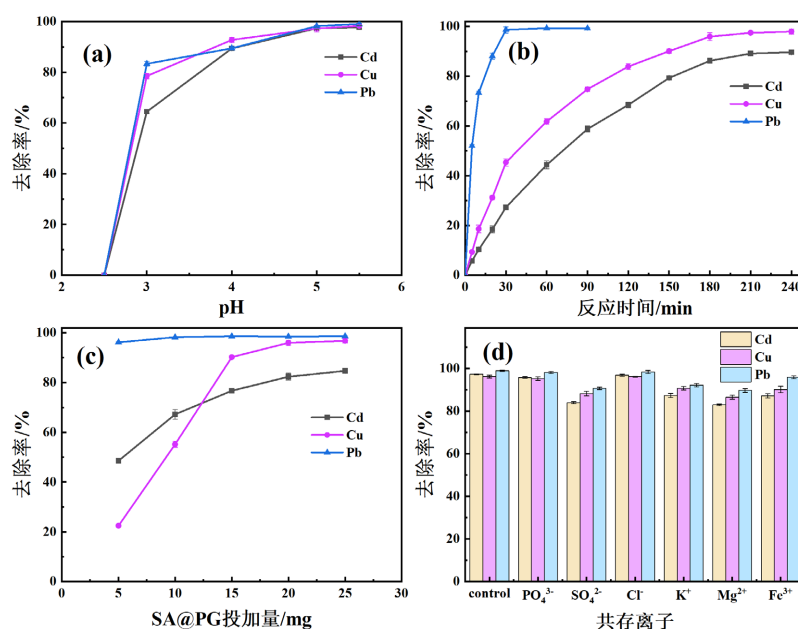


Figure 5. Effect of solution pH(a), reaction time(b), SA@PG adsorbent dosage(c), and coexisting ions(d) on removal rate
图 5. 溶液 pH(a)、反应时间(b)、SA@PG 投加量(c)和共存离子(d)对去除率的影响

3.4. SA@PG 复合材料去除 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的机理分析

3.4.1. 吸附动力学

通过吸附量随时间变化进行动力学模型拟合, 以探究 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)在吸附过程中的吸附路径及机理, 本文选用准一级动力学模型(Pseudo-first-order)与准二级动力学模型(Pseudo-second-order)对 SA@PG 复合材料的吸附行为进行研究与分析。

动力学模型拟合结果如图 6, 对应模型参数分析如表 1 所示, 准二级动力学模型计算的 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的 R^2 高于准一级的 R^2 。通过准二级动力学方程计算得出的理论吸附量与实验数据更为吻合。这一结果表明, SA@PG 复合材料对三种重金属离子的吸附更符合准二级动力学模型, 表明该吸附机制以化学吸附为主[25]。

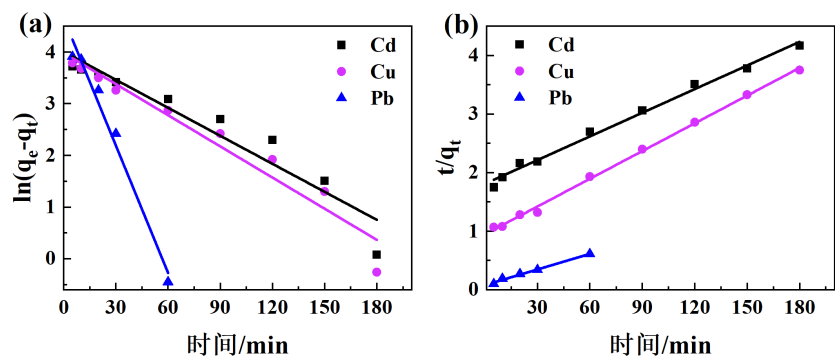


Figure 6. The fitting curves with the pseudo-first-order adsorption kinetic mode (a) and the pseudo-second-order adsorption kinetic model(b) for Cd(II), Cu(II), and Pb(II) adsorbed on SA@PG
图 6. SA@PG 吸附 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的准一级(a)和准二级(b)动力学模型

Table 1. Kinetics parameters of the pseudo-first-order and pseudo-second-order models for Cd(II), Cu(II), and Pb(II) adsorbed on SA@PG
表 1. SA@PG 吸附 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的准一级和准二级模型的动力学参数

	准一级模型			准二级模型		
	k ₁	q _e	R ²	k ₂	q _e	R ²
Cd(II)	0.0416	74.29	0.9219	0.0001	53.65	0.9925
Cu(II)	0.0463	63.33	0.9484	0.0003	54.87	0.9979
Pb(II)	0.1891	112.74	0.9803	0.0010	104.93	0.9917

3.4.2. 吸附等温线

采用吸附等温模型拟合了实验结果，拟合曲线如图 7 所示，两种模型导出的相关数据列于表 2。Langmuir 和 Freundlich 等温线均表现出较高的相关系数，表明两种模型都能描述 SA@PG 对这些重金属离子的吸附行为。但是 Langmuir 模型表现出较高的相关系数(R²)，拟合曲线更接近实验结果，所以 Langmuir 模型更准确地表示了这些离子在 SA@PG 上的等温吸附行为，表明吸附机制主要遵循单分子层吸附。而 Freundlich 模型中的 n 值作为吸附强度的表征参数，其数值大小直接影响吸附剂的吸附效能[26]。当 n 值大于 1 时，表明吸附过程更倾向于自发进行。本研究测定的 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)三种重金属离子对应的 n 值均大于 1，证实吸附过程具有自发性，展现出优异的吸附性能。

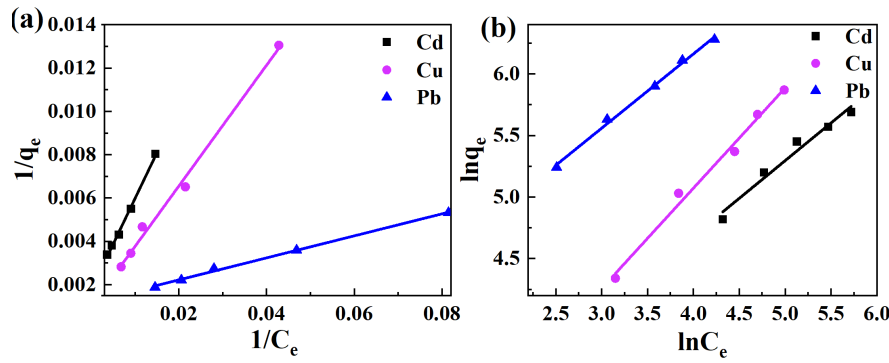


Figure 7. Isotherm curves with the Langmuir model(a) and the Freundlich model(b) for adsorption of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) on SA@PG
图 7. SA@PG 吸附 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的 Langmuir(a)和 Freundlich(b)等温线模型

Table 2. Key parameters and correlation coefficients of the adsorption isotherm model for Cd(II), Cu(II), and Pb(II) adsorption on SA@PG

表 2. SA@PG 上 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)吸附等温模型的关键参数和相关系数

	Langmuir 模型			Freundlich 模型		
	q (mg/g)	b	R ²	K _F	n	R ²
Cd(II)	56.8182	0.0417	0.9974	9.3481	1.6336	0.9717
Cu(II)	83.3333	0.0430	0.9939	6.1336	1.2277	0.9897
Pb(II)	102.1325	0.1926	0.9975	42.5389	1.6583	0.9960

3.4.3. 吸附热力学

在不同温度下, SA@PG 复合材料对 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的吸附进行分析和整合, 得到 $\ln K_d \sim 1/T$ 线性拟合曲线, 如图 8 所示, 热力学参数如表 3 所示, 随着温度从 298 K 升高到 318 K, SA@PG 对 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的吸附容量分别从 52.880、59.827 和 126.467 mg/g 增加到 59.667、64.067 和 131.547 mg/g, 说明吸附是一个吸热过程, 高温有利于三种重金属离子吸附到 SA@PG 上。这一现象是由于在高温下, 吸附质分子的动能增加, 促进了热传质, 重金属离子的迁移速度加快, 提高了其在吸附剂中的扩散速率 [27]。此外, 随着温度的升高, 吸附剂上的吸附位点也会增多 [28]。

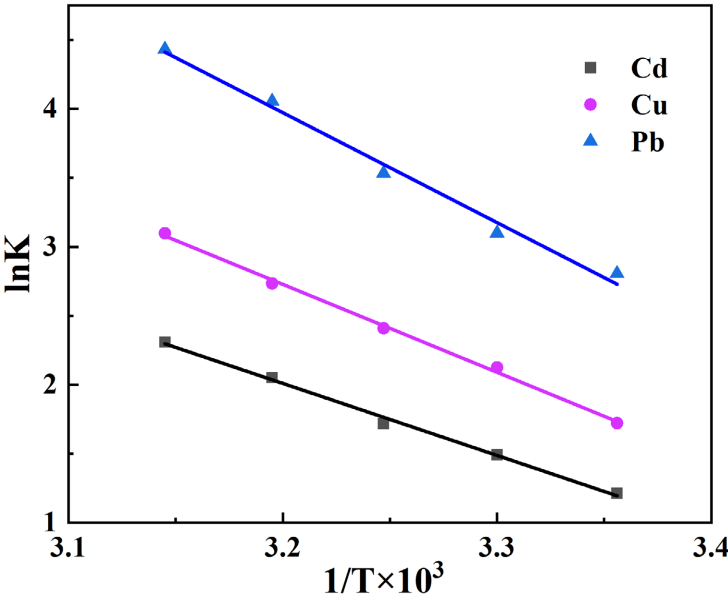


Figure 8. Linear fitting curve of $\ln K \sim 1/T$ of Cd(II), Cu(II), and Pb(II) adsorption by SA@PG
图 8. SA@PG 吸附 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的热力学模型

由表 3 热力学参数可得, SA@PG 复合材料对 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)吸附的 ΔH^0 均大于零, 说明对三种重金属离子的吸附均为吸热过程, 从而进一步说明温度的提高更有利于反应的进行。SA@PG 复合材料对 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)吸附的 ΔS^0 也均大于零, 说明复合材料对三种重金属离子吸附的过程为自发进行并且混乱度在增加。在不同温度下的吉布斯自由能 ΔG^0 均小于零, 说明 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)自发的吸附在 SA@PG 复合材料上, 并且随着温度的升高, ΔG^0 越来越小, 表明温度越高对三种重金属离子的吸附越来越容易进行。

Table 3. Thermodynamic parameters derived using K_d values
表 3. SA@PG 吸附 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II)的热力学参数

	T(K)	ΔH^0	ΔS^0	ΔG^0
		(KJ/mol)	(J/(mol·K))	(KJ/mol)
Cd(II)	298	43.41	155.63	-3.004
	303			-3.757
	308			-4.397
	313			-5.337
	318			-6.104
Cu(II)	298	50.30	192.29	-4.267
	303			-5.356
	308			-6.172
	313			-7.114
	318			-8.190
Pb(II)	298	66.28	245.12	-6.951
	303			-7.808
	308			-9.047
	313			-10.551
	318			-11.719

4. 结论

本文以 SA 和 PG 为原料，通过共混、交联和接枝反应，制备了 SA@PG 复合材料，采用一系列表征分析了 SA@PG 复合材料的形貌等特征，通过一系列实验对 SA@PG 复合材料吸附重金属的性能进行详细研究。

通过吸附动力学、吸附等温线和吸附热力学的研究，发现 SA@PG 复合材料对 Cd(II)、Cu(II)和 Pb(II) 的吸附更符合准二级动力学模型和 Langmuir 等温模型，吸附过程为单分子层的化学吸附，热力学参数 (ΔH^0 、 ΔS^0 、 ΔG^0)表明吸附均为吸热过程，吸附自发进行并且混乱度在增加。

参考文献

[1] 张晓谦. 纳米纤维/金属有机框架复合材料的制备及其吸附与催化性能研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2023.

[2] 孙晔, 华宇峰, 王镇岳. 工业废水重金属污染与健康风险评价研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2022, 43(3): 99-108.

[3] Bouargane, B., Laaboubi, K., Biyoune, M.G., Bakiz, B. and Atbir, A. (2023) Effective and Innovative Procedures to Use Phosphogypsum Waste in Different Application Domains: Review of the Environmental, Economic Challenges and Life Cycle Assessment. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, **25**, 1288-1308.
<https://doi.org/10.1007/s10163-023-01617-8>

[4] Sridhar, C.N., Thirumurugan, M., Subramani, T. and Gopinathan, P. (2025) Global Distribution and Sources of Uranium and Fluoride in Groundwater: A Comprehensive Review. *Journal of Geochemical Exploration*, **270**, Article ID: 107665.
<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2024.107665>

[5] Zhao, Z., Dong, Z., Wang, F., Wang, F. and Xia, M. (2024) Innovative Strategy of Turning Waste into Treasure: High-Efficiency Adsorption of Heavy Metals Pollutants by Modified Amorphous Calcium Phosphate Prepared with

- Phosphogypsum Waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, **12**, Article ID: 112994. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112994>
- [6] Zhao, L., Zhang, Q., Li, X., Ye, J. and Chen, J. (2020) Adsorption of Cu(II) by Phosphogypsum Modified with Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate. *Journal of Hazardous Materials*, **387**, Article ID: 121808. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121808>
 - [7] Li, L., Liao, L., Wang, B., Li, W., Liu, T., Wu, P., *et al.* (2022) Effective Sb(v) Removal from Aqueous Solution Using Phosphogypsum-Modified Biochar. *Environmental Pollution*, **301**, Article ID: 119032. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119032>
 - [8] Ma, M., Xu, X., Ha, Z., Su, Q., Lv, C., Li, J., *et al.* (2023) Deep Insight on Mechanism and Contribution of Arsenic Removal and Heavy Metals Remediation by Mechanical Activation Phosphogypsum. *Environmental Pollution*, **336**, Article ID: 122258. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122258>
 - [9] Jadach, B., Świetlik, W. and Froelich, A. (2022) Sodium Alginate as a Pharmaceutical Excipient: Novel Applications of a Well-Known Polymer. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, **111**, 1250-1261. <https://doi.org/10.1016/j.xphs.2021.12.024>
 - [10] Zhang, Y., Wang, Y., Cao, X., Xue, J., Zhang, Q., Tian, J., *et al.* (2020) Effect of Carboxyl and Hydroxyl Groups on Adsorptive Polysaccharide Fouling: A Comparative Study Based on PVDF and Graphene Oxide (GO) Modified PVDF Surfaces. *Journal of Membrane Science*, **595**, Article ID: 117514. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117514>
 - [11] 刘清, 黄健滨, 李伟凡, 等. 单宁酸复合海藻酸钠微球富集 U(VI) 的性能[J]. 工业水处理, 2025, 45(1): 58-65.
 - [12] 孙诗书, 张花红, 李邦森, 等. 海藻酸钠多胺微球对有机体系中 Cu(II) 的去除[J]. 应用化工, 2023, 52(6):1778-1784+1799.
 - [13] Tripathy, T., Kolya, H. and Jana, S. (2017) Selective Lead(II) Adsorption and Flocculation Characteristics of the Grafted Sodium Alginate: A Comparative Study. *Journal of Polymers and the Environment*, **26**, 926-937. <https://doi.org/10.1007/s10924-017-1004-7>
 - [14] Hui, Y., Liu, R., Lan, J., Li, L., Xiao, Z., Xu, A., *et al.* (2024) Sodium Alginate Based Adsorbent: Facile Fabrication, Extraordinary Removal Efficacy of Anionic Dyes and Adsorption Mechanism. *International Journal of Biological Macromolecules*, **272**, Article ID: 132842. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132842>
 - [15] Li, W., Yang, S., Wang, Y., Peng, C., Li, Y. and Tao, E. (2024) Selective Adsorption of Cu(II) on Amino-Modified Alginate-Based Aerogel: As a Catalyst for the Degradation of Organic Contaminant. *International Journal of Biological Macromolecules*, **278**, Article ID: 134700. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134700>
 - [16] Chu, Y., Khan, M.A., Xia, M., Lei, W., Wang, F. and Zhu, S. (2019) Synthesis and Mechanism of Adsorption Capacity of Modified Montmorillonite with Amino Acids for 4-Acetaminophenol Removal from Wastewaters. *Journal of Chemical & Engineering Data*, **64**, 5900-5909. <https://doi.org/10.1021/acs.jced.9b00795>
 - [17] Chmagh, A.A., Alown, F., Khan, M.A., Shafiq, A., Kumar, S., Ameen, F., *et al.* (2024) Biogenic Synthesis of *Psidium guajava*-Mediated Silver Nanoparticles: A Comprehensive Antibiofilm and Antivirulence Study. *Polymers for Advanced Technologies*, **35**, e6425. <https://doi.org/10.1002/pat.6425>
 - [18] Xue, J., Su, J., Wang, X., Zhang, R., Li, X., Li, Y., *et al.* (2024) Eco-Friendly and Efficient Extraction of Polysaccharides from *Acanthopanax senticosus* by Ultrasound-Assisted Deep Eutectic Solvent. *Molecules*, **29**, Article No. 942. <https://doi.org/10.3390/molecules29050942>
 - [19] Novakovic, D., Isomäki, A., Pleunis, B., Fraser-Miller, S.J., Peltonen, L., Laaksonen, T., *et al.* (2018) Understanding Dissolution and Crystallization with Imaging: A Surface Point of View. *Molecular Pharmaceutics*, **15**, 5361-5373. <https://doi.org/10.1021/acs.molpharmaceut.8b00840>
 - [20] Salahshoori, I., Namayandeh Jorabchi, M., Ghasemi, S., Golriz, M., Wohlrab, S. and Khonakdar, H.A. (2023) Advancements in Wastewater Treatment: A Computational Analysis of Adsorption Characteristics of Cationic Dyes Pollutants on Amide Functionalized-Mof Nanostructure MIL-53 (Al) Surfaces. *Separation and Purification Technology*, **319**, Article ID: 124081. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124081>
 - [21] Du, M., Zhang, Y., Wang, Z., Lv, M., Tang, A., Yu, Y., *et al.* (2022) Insight into the Synthesis and Adsorption Mechanism of Adsorbents for Efficient Phosphate Removal: Exploration from Synthesis to Modification. *Chemical Engineering Journal*, **442**, Article ID: 136147. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.136147>
 - [22] Wan, X., Khan, M.A., Wang, F., Xia, M., Lei, W., Zhu, S., *et al.* (2019) Facile Synthesis of Protonated G-C₃N₄ and Acid-Activated Montmorillonite Composite with Efficient Adsorption Capacity for PO₄³⁻ and Pb(II). *Chemical Engineering Research and Design*, **152**, 95-105. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.09.019>
 - [23] Shao, L., Yang, Z., Liu, Y., Xia, X., Li, S. and Yang, C. (2021) Surface Structure Tuning of BiOCl Nanosheets by the Sequential Introduction of Oxygen Vacancies, PO₄³⁻ and Ag⁺ for Boosting Photodegradation of Tetracycline Hydrochloride. *Environmental Research*, **197**, Article ID: 111056. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111056>
 - [24] Beyrath, J., Pellegrini, M., Renkema, H., Houben, L., Pecheritsyna, S., van Zandvoort, P., *et al.* (2018) KH176

- Safeguards Mitochondrial Diseased Cells from Redox Stress-Induced Cell Death by Interacting with the Thioredoxin System/Peroxiredoxin Enzyme Machinery. *Scientific Reports*, **8**, Article No. 6577. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24900-3>
- [25] Li, K., Ou, H., Zhou, D., Gong, C., Xue, H. and Li, Y. (2021) Study of the Removal of Ciprofloxacin by Zn-go@sa Aerogel Microspheres. *New Journal of Chemistry*, **45**, 3630-3639. <https://doi.org/10.1039/d0nj05639a>
- [26] Fan, L., Lu, Y., Yang, L., Huang, F. and Ouyang, X. (2019) Fabrication of Polyethylenimine-Functionalized Sodium Alginate/Cellulose Nanocrystal/Polyvinyl Alcohol Core-Shell Microspheres ((PVA/SA/CNC)@PEI) for Diclofenac Sodium Adsorption. *Journal of Colloid and Interface Science*, **554**, 48-58. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2019.06.099>
- [27] Malamis, S. and Katsou, E. (2013) A Review on Zinc and Nickel Adsorption on Natural and Modified Zeolite, Bentonite and Vermiculite: Examination of Process Parameters, Kinetics and Isotherms. *Journal of Hazardous Materials*, **252**, 428-461. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.024>
- [28] Chen, H., Zhao, J., Zhong, A. and Jin, Y. (2011) Removal Capacity and Adsorption Mechanism of Heat-Treated Palygorskite Clay for Methylene Blue. *Chemical Engineering Journal*, **174**, 143-150. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.08.062>