



## 改性褐煤吸附土壤中重金属铅和镉的实验

褚海艳<sup>1</sup>, 高叶玲<sup>1</sup>, 张伟<sup>1</sup>, 王巍<sup>2</sup>, 许端平<sup>3</sup>

(1. 鄂尔多斯生态环境职业学院, 内蒙古 鄂尔多斯 017010; 2. 国能神东煤炭技术研究院, 陕西 榆林 719315; 3. 辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 该论文以揭示改性褐煤对土壤中重金属  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附效果及解析机制为目的。研究方法: 对比褐煤磺化前后微观结构的形貌变化; 设计 4 个单因素梯度变量 (pH 值、褐煤投加量、吸附时间、吸附温度) 开展磺化前后的吸附对比实验; 测定不同 pH 值梯度下改性褐煤对土壤  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的解吸效应。结果显示: 改性前后褐煤比表面积由  $165\text{ m}^2/\text{g}$  上升至  $784\text{ m}^2/\text{g}$ ; 改性褐煤对  $Pb^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  吸附率与溶液的 pH 值、褐煤投加量、吸附时间、吸附温度均呈正相关; 改性褐煤投放量为 6% 时单位质量吸附剂的去除率达到最大; 吸附时间在 120 min 时达到吸附平衡; 当 pH 值为 11 时, 改性褐煤对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的解吸量较低, 且吸附有较高的稳定性。因此, 改性褐煤较改性前对土壤重金属铅和镉吸附效率提高, 可作为土壤重金属污染治理的添加材料。

**关键词:** 改性褐煤; 吸附; 土壤重金属; 铅; 镉

doi:10.12476/kczhly.202211210732

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 05-0176-06

**引用格式:** 褚海艳, 高叶玲, 张伟, 等. 改性褐煤吸附土壤中重金属铅和镉的实验[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(5): 176-181+189.

CHU Haiyan, GAO Yeling, ZHANG Wei, et al. Adsorption of heavy metals lead and cadmium in soil by modified lignite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(5): 176-181+189.

内蒙古矿产资源富集, 现有已探明的 134 种矿产占全国已发现矿种的 78%, 查明有一定资源储量的矿产 87 种, 占全国已查明资源储量矿产的 50%, 并有 28 种矿产保有资源储量居全国前 3 位, 丰富的矿产资源为地区经济发展创造了基础条件, 矿业已成为自治区经济发展的支柱产业<sup>[1]</sup>。然而大规模工业采矿带来巨大经济效益的同时, 不可避免地导致了严重的生态破坏与污染, 矿区及周围土壤重金属污染尤为突出<sup>[2]</sup>, 大约 10% 受重金属污染的农用地土壤位于矿区<sup>[3]</sup>。农用地土壤污染不仅导致粮食减产, 影响国家粮食安全, 而且农作物重金属超标问题也影响着人体健康。其中重金属铅和镉是重金属污染物中毒性和危害性较大的元素<sup>[4]</sup>, 为研究改性褐煤对土壤中重金属的稳定

固化作用, 实验选用铅和镉作为吸附质。

目前, 在控制好重金属污染物随意排放的前提下, 将污染防治与土壤修复结合起来, 同时采取适当手段治理并修复土壤重金属污染是当前众多学者研究的重点。投放土壤改良剂一方面可以有效稳定固化重金属离子, 同时治理费用低廉, 可以满足大规模应用<sup>[5]</sup>。常用的吸附材料有生物炭、纳米材料、硅藻土、活性炭以及褐煤腐殖酸等<sup>[6-7]</sup>。褐煤在内蒙古的煤炭探明储量中占 45%, 目前, 燃烧发电是褐煤的主要应用手段, 但是由于褐煤含水量高、热值较低、易风化、易自燃, 不利于贮存和长距离运输以及热效率较低, 温室气体的释放量很大, 使其作为燃料利用受到限制, 难以大规模开发利用<sup>[8]</sup>。但是由于褐煤密度

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 2020 年内蒙古自治区高等学校科学研究项目 (NJZY20209)

作者简介: 褚海艳 (1986-), 女, 副教授, 主要研究方向为工业水污染治理及土壤修复。

低、比表面积大，富含腐植酸，具有-CHO，-OH，-COOH，-C=O等活性基团，这些基团可以络合或螯合重金属离子铅、镉、铜、铬、锰、铀等，减少重金属离子在土壤中的迁移<sup>[9]</sup>。同时腐植酸中的亲水性基团可以凝聚土壤钙离子，促进土壤团聚体形成调节土壤水肥气热状况。腐植酸能够增加土壤自生固氮微生物数量，改善根际土壤环境<sup>[10]</sup>。另据报道，腐植酸具有保持土壤氮、钾素、促进磷释放的功效，提高肥料利用效率<sup>[11]</sup>。基于褐煤腐植酸的以上特点，将褐煤用于重金属污染土壤治理，预计会取得较好效果。如对褐煤进行烘干及粉碎处理，可以明显提高褐煤比表面积从而提高吸附力。随着褐煤粉碎度的提高，其表面积和孔隙度增加，表面吸附位点也随之增多，褐煤的吸附能力亦有所提高。在粉碎的基础上应用化学试剂对褐煤进行化学改性，能进一步增加褐煤活性基团的量，改善其表面化学性能，提高吸附能力，进而制备高效、廉价的吸附重金属褐煤基改性材料。因此，将改性褐煤作为吸附材料用于重金属修复方面可以达到以废治废的经济效益和社会效益。刘建华等将褐煤经硫酸磺化反应后，将磺酸基-SO<sub>3</sub>H引入煤的缩合芳香环和脂肪侧链中得到磺化褐煤（SBC），在水处理领域逐渐得以应用。罗道成等研究表明，磺化后的褐煤其吸附性能明显提高，可以用其吸附含重金属的废水。

## 1 材料与方法

### 1.1 主要仪器及材料

原子吸收分光光度计，SHA-B 数显恒温水浴振荡器，LG165B 理化干燥箱，电子分析天平，MT-500 数字 pH 计，V-Sorp X800 全自动比表面积测试仪，Nova Nano SEM450 扫描电镜（SEM），Nicolet6700 傅立叶红外光谱仪（FTIR）等。实验所用浓硫酸，盐酸，硝酸，氢氟酸，高氯酸，磷酸氢二铵均为优级纯。

### 1.2 褐煤改性方法

褐煤取自神东煤炭集团（鄂尔多斯），主要成分：水分 2.4%，干燥基灰分 11.6%，干燥无灰基及挥发分 62.8%，腐植酸含量为 69.1%，表观密度为 1.13%，比表面积为 165 m<sup>2</sup>/g，孔径为 6.567 9 nm，0.014 2 cm<sup>3</sup>/g。磺化方法：浓硫酸质量分数大于

98% 以质量比 4:1 的比例加入 180~380 μm 粒度的褐煤，混合后置于回流烧瓶中，电热套加热 3 h，温度设定为 135 ℃，完毕后置于室温放置 12 h，液固分离，固体料用蒸馏水洗至中性，自然晾干后置于干燥器中备用<sup>[12]</sup>。

将改性褐煤样本自然风干过 0.85 mm 筛，并置于 4 ℃ 下干燥保存备用。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 不同因素下的重金属吸附实验设计

自然风干改性褐煤和土壤样品，分别过 0.85 mm 筛，按褐煤添加量 0%、1%、2%、4%、6% 配制混合样本 500 g，置于 4 ℃ 保存备用。

##### （1）不同 pH 值下吸附 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>

配制 0.01 mol/L NaNO<sub>3</sub> 支持电解质，用 0.01 mol/L NaNO<sub>3</sub> 溶液配制 5 mg/kg Pb<sup>2+</sup>、10 mg/kg Cd<sup>2+</sup> 重金属混合液。调节 pH 值呈 3、5、7、9、11 的梯度重金属混合液。称取 5 份褐煤添加量为 6% 的混合样本 1 g 分别放置 50 mL 塑料管，依次加入以上 pH 值梯度的 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 混合液 30 mL，25 ℃，120 r/min 震荡 2 h，静置 48 h 后，10 000 r/min 离心 5 min，取上清液测定 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 浓度，残渣用于解析实验。

##### （2）不同褐煤投加量吸附 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>

分别称取改性褐煤添加量 0、1%、2%、4%、6% 配制混合样本 50 mL 塑料管，加入 pH 值为 7 的 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 混合液 30 mL，于 25 ℃、120 r/min 下震荡 2 h，静置 24 h 后，10 000 r/min 离心 5 min，取上清液测定 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 浓度。

##### （3）不同时间吸附 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>

称取褐煤添加量为 6% 的混合样品放置于 50 mL 塑料管，加入 pH 值为 7 的 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 混合液 30 mL，25 ℃，120 r/min 震荡 2 h，于 30、50、120、140、160、180、200 min 后离心取上清液测定 Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup> 浓度。

##### （4）不同温度下吸附 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>

称取 7 份褐煤添加量为 6% 的混合样品放置于 50 mL 塑料管中，加入 pH 值为 7 的 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 混合液 30 mL，25 ℃，120 r/min 震荡 2 h，分别置于温度梯度为 20、25、30、35、40、45、50 ℃ 的环境中，静置 24 h 后，1 000 r/min 离心 5 min，取上清液测定 Pb<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 浓度。

以上各处理取三次重复，并设置对照组，即

未磺化褐煤组。土壤溶液中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  含量测定均采用国标法（文件号：NY/T 1613—2008）。单位质量土壤颗粒的吸附量来表征改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附能力，计算公式为：

$$S = W(C_0 - C_f)/m \quad (1)$$

$S$ -土壤的吸附量；

$W$ -溶液体积 30 mL；

$C_0$ -土壤溶液中  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的起始浓度（5  $\mu\text{g/mL}$   $\text{Pb}^{2+}$ 、10  $\mu\text{g/mL}$   $\text{Cd}^{2+}$ ）；

$C_f$ -各不同因素处理后土壤溶液  $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  的平衡浓度， $\mu\text{g/mL}$ 。

### 1.3.2 改性褐煤吸附重金属的解吸实验设计

土壤材料为吸附实验所剩的残渣。配置 pH 值为 3、5、7、9、11 的 0.01 mol/L 的  $\text{NaNO}_3$  作为支持电解质，各取 30 mL 对应加入 pH 值吸附实验剩余残渣中，恒温 25  $^{\circ}\text{C}$ ，1 000 r/min 振荡 2 h，静置 24 h 解吸，10 000 r/min 离心 5 min，抽取上清液，加入 1 滴浓  $\text{HNO}_3$  摇匀，测定  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的浓度<sup>[13]</sup>。

解吸量是解吸实验后，从单位质量土样上解吸到溶液中的  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  含量，计算公式为：

$$S = WC/m \quad (2)$$

$S$  为土壤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的解吸量，mg/kg；

$W$  为溶液体积，mL；

$C$  为土壤溶液中  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的平衡浓度，mg/L；

$m$  为土样重量，g。

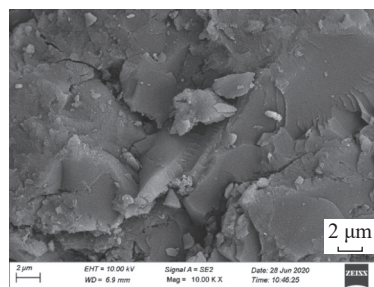
## 2 结果与分析

### 2.1 褐煤磺化前后微观形貌变化

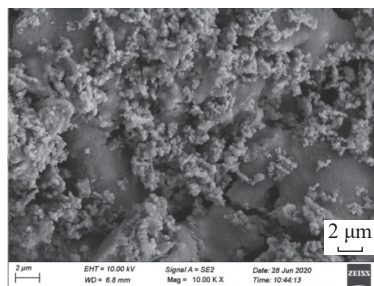
磺化褐煤磺化前后微观形貌 SEM 扫描电镜图像见图 1，褐煤磺化后疏松多孔，表面积增大。根据比表面积测试结果，磺化褐煤比表面积磺化前后由 165  $\text{m}^2/\text{g}$  上升至 784  $\text{m}^2/\text{g}$ ，增大了比表面积，有利于吸附。磺化后的褐煤红外光谱（图 2）显示 -OH 特征峰由磺化前的 3 443  $\text{cm}^{-1}$  处偏移到 3 439  $\text{cm}^{-1}$  处，并分别在 1 119  $\text{cm}^{-1}$  和 1 270  $\text{cm}^{-1}$  处出现了 - $\text{SO}_3\text{H}$  的特征峰，说明磺化作用成功地引入了磺化基团，生成了磺化褐煤<sup>[14]</sup>。

### 2.2 溶液 pH 值对改性褐煤吸附 $\text{Pb}^{2+}$ 和 $\text{Cd}^{2+}$ 效果的影响

图 3 为不同 pH 值对褐煤及改性褐煤吸附

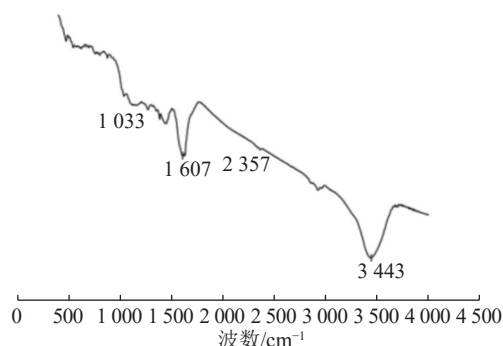


(a) 褐煤磺化前

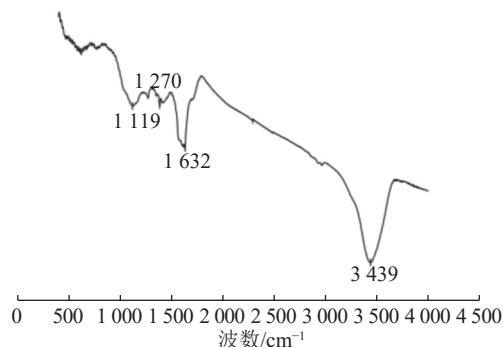


(b) 褐煤磺化后

图 1 磺化前后褐煤显微结构 (SEM)  
Fig.1 Microstructure of lignite before and after sulfonation (SEM)



(a) 褐煤磺化前



(b) 褐煤磺化后

图 2 磺化褐煤前后红外光谱 (FTIR)  
Fig.2 FTIR of lignite before and after sulfonation

$\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  效果的影响。结果为改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  吸附率都是随着溶液初始 pH 值的增大而增加，当溶液 pH 值由 3 增加至 11 时， $\text{Pb}^{2+}$  的吸附率由 93.6% 增加至 98.5%， $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率由



90.0% 增加至 96.4%，对比可见，改性后的褐煤对  $Pb^{2+}$  的吸附去除率由 80.4% 提升到 98.6%，对  $Cd^{2+}$  的吸附去除率由 76.6% 提升到 97.1%。结果表明，溶液的 pH 值对改性褐煤吸附  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的影响很大， $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的去除率均随 pH 值的增大而增加。究其原因，改性褐煤由于表面含有大量羟基，醇羟基及氨基等活性基团，为其吸附  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  提供大量的吸附点位<sup>[15]</sup>，同时溶液 pH 值在 2.5~7.5 范围内，改性褐煤表面总电荷为负值，电负性也随着 pH 值增大而越发明显，改性褐煤表面的负电荷越多，对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附效果就越好，因此会出现随着 pH 值增大，吸附率也逐渐增大的现象<sup>[16-17]</sup>。

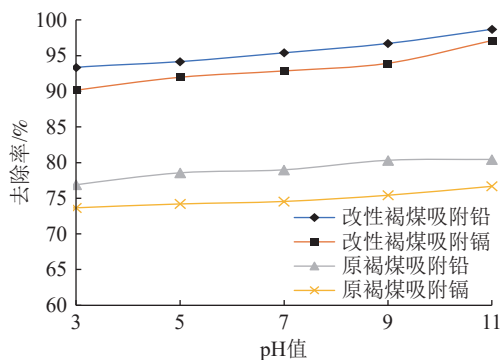


图3 溶液 pH 值对褐煤及改性褐煤吸附  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的影响

Fig.3 Effect of solution pH value on adsorption of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  by lignite and modified lignite

### 2.3 投加量对改性褐煤吸附 $Pb^{2+}$ 和 $Cd^{2+}$ 效果的影响

改性褐煤用量是一个非常重要的指标，与  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的去除效率和投入成本有很大的关系。图 4 为褐煤及改性褐煤在不同用量下对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  吸附效果的影响情况，改性褐煤对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的较佳吸附用量分别为 6% 左右。当  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  初始浓度一定时，随着改性褐煤投加量的增加，对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附率逐渐增大，当改性褐煤用量由 0 增加至 6% 时， $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附率由 10.04%、9.71% 增加至 98.99%、98.91%。对比可知，改性后的褐煤对  $Pb^{2+}$  的吸附去除率由 54.5% 提升到 99.1%，对  $Cd^{2+}$  的吸附去除率由 49.8% 提升到 98.9%。究其原因，改性褐煤由于含有大量的化学基团，对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  都具有很强的化学吸附能力<sup>[18-19]</sup>。当投加量较低时， $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  占据了褐煤表面的吸附点位，随着褐煤投加量

的增多， $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附率随褐煤投加量增多而增大，但是随着褐煤的持续增加，容易导致吸附剂发生聚合，导致吸附剂表面积减小，单位质量吸附剂上面  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附率会下降。

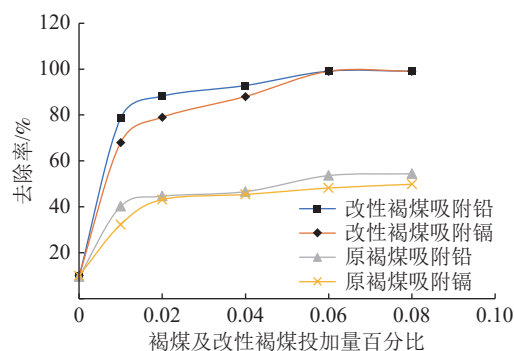


图4 投加量对褐煤及改性褐煤吸附  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  效果的影响

Fig.4 Effect of lignite and modified lignite dosage on adsorption of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$

### 2.4 吸附时间对改性褐煤吸附 $Pb^{2+}$ 和 $Cd^{2+}$ 效果的影响

图 5 为褐煤及改性褐煤吸附  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  受吸附时间影响效果。实验结果表明，改性褐煤对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附率随时间增加而增大， $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附量由 0 增加至 6 mg/g 左右，并且都在 120 min 时吸附达到了动态平衡。对比可见，改性后的褐煤对  $Pb^{2+}$  的吸附量由 3.56 mg/g 提升到 6.25 mg/g，对  $Cd^{2+}$  的吸附量由 3.23 mg/g 提升到 5.98 mg/g。

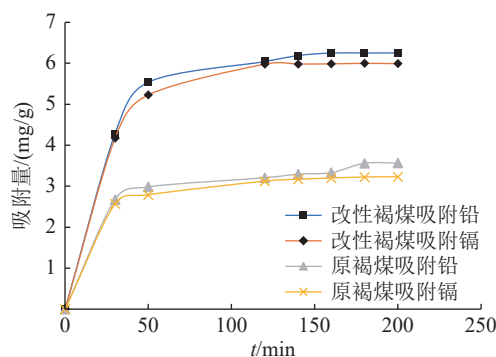


图5 吸附时间对褐煤及改性褐煤吸附  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  效果的影响

Fig.5 Effect of adsorption time on adsorption of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  by lignite and modified lignite

### 2.5 温度对改性褐煤吸附 $Pb^{2+}$ 和 $Cd^{2+}$ 效果的影响

图 6 为温度对褐煤及改性褐煤对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  吸附效果的影响情况。实验结果表明，改性褐煤对  $Pb^{2+}$  和  $Cd^{2+}$  的吸附率随温度升高逐渐增大。

当吸附温度由 20 ℃ 增加至 55 ℃ 时,  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率分别由 73.39%、35.64% 增加至 95.59%、95.97%。溶液初始温度对改性褐煤吸附  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的效果有显著影响, 吸附率随温度增加而增加。究其原因, 该反应过程为吸热过程, 溶液温度越高, 溶液中离子活化能越大, 参与化学反应的离子含量占比越高, 反应进行速度越快, 吸附效果越好<sup>[20]</sup>。

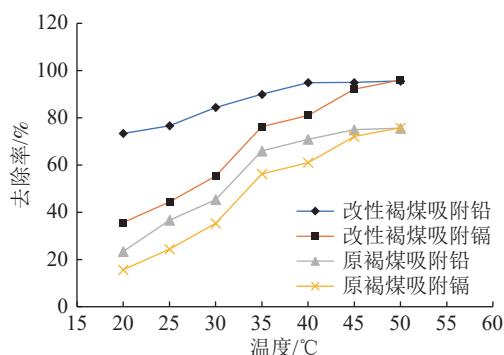


图 6 温度对褐煤及改性褐煤吸附  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  效果的影响  
Fig.6 Effect of temperature on adsorption of  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  by lignite and modified lignite

## 2.6 溶液 pH 值对改性褐煤吸附重金属 $\text{Pb}^{2+}$ 和 $\text{Cd}^{2+}$ 解吸量的影响

由图 7 可知, 随着 pH 值升高改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的解吸量均呈下降趋势, 当 pH 值为 11 时,  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的解吸量较低。改性褐煤中带负电荷的多种含氧功能团能够吸附周围的阳离子, 随着土壤环境 pH 值的变化, 功能团的电性及电荷量发生改变, 从而影响了改性褐煤对重金属的吸附与解吸量<sup>[18]</sup>。原因在于土样中的改性褐煤能够吸附  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  产生配位、离子交换等作用, 使  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  由离子态转化为稳定的有机结

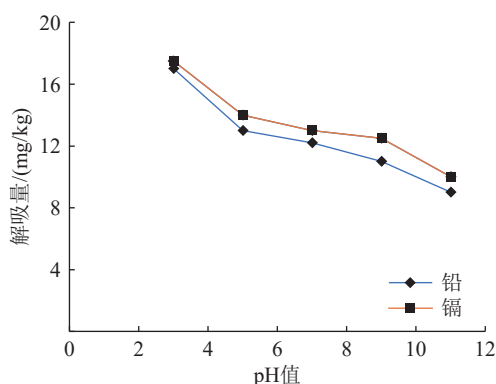


图 7 溶液 pH 值对改性褐煤吸附重金属  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  解吸量的影响  
Fig.7 Effect of solution pH value on adsorption of heavy metals  $\text{Pb}^{2+}$  and  $\text{Cd}^{2+}$  by modified lignite

合态。土壤 pH 值由酸性递增至碱性, 改性褐煤的含氧功能团所带的负电荷量逐渐增加, 对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的解吸量及吸附稳定性增加, 所以当 pH 值为 11 时,  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的解吸量呈较低水平。解吸实验进一步验证了改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附具有较高的稳定性, 且 pH 值越高, 稳定性越好。

## 3 结 论

(1) 改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  吸附率都是随着溶液 pH 值的增大而增加。当溶液 pH 值由 3 增加至 11 时,  $\text{Pb}^{2+}$  的吸附率由 93.6% 增加至 98.5%,  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率由 90.0% 增加至 96.4%。

(2) 当  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  初始浓度一定时, 随着改性褐煤投加量的增加, 对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率逐渐增大, 当改性褐煤用量由 0 增加至 6% 时,  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率由 10.04%、9.71% 增加至 98.99%、98.91%, 褐煤投放量为 6% 左右, 单位质量吸附剂的去除率达到极大值。

(3) 改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率随时间增加而增大,  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附量由 0 增加至 6 mg/g, 并且都在 120 min 时吸附达到了动态平衡。

(4) 改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率随温度升高逐渐增大。当吸附温度由 20 ℃ 增加至 55 ℃ 时,  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附率分别由 73.39%、35.64% 增加至 95.59%、95.90%。溶液初始温度对改性褐煤吸附  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的效果有显著影响, 吸附率随温度增加而增加。

(5) 随着 pH 值升高, 改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的解吸量均呈下降趋势, 进一步验证了改性褐煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附有良好的稳定性, 高 pH 值有利于稳定重金属、阻止重金属在土壤中的迁移。

(6) 不同变量下, 改性后的褐煤比原煤对  $\text{Pb}^{2+}$  和  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附去除率都有很大的提升。

## 参考文献:

- [1] 王姝琼, 王婉琼. 对内蒙古矿产资源开发利用的探讨[J]. 西部资源, 2014(4):102-104.  
WANG S Q, WANG W Q. Discussion on exploitation and utilization of mineral resources in Inner Mongolia[J]. Western Resources, 2014(4):102-104.
- [2] 罗妍, 黄艺, 余大明, 等. 东北典型煤矿区重金属环境评价与分析[J]. 矿产综合利用, 2021(4):50-58.  
LUO Y, HUANG Y, YU D M, et al. Environmental assessment of heavy metals in typical coal mining areas in Northeast

- China[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):50-58.
- [3] 何振嘉,罗林涛,杜宜春,等. 碳中和背景下矿区生态修复减排增汇实现对策[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):9-14.
- HE Z J, LUO L T, DU Y C, et al. Countermeasures to realize ecological restoration and emission reduction and increase of sinks in mining areas under the background of carbon neutrality[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):9-14.
- [4] SHIKANG WU, DANXING YANG, YAOYU ZHOU, et al. Simultaneous degradation of p-arsanilic acid and inorganic arsenic removal using M-rGO/PS Fenton-like system under neutral conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 399:123032-123032.
- [5] 李杰锋. 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.
- 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] 闫英师,李玉凤,赵礼兵. 改性钢渣吸附重金属离子的研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2021(1):8-13.
- YAN Y S, LI Y F, ZHAO L B. Research status of heavy metal ions adsorption by modified steel slag[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):8-13.
- [7] 骆欣,刘瑞森,徐东耀,等. 热改性粉煤灰对水中铜的动态吸附研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(3):137-142.
- LUO X, LIU R S, XU D Y, et al. Study on dynamic adsorption of copper in water by thermally modified fly ash[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(3):137-142.
- [8] 李国娟,曹洪杨. 褐煤中伴生低品位锗资源化利用研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2021(2):52-57.
- LI G J, CAO H Y. Research process in resource utilization of associated low-grade germanium in lignite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(2):52-57.
- [9] 暴秀丽. 改性褐煤对重金属的吸附及机理研究[D]. 郑州:河南农业大学,2018.
- BAO X L. Study on adsorption and mechanism of heavy metals on modified lignite[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2018.
- [10] 赵珂. 改性褐煤对石灰性土壤重金属形态转化的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2015.
- ZHAO K. Effect of modified lignite on heavy metal speciation in calcareous soil[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2015.
- [11] 马斌,刘景辉,张兴隆. 褐煤腐殖酸对旱作燕麦土壤微生物量碳、氮、磷含量及土壤酶活性的影响[J]. *作物杂志*, 2015(5):134-140.
- MA B, LIU J H, ZHANG X L. Effects of lignite humic acid on soil microbial biomass C, N, P and soil enzyme activities of OAT in upland soil[J]. *Crop Magazine*, 2015(5):134-140.
- [12] 吴红运,高丽娟,杨小莹,等. 褐煤腐植酸磺化改性工艺及表征[J]. *洁净煤技术*, 2014, 20(6):42-45.
- WU H Y, GAO L J, YANG X Y, et al. Sulfonation and characterization of lignite humic acid[J]. *Clean Coal Technology*, 2014, 20(6):42-45.
- [13] 单瑞娟,黄占斌,柯超,等. 腐植酸对土壤重金属镉的淋溶效果及吸附解吸机制研究[J]. *腐植酸*, 2015(1):12-17.
- SHAN R J, HUANG Z B, KE C, et al. Leaching effect of humic acid on heavy metal cadmium in soil and its adsorption-desorption mechanism[J]. *Humic Acid*, 2015(1):12-17.
- [14] Puglisi Edoardo, Pascasio Silvia, Suci Nicoleta, et al. Rhizosphere microbial diversity as influenced by humic substance amendments and chemical composition of rhizodeposits[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 129:82-94.
- [15] Xu Yijun, Rosa Arrigo, Liu Xi, et al. Characterization and use of functionalized carbon nanotubes for the adsorption of heavy metal anions[J]. *New Carbon Materials*, 2011, 26(1):57-62.
- [16] 张嘉勇,关联合,张新双,等. 水灰比和粉煤灰对静态破碎剂反应温度影响研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(1):173-176.
- ZHANG J Y, GUAN L H, ZHUANG X S, et al. Effect of water-cement ratio and fly ash on reaction temperature of static expansive agent[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(1):173-176.
- [17] 余贵芬,吴泓涛. 镉铅在粘土上的吸附及受腐植酸的影响[J]. *环境科学*, 2002, 23(5):109-112.
- YU G F, WU H T. The adsorption of cadmium and lead on clay and the effect of humic acid[J]. *Environmental Science*, 2002, 23(5):109-112.
- [18] 李光林,魏世强. 镉在腐植酸上的吸附与解吸特征研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(1):34-37.
- LI G L, WEI S Q. Adsorption and desorption of cadmium on humic acid[J]. *Journal of the Environmental Science*, 2003, 22(1):34-37.
- [19] 刘保峰. 土壤腐植酸及其对重金属化学与生物行为的影响[C]. 全国耕地土壤污染监测与评价技术研讨会论文集, 2006.
- LIU B F. Soil humic acid and its effects on chemical and biological behaviors of heavy metals[C]. Proceedings of the national symposium on monitoring and assessment of soil pollution in arable land, 2006.
- [20] ARIAS M, BARRAL M T, MEJUTO J C. Enhancement of copper and cadmium adsorption on kaolin by the presence of humic acids[J]. *Chemosphere*, 2002, 48(10):1081-1088.

MENG Y J, FAN L P, CHEN J, et al. Microscopic characteristics and properties of powder-modified asphalt for

waste batteries[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10):34-44.

## Mechanical Properties of Gangue-steel Slag-ore Powder Mixture

MENG Wenqing<sup>1</sup>, WU Yitong<sup>1</sup>, ZHANG Yapeng<sup>1</sup>, LIU Jintang<sup>2</sup>, CUI Hanlong<sup>1</sup>

(1.Faculty of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2.Handan Iron and Steel Group Co., Ltd., Handan, Hebei 056038, China)

**Abstract:** In order to explore the mechanical properties of the coal gangue-steel slag-ore powder mixture without alkali initiator, the solid waste materials coal gangue, steel slag and mineral powder produced in Handan Area were taken as the research objects, and the mechanical properties of the mixture were studied, and the test showed that the mixture had good mechanical properties and high engineering application value. The regression analysis model is established by Minitab to obtain the relative content and the regression equation between the admixtures, which can effectively reveal the relationship between the target strength value and the relative adhesion, and can provide the mixture ratio according to the actual project. XRD and SEM test methods were used to analyze the strength formation mechanism of the mixture in the alkali-free stimulant environment, and the phase composition and microstructure of the sample were analyzed and studied, and the results showed that the three admixtures of the mixture could generate a large number of overlapped and densely structured gel materials, so that the mixture had good mechanical properties.

**Keywords:** gangue mixture; mechanical properties; durability performance; regression analysis; microstructure

////////////////////////////////////  
(上接第 181 页)

## Adsorption of Heavy Metals Lead and Cadmium in Soil by Modified Lignite

CHU Haiyan<sup>1</sup>, GAO Yeling<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, XU Duanping<sup>3</sup>

(1.Ordos Ecological Environment Career Academy, Ordos, Inner Mongolia 017010, China; 2.Technical Research Institute of CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Yulin, Shaanxi 719315, China; 3.College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Engineering Technology University, Fuxin, Liaoning 123000, China)

**Abstract:** In this paper, the adsorption and resolution mechanism of heavy metals  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  by modified lignite were studied. Methods: Four single-factor gradient variables (pH value, amount of lignite, adsorption time, adsorption temperature) were designed to carry out the adsorption contrast test before and after the sulfonation. The desorption effects of modified lignite on  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  in soil were measured at different pH value gradients. The results showed that the specific surface area of lignite increased from 165  $m^2/g$  to 784  $m^2/g$ , and the adsorption rate of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  on modified lignite was positively correlated with pH value of solution, addition of lignite, adsorption time and adsorption temperature. The adsorption equilibrium was reached at 120 min when the dosage of modified lignite was 6%, and the desorption of  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  was the lowest when pH value was 11, and the adsorption has high stability. Conclusions: the adsorption efficiency of modified lignite on heavy metals  $Pb^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  in soil is higher than that before modification, and it can be used as an additive material for the treatment of heavy metal pollution in soil.

**Keywords:** modified lignite; adsorption; heavy metals in soil; lead; cadmium