

# 不同环境条件下粉煤灰吸附铅离子效率对比研究

郑曼迪<sup>1,2</sup>, 熊黑钢<sup>3</sup>, 伊元荣<sup>1</sup>

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046;

2.教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3.北京联合大学 应用文理学院城市系, 北京 100083)

**摘要:**以粉煤灰为吸附材料,利用硝酸铅试剂模拟含铅离子废水,探讨了吸附时间、pH、温度、投灰量、离子浓度 5 个因素对粉煤灰吸附铅离子效率的影响,并拟合出不同条件下的最佳吸附模型.单因素分析结果表明,当实验条件分别为吸附时间 90 min、pH=6.0、温度 50 °C、投灰量 5.0 g、离子浓度 30 mg/L 时吸附效果最好,吸附效率均超过 98%.吸附时间、pH 值、投灰量 3 种影响因子所建立的粉煤灰吸附铅离子方程均以二次多项式表示为最佳,回归系数  $R^2$  均超过 0.83,而温度和离子浓度所建立的方程中,前者以三次多项式精度最高, $R^2$  可达 0.86;后者则以对数形式拟合最好, $R^2$  为 0.93.实验中拟合粉煤灰吸附铅离子过程 Langmuir 模型的  $R^2$  比 Freundlich 模型的  $R^2$  大 0.602,所以其更适用于 Langmuir 单分子层吸附模型.

**关键词:**粉煤灰;吸附率;铅;吸附方程

**中图分类号:**X705

**文献标志码:**A

近年来,由于各种工业(如采矿、冶炼、电镀等)废水和固体废弃物的渗出液直接排入水体,使其重金属含量较高,致使我国重特大重金属污染事件时有发生,其中,以铅污染尤为突出.冶炼、五金、机械、涂料和电镀等工业大量排放的重金属  $Pb^{2+}$ ,对人体健康及生态系统危害极大<sup>[1]</sup>.由于进入水体中的重金属会随着食物链传递而在生物体内积累,从而破坏生物的正常代谢与功能,最终对水生态系统以及人类健康造成危害<sup>[2-3]</sup>.粉煤灰是一种粒径从 0.5~300  $\mu m$  的粒状材料,粒径分布不同,其化学性质、矿物学、活性差别较大<sup>[4]</sup>.随着电力工业的发展,燃煤电厂的粉煤灰排放量逐年增加,大量的粉煤灰被排入贮灰厂或江河湖海中,对环境造成严重的污染.据发改委资源节约与环境保护司相关数据,2008 年我国排放了粉煤灰 3.98 亿 t<sup>[5]</sup>.

利用粉煤灰的吸附性对含铅离子的工业废水进行处理,国内外学者分别进行了有益的探讨.例如研究粉煤灰对重金属铅、镍和  $Zn^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$  等金属离子的吸附作用<sup>[6-7]</sup>;研究粉煤灰从溶液中吸附去除有毒  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cr^{3+}$  等金属离子的相关性能<sup>[8-9]</sup>.粉煤灰的吸附作用包括物理吸附和化学吸附.前者效果取决于粉煤灰的多孔性及比表面积.比表面积越大,吸附效果越好.后者主要是由于其表面具有大量 Al—O—Al, Si—O—Si 键与具有一定极性的分子产生偶极—偶极键的吸附,或是阴离子与粉煤灰中次生的带正电荷的离子形成离子交换或离子对的吸附.在通常情况下,两种吸附作用相互联系、相互转化,同一种物质既可以在低温时进行物理吸附,也可以高温时发生化学吸附<sup>[10]</sup>,但在不同条件下(pH、温度等)所体现出的优势不同,导致粉煤灰吸附性能变化.因此,多因素对粉煤灰吸附铅离子效率影响的探讨是目前研究的热点.本文从吸附温度、pH 值、吸附时间、投灰量、离子浓度 5 个因素讨论粉煤灰在不同环境下对铅离子的吸附效率,以期粉煤灰充分吸附处理含铅离子废水提供科学依据.

**收稿日期:**2017-09-25; **修回日期:**2018-01-18.

**基金项目:**国家自然科学基金(41671198)

**作者简介:**郑曼迪(1993—),女,新疆乌鲁木齐人,新疆大学在读硕士研究生,主要研究方向为干旱区资源与环境研究, E-mail:762820677@qq.com.

**通信作者:**熊黑钢(1956—),男,湖南湘乡人,北京联合大学教授,博士生导师,主要从事资源环境研究, E-mail: heigang@buu.edu.cn.

## 1 实验与方法

### 1.1 实验样品试剂与设备

本实验所用粉煤灰来自新疆红雁池发电厂,具体成分如表 1。从质量百分比来看,粉煤灰的化学组成以  $\text{SiO}_2$  含量最多,约为 60%,其次是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  约占 20%, $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$  各占 7%左右, $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MgO}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{TiO}_2$  共约占 7%,其他成分约占 1%。

实验使用的试剂有:含量大于 99%的分析纯硝酸铅试剂、质量浓度为 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$  铅的标准溶液以及蒸馏水。

实验设备主要为上海一恒科技有限公司生产的型号为 THZ-98AB 恒温振荡培养箱,控温温度:5~65  $^{\circ}\text{C}$ ;上海安亭科学仪器厂生产的型号为 TGL-16B 离心机;北京普析通用仪器有限责任公司生产的 TAS-986 原子吸收分光光度仪,波长示值误差 $\pm 0.25$  nm。

表 1 实验用粉煤灰化学成分组成

成分	质量百分比	累计质量百分比	成分	质量百分比	累计质量百分比
$\text{SiO}_2$	58.98	58.98	$\text{Na}_2\text{O}$	1.77	97.48
$\text{Al}_2\text{O}_3$	18.73	77.71	$\text{TiO}_2$	1.28	98.76
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	6.92	84.63	$\text{SO}_3$	0.40	99.16
$\text{CaO}$	6.86	91.49	$\text{SrO}$	0.20	99.36
$\text{K}_2\text{O}$	2.23	93.72	$\text{MnO}$	0.08	99.44
$\text{MgO}$	1.99	95.71	其他	0.56	100.00

### 1.2 实验设计

#### 1.2.1 绘制标准曲线

移取质量浓度为 1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$  铅离子标准溶液 1 mL 至 100 mL 容量瓶中,用蒸馏水定容至 100 mL,制成铅离子储备液。从铅离子储备液中分别移取体积为 1、2、3、4、5、6、7 mL 于 100 mL 容量瓶中,用蒸馏水定容至 100 mL。然后使用原子吸收分光光度仪石墨炉法测定上述不同浓度溶液的吸光度,绘制成标准曲线。

#### 1.2.2 单因素实验设计

实验选取了吸附时间、温度、投灰量、pH 值以及离子浓度 5 个因素对粉煤灰的吸附效果进行分析。各单因素分析具体条件设计如下:

反应时间的长短会直接影响反应是否完全,考虑到吸附平衡的时间问题,将吸附时间设置为 15~150 min,以探讨最佳的吸附时间。其中 60 min 作为其他实验的反应时间。为了模拟酸、碱、中性条件下的水体环境对吸附过程的影响,以 pH 值 2.0~12.0 为研究范围。在自然环境中温度过低时,水会结冰,含铅离子的废水很难进入粉煤灰,故选择 10、20 及 30  $^{\circ}\text{C}$  模拟现实情况,计算粉煤灰的吸附效率;温度升高时,可加快化学反应速率,吸附能力可能加强,故选择 40、50 及 60  $^{\circ}\text{C}$  3 种较高温度来讨论。其他实验温度设定在 20  $^{\circ}\text{C}$ ;当投灰量过低时,粉煤灰吸附铅离子的反应并不完全,铅离子可能会有剩余;投灰量过高时,粉煤灰的吸附反应会达到饱和,且粉煤灰可能会有剩余,因此选择投灰量 0.5~7.0 g,本文各实验所用含铅溶液均为 100 mL,因此选择 2.0 g 作为其他实验的投灰量。

虽然不同工业排出的废水中含铅离子的浓度有较大差异,但铅离子浓度普遍超标几十至数百倍。国家地表水环境质量标准(GB/T 14848-93)中,V 类水最大铅离子允许排放的浓度为 0.1 mg/L。选择 30~480 mg/L 的含铅离子浓度,模拟各种严重超标的含铅离子污染,讨论不同的离子浓度下粉煤灰吸附铅离子的吸附性能。而以 60 mg/L 为其余各实验的铅离子浓度,模拟超过国家地表 V 类水允许排放铅离子的最大浓度 600 倍的污染水体。

#### 1.3 吸附量、吸附率的计算

首先按照单因素实验设计制作样本,其次将样本置于 100 mL 实验瓶中震荡,震荡结束后将样本置于 50 mL 离心管中离心,所得上清液使用原子吸收分光光度仪石墨炉法得出铅离子对应的吸光度。每个实验均

做4组平行样,取其平均值后带入标准曲线得到样本的铅离子浓度.

利用吸附前后的溶液浓度,计算粉煤灰吸附铅离子的吸附量,具体如(1)式所示<sup>[11]</sup>:

$$q_e = \frac{(C_0 - C_e) \times V}{m}, \quad (1)$$

$q_e$  为吸附量, mg/g;  $C_0$  为溶液的起始浓度, mg/L;  $C_e$  为溶液吸附后的浓度, mg/L;  $V$  为溶液体积, L;  $m$  为投灰量, g.

运用(2)式计算粉煤灰吸附含铅离子的吸附率  $\eta$ , 判断粉煤灰在不同的环境条件下, 吸附含铅离子的能力高低.

$$\eta = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%, \quad (2)$$

式中,  $C_0$  为溶液的起始浓度, mg/L;  $C_e$  为溶液吸附后的浓度, mg/L.

#### 1.4 模型建立及精度评价

对采用多元逐步回归方法建立的不同条件下粉煤灰吸附铅离子模型, 通过判断回归系数  $R^2$  来评价其对样本的拟合度<sup>[12]</sup>.  $R^2$  越大, 模型的精度越高.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)(\hat{S} - \bar{\hat{S}}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}_i)^2 (\hat{S} - \bar{\hat{S}})^2}, \quad (3)$$

式中:  $n$  为样品总数,  $S_i$  为实测吸光度,  $\hat{S}$  为预测吸光度.

#### 1.5 吸附剂适用模型判别

制作吸附时间为 60 min、pH 为 5.0、投灰量为 2.0 g、温度为 20 °C、离子浓度分别为 30、60、120、240、360、480、600、720、840、1 000 mg/L 的实验样本, 运用上述方法进行实验, 每个实验均做 4 组平行样, 取其平均值后带入(1)式计算其对应的吸附量, 拟合对应的吸附等温线, 判断粉煤灰吸附铅离子的适用模型, 确定吸附机理.

## 2 结果与分析

### 2.1 不同环境条件下粉煤灰吸附铅离子的性能

铅离子的吸附效率在 15~90 min 之间随着吸附时间的增加而减少(图 1). 因为吸附反应开始时粉煤灰表面有可以与铅离子结合的吸附点位, 同时粉煤灰中存在二次生成带正电荷的硅酸铝、硅酸钙与溶液中的阴离子形成离子交换或离子对吸附. 随着反应时间的增加, 粉煤灰吸附点位逐渐被占据以至于没有空余吸附点位, 离子对交换吸附作用接近完成. 在 90 min 时铅离子的吸附效率最好, 120 min 之后反应趋于平缓, 粉煤灰已经基本没有吸附能力, 从而达到吸附饱和.

一般重金属元素在中性偏酸性条件下易吸附, 本实验也反映出类似的特点. 当 pH 小于 6 时, 铅离子的吸附效率与 pH 值成正比(图 2), pH 为 6 时, 铅离子浓度最小, 吸附量最大. 这是因为中性略偏酸性溶液中不易形成简单的络合离子<sup>[13]</sup>, 铅离子与粉煤灰空余的吸附点位充分结合进行吸附. 当 pH 大于 6 时, 铅离子活性大大降低, 吸附效率也逐渐降低, 可以看出环境的酸碱度对粉煤灰的吸附效率有较大影响.

在较低的温度条件下, 吸附效率降低<sup>[14]</sup>, 也会影响粉煤灰表面吸附物的活性, 甚至使一些活性物质失活<sup>[15]</sup>. 当吸附温度达到 50 °C 时, 粉煤灰对铅离子的吸附效率达到最高; 而当温度高于 60 °C, 吸附效率有比较明显的下降(图 3). 由于吸附反应是放热反应, 温度过高, 逆反应速率增加, 不利于吸附反应的进行. 虽然温度对粉煤灰吸附铅离子有一定的影响, 但是在 10~40 °C 之间的吸附效率变化不大, 这反映出在此条件下温度变化对粉煤灰的吸附效率影响不大.

随着投灰量的增大, 粉煤灰的表面积和可以利用的吸附点位增加, 因此吸附效率增加. 粉煤灰的吸附效率明显上升, 而当粉煤灰投灰量大于 5.0 g 时, 铅离子的吸附效率反而逐渐减小(图 4). 这是由于粉煤灰投灰量过多时, 铅离子颗粒不能与粉煤灰充分混合, 吸附点位不能完全暴露, 因此吸附逐渐趋于平稳, 单位体积的粉煤灰吸附量达到饱和. 由于曲线斜率的变化趋势显著, 所以投灰量的大小在粉煤灰吸附铅离子的过程中是

最为重要的因素之一。

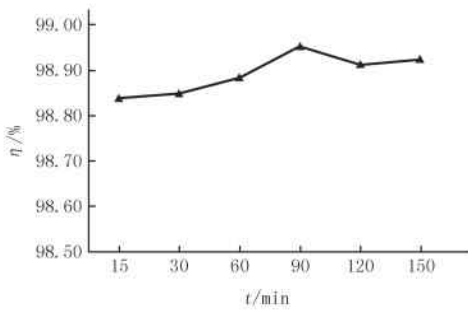


图1 不同吸附时间下粉煤灰吸附铅离子效果图

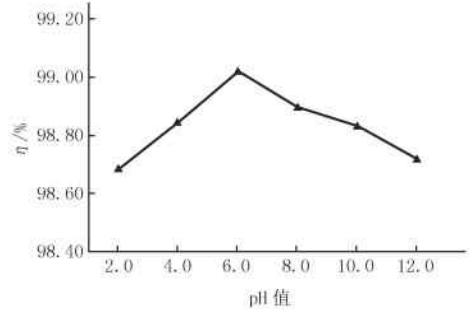


图2 不同 pH 值下粉煤灰吸附铅离子效果图

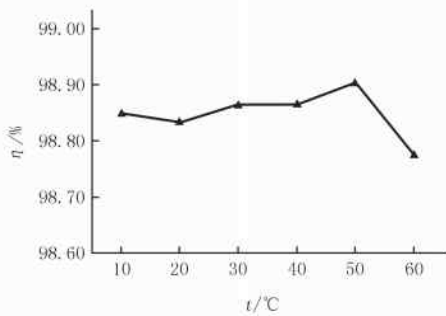


图3 不同温度下粉煤灰吸附铅离子图

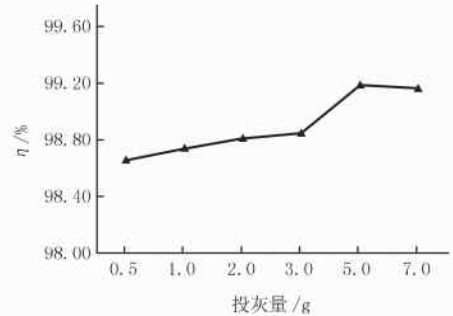


图4 不同投灰量下粉煤灰吸附铅离子图

在离子浓度为 30 mg/L 时,粉煤灰对铅离子的吸附效率达到最高,随后随着离子浓度的增加,粉煤灰的吸附效率逐渐下降(图 5).故重金属废水中,离子浓度越小,越有利于粉煤灰的吸附.一定质量的粉煤灰在铅离子浓度为 60~360 mg/L 条件下,粉煤灰的吸附点位逐渐被占据.而铅离子浓度大于 360 mg/L 使得粉煤灰没有多余的吸附点位而失去吸附能力,达到饱和,吸附效率逐渐趋向稳定,不随铅离子浓度的增加而大幅改变。

### 2.2 单因素条件下粉煤灰吸附铅离子最大吸附率及吸附量

粉煤灰吸附铅离子实验所有单因素分析得出的数据均符合进行 ANOVA 方差分析的条件<sup>[16]</sup>,从显著性水平检验值  $p$  中得到,实验中各因素的水平样本对铅离子吸附效率有显著差异;而投灰量、温度、离子浓度 3 种因素的水平样本对铅离子吸附效率则有极显著差异(表 2)。

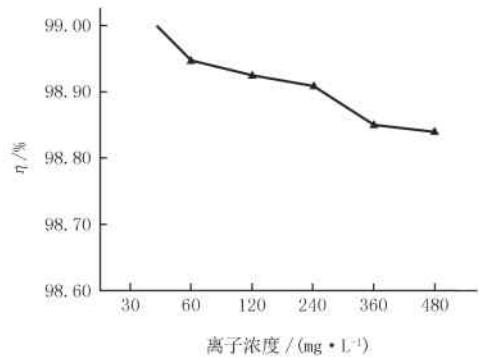


图5 不同铅离子浓度下,粉煤灰的吸附效果图

表 2 粉煤灰吸附铅离子单因素方差分析结果

单因素条件	吸附时间	pH 值	温度	投灰量	离子浓度
$p$ 检验值	0.047 *	0.044 *	0.007 **	0.000 **	0.000 **

注: \* 表示达到显著水平( $p \leq 0.05$ ); \*\* 表示达到极显著水平( $p \leq 0.01$ ).

利用(1)式、(2)式计算得到各单因素条件下粉煤灰吸附铅离子的最大吸附量及吸附率(表 3),其中最大吸附率均超过 98%,粉煤灰的投灰量对吸附量及吸附效率影响最大,其次是离子浓度和 pH。

表 3 单因素条件下粉煤灰吸附铅离子最大吸附量及最大吸附率

单因素条件	吸附时间	pH 值	温度	投灰量	离子浓度
最大吸附量/(mg·g <sup>-1</sup> )	1.484 3	1.485 3	1.483 6	1.487 8	1.485 6
最大吸附率/%	98.95	99.02	98.91	99.19	99.04

### 2.3 不同条件下粉煤灰吸附铅离子模型

对以各因子为自变量,吸光度为因变量建立不同条件下粉煤灰吸附铅离子不同函数类型的方程进行精度分析可知,离子浓度以对数形式建立的方程精度最佳, $R^2$  为 0.93,温度、吸附时间、pH、投灰量 4 种因子建立的方程较离子浓度精度略差,温度以三次多项式建立的方程  $R^2$  达到 0.86,其余 3 种因子都以二次多项式表示, $R^2$  也都超过 0.83(表 4)。

表 4 不同条件下粉煤灰吸附铅离子方程

影响因子	函数类型	方程	回归系数 $R^2$
吸附时间	指数	$y = 1.823 7e^{-0.001x}$	0.643 3
	线性	$y = -0.01x + 1.823 5$	0.652 9
	对数	$y = -0.067\ln(x) + 2.016 7$	0.763 5
	二次多项式	$y = 1E-05x^2 - 0.003 5x + 1.887 3$	0.837 7
	幂函数	$y = 2.036x^{-0.038}$	0.753 4
pH	指数	$y = 1.824 4e^{0.000 1x}$	2E-05
	线性	$y = -0.005x + 1.837 3$	8E-05
	对数	$y = -0.069\ln(x) + 1.957$	0.060 0
	二次多项式	$y = 0.015 9x^2 - 0.222 5x + 2.429 3$	0.870 3
	幂函数	$y = 1.945 7x^{-0.035}$	0.051 8
温度	指数	$y = 1.787 6e^{0.000 3x}$	0.031 4
	线性	$y = 0.000 7x + 1.786 3$	0.037 5
	对数	$y = 0.008 4\ln(x) + 1.781 5$	0.007 2
	二次多项式	$y = 0.000 1x^2 - 0.009 4x + 1.920 9$	0.403 2
	三次多项式	$y = 1E-05x^3 - 0.001 1x^2 + 0.029 4x + 1.612 6$	0.859 8
	幂函数	$y = 1.785 8x^{-0.038}$	0.004 9
投灰量	指数	$y = 2.170 5e^{-0.007 9x}$	0.895 6
	线性	$y = -0.129 3x + 2.131 9$	0.906 4
	对数	$y = -0.315\ln(x) + 1.977 5$	0.850 1
	二次多项式	$y = 0.010 6x^2 - 0.208x + 2.218 8$	0.926
	幂函数	$y = 1.971 4x^{-0.188}$	0.813 6
离子浓度	指数	$y = 1.583 1e^{0.000 3x}$	0.787 7
	线性	$y = 0.000 6x + 1.582 5$	0.809 5
	对数	$y = 0.099 8\ln(x) + 1.207 4$	0.929 9
	二次多项式	$y = -1E-06x^2 + 0.001 2x + 1.538 6$	0.869 3
	幂函数	$y = 1.264 5x^{0.059 6}$	0.813 6

### 2.4 粉煤灰的吸附机理探讨

粉煤灰吸附含铅离子废水属于 I 型吸附等温线,是单分子层吸附,具体有 Langmuir 模型和 Freundlich 模型<sup>[17-18]</sup>.Langmuir 模型是假设吸附剂是均质各向同性、单层同性,其线性方程如下<sup>[19]</sup>:

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{bQ_0C_e}, \quad (4)$$

式中  $Q_e$  为吸附量,mg/g; $C_e$  为溶液吸附后的浓度,mg/L; $Q_0$ , $b$  均为与最大吸附量有关的 Langmuir 常数。

将 1.5 部分所得的数据带入(4)式中,其拟合出的方程为  $1/q_e = 1/12.531 + 0.241/C_e$ ,  $Q_0$  为 12.531,  $b$  为 0.331, 拟合系数为 0.999 7.

Freundlich 模型一般被看作是经验式,其线性方程如下<sup>[20]</sup>:

$$\lg q_e = \lg K_F = \frac{1}{n} \lg C_e, \quad (5)$$

$q_e$  为吸附量, mg/g;  $C_e$  为溶液吸附后的浓度, mg/L;  $K_F$ ,  $n$  均为与吸附容量有关的 Freundlich 常数. 将 1.5 部分的数据带入(5)式,其拟合出的方程为  $\lg q_e = 0.592 + 1/4.808 \lg C_e$ ,  $n$  值为 4.808,  $K_F$  的值为 3.908, 拟合系数  $R^2$  为 0.319 99, 显然用此方程拟合的效果较差.

本文实验结果显示,粉煤灰处理含铅离子的废水的 Langmuir 模型拟合度比 Freundlich 模型高.因此可以判断出实验所用粉煤灰均质、各向同性,吸附能力强,且吸附过程是一个单分子层吸附、吸附剂表面较为光滑的窄孔吸附过程,才使得其在吸附铅离子的最大吸附效率能达到 98% 以上.

### 3 结 论

单因素实验分析结果表明,各实验分别在吸附时间为 90 min、温度为 50 °C、pH 为 6.0、投灰量为 5.0 g、离子浓度为 30 mg/L 时,粉煤灰吸附铅离子效果最好.经过粉煤灰处理过后的含铅离子废水铅离子浓度在 0.5~0.9 mg/L 范围内,铅离子浓度有大幅度减少.在多种函数模拟各因子对粉煤灰吸附铅离子的模型中,以离子浓度为自变量的对数方程精度最高,  $R^2$  达 0.93, 以温度为自变量的三次多项式其次,  $R^2$  为 0.86, 而以吸附时间、pH、投灰量为自变量的方程则以二次多项式为最佳,其  $R^2$  均超过了 0.83, 这些模型均可很好地模拟不同条件下粉煤灰吸附铅离子的吸附效率.通过对 Langmuir 和 Freundlich 模型的  $R^2$  对比得出,粉煤灰吸附铅离子更适用于 Langmuir 模型,该吸附过程是一个单分子层吸附且吸附剂表面较为光滑的窄孔吸附过程.实验结束之后吸附铅离子的饱和灰处置问题一直被人们所忽视,饱和灰处置不当可能会因为雨水淋洗进行化学反应而造成二次污染,所以资源化综合利用饱和灰以及通过改性粉煤灰减少粉煤灰的用量是接下来人们所研究的重点问题.

### 参 考 文 献

- [1] 张娟,邓慧萍,藪谷智规,等.新型磁性聚谷氨酸吸附剂对水中  $Pb^{2+}$  的吸附去除[J].环境科学,2011,32(11):3348-3356.
- [2] Mountouris A, Voutasa E, Tassios D. Bioconcentration of heavy metals in aquatic environments: the importance of bioavailability[J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44(10): 1136-1141.
- [3] Muller Y M R, Kobus K, Schatz J C, et al. Prenatal lead acetate exposure induces apoptosis and changes GFAP expression during spinal cord development[J]. Ecotoxicology and Environment safety, 2012, 75: 223-229.
- [4] Tiwari M, Sahu S K, Bhangage R C, et al. Elemental characterization of coal, fly ash, and bottom ash using energy dispersive X-ray fluorescence technique[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2014, 90: 53-57.
- [5] 杨利香,施钟毅.“十一五”我国粉煤灰综合利用成效及其未来技术方向和发展趋势[J].粉煤灰,2012,24(4):4-9.
- [6] Bereket G, Aroguz A Z, OZEL M Z. Removal of  $Pb(II)$ ,  $Cd(II)$ ,  $Cu(II)$ ,  $Zn(II)$  from aqueous solutions by adsorption on bentonite[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1997, 187, 338-343.
- [7] 程婷,陈晨,许文静,等.粉煤灰合成沸石对重金属铅与镍的吸附性能研究[J].粉煤灰综合利用,2016,25(5):11-16.
- [8] 李静,李鸿达,宋蕾,等.微生物絮凝剂与粉煤灰联合处理水中  $Pb^{2+}$  的响应面优化[J].材料保护,2017,50(5):105-109.
- [9] 宋祎楚,冀晓东,柯瑶瑶,等.粉煤灰合成沸石对  $Cr^{2+}$  的去除能力及影响因素研究[J].环境科学学报,2015,35(12):3847-3854.
- [10] 何婵,粉煤灰超细改性及其吸附性能研究[D].西安:西安科技大学,2008.
- [11] 王剑锋,张金利,杨庆.粉煤灰对  $Cr(VI)$  的吸附特性[J].环境工程学报,2014,8(11):4593-4599.
- [12] 李萍,赵庚星,高明秀,等.黄河三角洲土壤含水量状况的高光谱估测与遥感反演[J].土壤学报,2015,06(52):1262-1271.
- [13] 孙贤斌,刘红玉,李玉成.粉煤灰对重金属  $Cu^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  吸附作用研究[J].农业环境科学学报,2007,26(5):1988-1991.
- [14] Janos P, Buchtova H, Ryznarova M. Sorption of dyes from aqueous solutions onto fly ash[J]. Water Res, 2003, 37: 4938-4944.
- [15] 吴幼权.粉煤灰改性及其吸附性能研究[D].重庆:重庆大学,2006.
- [16] 杨小勇.方差分析法浅析—单因素的方差分析[J].实验科学与技术,2013,11(1):41-43.
- [17] Namasivayam C, Yamuna R T, Jayanthi J. Removal of methylene blue from waste water by adsorption on cellulosic waste, orange peel[J]. Cellulose Chemistry and Technology, 2003, 37(7): 333-339.

- [18] Hui K S, Chao C Y H, Kot S C. Removal of mixed heavy metal ions in waste water by zeolite 4A and residual products from recycled coal fly ash[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005, 127B(1-3): 89-101.
- [19] 相波, 李义久. 吸附等温式在重金属吸附性能研究中的应用[J]. *有色金属*, 2007, 59(1): 77-80.
- [20] Behera S K, Kim J H, Guo X, et al. Adsorption equilibrium and kinetics of polyvinyl alcohol from aqueous solution on powdered activated carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 153(3): 1207-1214.

## Fly ash adsorption efficiency of lead ions under different environmental conditions

Zheng Mandi<sup>1,2</sup>, Xiong Heigang<sup>3</sup>, Yi Yuanrong<sup>1</sup>

(1. College of Resource and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key laboratory of oasis ecology of ministry of education, Urumqi 830046, China;

3. College of Art and Science, Beijing Union University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Taking advantage of lead nitrate reagent simulated as wastewater containing lead ion, this used fly ash as the adsorption material. The purpose of this study is evaluating the influence of efficiency of lead ion adsorption about five factors, such as adsorption time, pH, temperature, ash content and ion concentration, and fitting out the best adsorption model under different conditions. The result of single factor analysis showed that the efficiency of adsorption was the best in the experimental condition of 90 min adsorption time, pH=6.0, 50 °C, 5.0 g fly ash or 30 mg/L ion concentration, which was more than 98%. The best fly ash adsorption equation was modeled by adsorption time, pH, ash content as quadratic polynomial, and regression coefficient  $R^2$  were all more than 0.83. The highest precision of temperature equation was using the form of cubic polynomial, regression coefficient  $R^2$  was 0.86; and the equation of ion concentration fit in logarithmic form was the best and the value of  $R^2$  was 0.93. In the experiment, the value of  $R^2$  of the Langmuir model was more than Freundlich model of 0.602, so the Langmuir monolayer adsorption model was more suitable for process of absorbing lead ion.

**Keywords:** fly ash; the adsorption rate; lead; adsorption equation

[责任编辑 赵晓华]

(上接第 59 页)

## Effect of OMS-2 support preparation technique on CO oxidation of Cu/OMS-2 catalysts

Tang Qinghu, Wang Xiaopei, Xie Xiaopei, Zhao Peizheng

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract:** OMS-2 supports were synthesized by three different methods, and a series of CuO/OMS-2 catalysts with CuO loading of 10.0 t% (mass fraction) were synthesized by the impregnation method. The synthesized catalysts were characterized by X-ray diffraction,  $N_2$  adsorption, transmission electron microscopy, X-ray photoelectron spectroscopy and  $H_2$ -temperature programmed reduction and their catalytic activities for CO oxidation were evaluated on a continuous flow fixed-bed reactor. It was found that the S-OMS-2 synthesized by the solid phase method with nanorod morphology has a lower crystallinity but a larger specific surface area, whereas, the OMS-2 by the refluxing method or the hydrothermal method with needle-like or fibrous morphology shows a higher crystallinity but a lower specific surface area. The synthesized method for OMS-2 has a great effect on the catalytic activity of CuO/OMS-2. The CuO/S-OMS-2 catalyst exhibited the highest catalytic activity for CO oxidation. The superior catalytic activity observed on CuO/S-OMS-2 is probably associated to its larger surface area, more lattice defects as well as highly dispersed CuO species, which can provide more Cu-O-Mn interfaces for CO oxidation.

**Keywords:** OMS-2; Cu; CO; catalytic oxidation; supported catalyst

[责任编辑 赵晓华]