

文章编号: 1673-9469 (2017) 01-0076-06

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.01.017

不同沸石粉对 Cu^{2+} 的吸附特性试验研究

朱明杰¹, 孙树林²

(1. 贵州省水利水电勘测设计研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究沸石粉对重金属铜的吸附效果, 采用室内试验方法, 选取天然沸石粉、4A沸石粉以及在天然沸石粉的基础上添加粉煤灰经高温焙烧制成的改性沸石粉作为吸附剂对重金属 Cu^{2+} 进行静态吸附试验, 为了对比验证水泥吸附去除 Cu^{2+} 的能力, 添加了水泥作为吸附剂。通过室内静态吸附试验发现, 四者吸附 Cu^{2+} 能力大小为 4A沸石粉 $\approx$ 改性沸石粉 $>$ 天然沸石粉 $>>$ 水泥; 考虑到制备工艺及经济因素, 改性沸石粉是吸附去除 Cu^{2+} 的最佳选择; 改性沸石粉去除 Cu^{2+} 的最佳掺量为 2 g: 100 mg/L; pH 值在 5 ~ 8 之间沸石粉吸附 Cu^{2+} 的效果较好。

关键词: 天然沸石粉; 改性沸石粉; 静态吸附; 4A沸石粉; 重金属铜污染; 室内试验

中图分类号: X505

文献标识码: A

Experimental on adsorption properties of Cu^{2+} by different zeolite powder

ZHU Mingjie¹, SUN Shulin²

(1. Guizhou Survey & Research Institute for Water Resources and Hydropower, Guizhou Guiyang, 550002, China; 2. College of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210098, China)

Abstract: To study the adsorption effect of zeolite powder on heavy metal copper, the indoor test is carried out. And the natural zeolite powder, 4-A zeolite powder and modified zeolite powder based on the natural zeolite powder made by the high temperature roasting with fly ash as adsorbent are selected for static adsorption of heavy metal Cu^{2+} . In order to verify the ability of adsorption removal of Cu^{2+} , cement is added as adsorbent. The static adsorption experiment shows that the adsorption capability for the Cu^{2+} is as follows: 4-A zeolite powder $\approx$ modified zeolite powder $>$ natural zeolite powder $>>$ cement. Considering the economic factors and preparation technology, the modified zeolite powder is the best choice to removing Cu^{2+} . The optimum content of modified zeolite powder removal Cu^{2+} is: 2 g: 100 mg/L. The pH between 5-8 is better for the adsorption.

Key words: natural zeolite; modified zeolite; static adsorption; 4A-zeolite; heavy metal pollution; laboratory test

我国目前铜的产量与消费量都在不断增加, 经济增速的同时也带来了环境污染^[1-3]。“蓝牡蛎”和“绿牡蛎”的出现是我国近海河口生物受到铜污染发生变异的一个典型例子^[4]。天然沸石^[5-6]是火山熔岩经过物理化学作用形成的一种架状铝硅酸盐矿物。其具有独特的吸附性、离子交换性、离子选

择性、耐酸性、热稳定性、多成份性及很高的生物活性和抗毒性等。目前, 我国多将沸石粉用作净水剂研制, 对沸石吸附重金属离子的研究较少。本文选取不同种类的沸石粉对单一重金属 Cu^{2+} 进行静态吸附试验研究, 以期将其应用于解决土壤重金属铜污染问题。

收稿日期: 2016-07-01

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金(教外司留[2007]1108); 江苏省环保科研基金资助项目(201029)

作者简介: 朱明杰(1990-), 男, 河南焦作人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为环境地质与工程地质。

1 静态吸附试验

1.1 试验

本次试验所用改性沸石粉是在天然沸石粉基础上添加粉煤灰经高温焙烧改性制成。试验所用天然沸石为宁波嘉和新材料科技有限公司生产的污水处理用沸石，其成分为天然斜发沸石，主要的理化性能指标如表 1 所示，其主要化学成分及矿物组成如

表 2 所示。试验用粉煤灰来自重庆九龙电厂，其化学组成见表 3。试验所用 4A 沸石由宁波嘉和新材料科技有限公司生产，其主要化学成分及矿物组成如表 4 所示。试验所用水泥为广东华润水泥控股有限公司生产的 325 号普通硅酸盐水泥，其技术性质指标如表 5 所示。

改性沸石粉具体制备过程如下：取一定量前文中所述的天然沸石和粉煤灰，用粉碎机粗碎至 3 ~

表 1 试验用天然沸石的主要技术性质指标

Tab.1 Parameters of natural zeolite					
项目	指标	项目	指标	项目	指标
比重	2.3 g/cm ⁻³	磨损率	≤1.0%	水分	≤1.5%
容重	1.6 g/cm ⁻³	含泥量	≤1.0%	钠离子交换能力	≥800 g/cm

表 2 试验用天然沸石粉的主要化学成分及矿物组成

Tab.2 Main chemical composition and mineral composition of natural zeolite powders					
化学成分	含量百分比 /%	化学成分	含量百分比 /%	化学成分	含量百分比 /%
SiO ₂	68.60	MgO	0.81	K ₂ O	2.83
Al ₂ O ₃	12.43	CaO	2.57	TiO ₂	0.10
Fe ₂ O ₃	1.21	MnO	0.06	其他	≤0.10
FeO	0.13	Na ₂ O	1.08	灼减量	10.17

表 3 试验用 4A 沸石粉的主要化学成分及矿物组成

Tab.3 Main chemical composition and mineral composition of 4-A zeolite powders					
化学成分	含量百分比 /%	化学成分	含量百分比 /%	化学成分	含量百分比 /%
SiO ₂	64.41	MgO	2.38	K ₂ O	2.78
Al ₂ O ₃	13.46	CaO	2.71	TiO ₂	0.11
Fe ₂ O ₃	1.35	灼减量	12.80	其他	≤0.10

表 4 试验用粉煤灰的主要化学成分及矿物组成

Tab.4 Main chemical composition and mineral composition of fly ash					
化学成分	含量百分比 /%	化学成分	含量百分比 /%	化学成分	含量百分比 /%
SiO ₂	45.17	MgO	3.73	SO ₃	1.46
Al ₂ O ₃	24.61	CaO	4.45	TiO ₂	3.47
Fe ₂ O ₃	9.22	灼减量	7.89	其他	≤0.001

表 5 试验用水泥的主要技术性质指标

Tab.5 Main technical parameters of cement					
项目	指标	项目	指标	项目	指标
密度 /(g · cm ⁻³)	3.1	初凝时间 /h	1.5	体积安定性	合格
堆积表观密度 /(kg · m ⁻³)	1 300	终凝时间 /h	2.5	抗压强度 /MPa	38.8
标准稠度用水量 /%	10	水泥细度 /%	1.6	烧失量 /%	1

表 6 试验用分析纯三水合硝酸铜主要技术性质指标

Tab.6 Parameters of pure copper nitrate trihydrate					
项目	指标	项目	指标	项目	指标
密度 /(g · cm ⁻³)	2.32	熔点 /℃	114	沸点 /℃	170
三水合硝酸铜含量 /%	≥99.5	氯化物 /%	≤0.001	硫酸盐 /%	≤0.005
水不溶物 /%	≤0.002	铁含量 /%	≤0.002	不沉淀物 /%	≤0.05

5 mm 左右,再用棒磨机细磨至 200 目左右,过 200 目筛;将天然沸石粉和粉煤灰按质量比 3:1 充分混和均匀,加入适量水搅拌,挤压成直径 3 mm 左右的颗粒状;将颗粒状混合物在 100℃下用烘机烘干,再于 800℃马弗炉中灼烧 1 h,取出后自然冷却至室温,即得改性沸石颗粒。

使用分析纯三水合硝酸铜 ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 与去离子水配制含 Cu^{2+} 不同浓度的溶液若干。因为 $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 在水中溶解度较高,且硝酸根离子对凝胶材料的水化反应干扰程度较低。量取一定量的去离子水,将铜离子按设计值溶于去离子水并充分搅拌,得到硝酸铜溶液。试验用分析纯三水合硝酸铜 ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) 是由上海新宝精细化工厂生产,其主要技术性质指标如表 6 所示。

1.2 试验仪器

原子吸收分光光度计, VARIAN ICP-OES 电感耦合等离子体发射光谱仪,计算机控制的发射光谱仪并带背景校正系统,高频发生器(氩气供给),恒温水浴振荡器, HZS-H 水浴振荡器, PHS-3D 型 pH 酸度计,分析天平,烘箱等。

1.3 试验方案

方案一:准备若干份 50 ml 含 Cu^{2+} 100 mg/L 的溶液,置于 100 ml 的锥形瓶中,用 0.5 mol/L 的 HCL 溶液或 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液调节溶液的 pH 值为 7.0,然后分别取 2 g 的天然沸石粉、4A 沸石粉、改性沸石粉、水泥置于锥形瓶中,在室温 25℃下,每隔 20 min 在振荡器上震荡 3 ~ 5 min,震荡完毕后用 ICP 法测定溶液 Cu^{2+} 的浓度。

方案二:准备若干份 50 ml 含 Cu^{2+} 100 mg/L 的溶液,置于 100 ml 的锥形瓶中,用 0.5 mol/L 的 HCL 溶液或 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液调节溶液的 pH 值为 7.0,然后分别取天然沸石粉和改性沸石粉 0.5、1、2、3、5 g 置于锥形瓶中,在室温 25℃下,每隔 20 min 在振荡器上震荡 3 ~ 5 min,震荡完毕后用 ICP 法测定溶液 Cu^{2+} 的浓度。

方案三:准备若干份 50 ml 含 Cu^{2+} 100 mg/L 的溶液,置于 100 ml 的锥形瓶中,用 0.5 mol/L 的 HCL 溶液或 0.5 mol/L 的 NaOH 溶液调节溶液的 pH 值为 2.0、4.0、6.0、8.0、10.0,然后取改性沸石粉 2 g 分别置于其中,在室温 25℃下,每隔 20 min 在振荡器上震荡 3 ~ 5 min,在第三次震荡完毕后用 ICP 法测定溶液 Cu^{2+} 的浓度,再计算出溶液中改性沸石粉和

天然沸石粉对 Cu^{2+} 的吸附量。

2 试验结果分析

为了比较不同沸石种类掺量及不同 pH 值环境下对重金属 Cu^{2+} 离子的吸附特征,本试验引用了富集系数 (E) 以阐明沸石对 Cu^{2+} 吸附去除能力的大小。

$$E = (c_{sa} / c_{so}) \times 100$$

式中, c_{sa} 表示沸石粉吸附重金属 Cu^{2+} 的量 (mg); c_{so} 表示吸附前溶液中重金属 Cu^{2+} 的量 (mg)。富集系数反映的是沸石溶液体系中重金属 Cu^{2+} 离子质量浓度的变化,可直观地反映不同沸石种类对 Cu^{2+} 离子的相对富集能力。

2.1 不同沸石粉对吸附效果的影响

根据试验方案一,经过 1 ~ 8 h 吸附后,测试出三种沸石粉及水泥吸附 Cu^{2+} 离子随时间变化的富集系数。从图 1 可以看出,三种沸石粉及水泥对重金属 Cu^{2+} 离子均具备吸附去除作用。沸石粉^[7]能够吸附去除溶液中的 Cu^{2+} ,主要原因是沸石晶体的架状构造存在大量的孔穴和孔道,具有很大的比表面积,并且沸石晶体骨架内部有大量的铝硅氧四面体 (AlO_4^- , SiO_4^-),因此这些骨架呈负电荷且存在很大的静电引力,不断吸引着重金属阳离子 (Cu^{2+}) 来平衡其骨架电荷,宏观上表现为溶液中的 Cu^{2+} 被吸附而浓度降低。而水泥在加入水溶液中后,发生水化反应^[8]生成的 C-S-H 胶体具有强烈的吸附活性,能够吸附周围的 Cu^{2+} 以及水泥颗粒形成更大的团粒结构,并且水化反应会在溶液中形成碱性环境,游离态 Cu^{2+} 在这种条件易形成 $\text{Cu}(\text{OH})_2$ 沉淀,导致

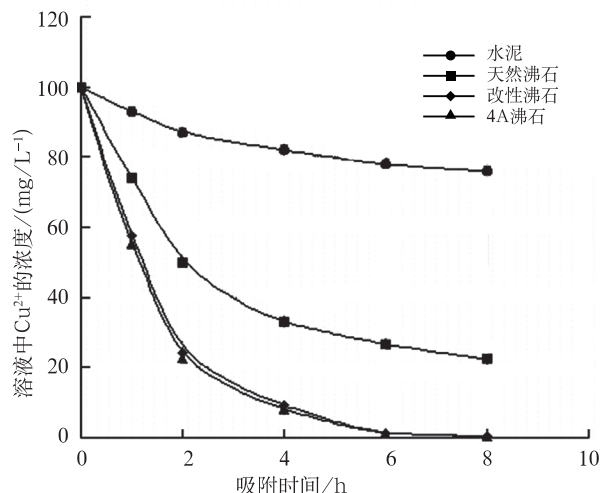


图 1 不同沸石粉及水泥对 Cu^{2+} 的吸附量随时间的变化关系

Fig.1 Adsorption of Cu^{2+} on volume changes with different zeolite powder and cement

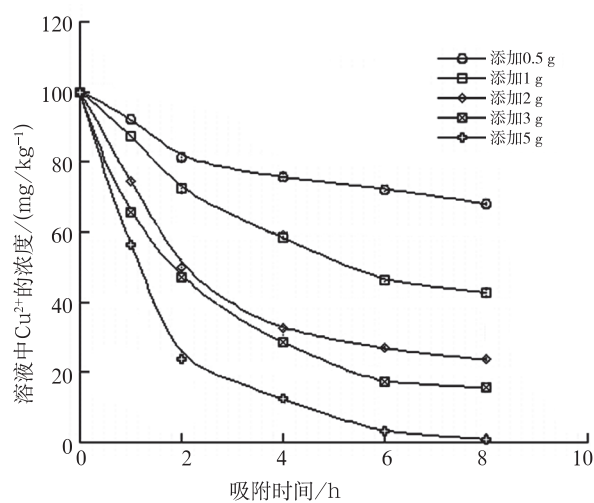


图 2 天然沸石粉在不同掺量下对 Cu²⁺ 的吸附量
随时间的变化关系

Fig.2 Adsorption of Cu²⁺ change with time by
natural zeolite powder under different dosage

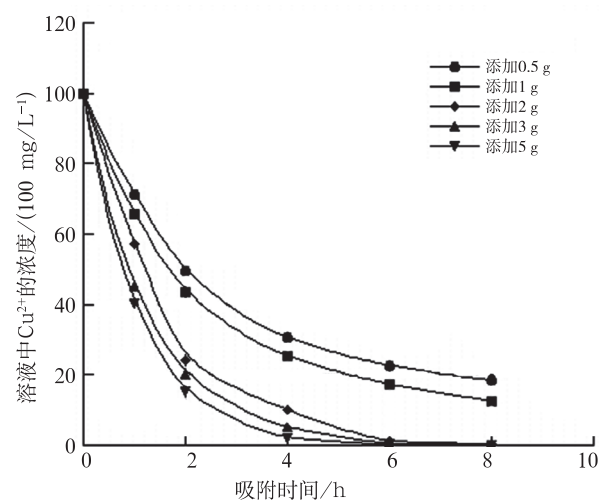


图 3 改性沸石粉在不同掺量下对 Cu²⁺ 的吸附量
随时间的变化关系

Fig.3 Adsorption of Cu²⁺ by modified
zeolite powder under different dosage

溶液中 Cu²⁺ 浓度减小，因此表现出水泥对溶液中的 Cu²⁺ 离子也具备一定的吸附去除作用。从表 7 和图 1 中还可以发现沸石粉吸附去除溶液中 Cu²⁺ 的能力远远大于水泥，而改性沸石粉和 4A 沸石粉的吸附能力又优于天然沸石粉。三种沸石粉均表现出在吸附早期富集系数急剧增大，随着吸附时间变长，吸附 Cu²⁺ 的速度逐渐变缓，这与许秀云^[9]等人的研究结果一致。其中改性沸石粉和 4A 沸石粉在吸附 4 h 后富集系数就达到了 90 以上，而此时天然沸石粉的富集系数只有 67；吸附 6 h 后改性沸石粉和 4A 沸石粉的富集系数就近乎达到了 99，我们知道沸石吸附重金属离子同时还存在解吸作用，但此时溶液中游离态 Cu²⁺ 只剩不足 1%，这充分证明了改性沸石粉^[10]和 4A 沸石粉在吸附去除 Cu²⁺ 方面的能力。本试验中在天然沸石粉中加入废料粉煤灰^[11]经高温煅烧制备的改性沸石粉与 4A 沸石粉相比较，性能接近，制备工艺简单，材料价格低廉，具有更佳的经济适

用性。
2.2 不同沸石粉掺量对吸附效果的影响

为探讨沸石粉掺量不同条件下，对 Cu²⁺ 的吸附量随时间的变化关系，依据试验方案二，选取天然沸石粉和改性沸石粉两种材料，设置添加量分别为 0.5、1、2、3、5 g 五个级别，进行静态吸附试验。

从表 7 和图 2 中可以看出，试验水样中 Cu²⁺ 浓度随天然沸石粉掺入量的增加和吸附时间的增长而不断减小，在 0 ~ 2 h 内吸附速率最快。从图中可以看出其吸附速率也随天然沸石粉的增加而增大，比如添加 5 g 天然沸石粉吸附 2 h 时的富集系数为 77，是同样时间内添加 0.5 g 的 3.5 倍。富集系数可以反映沸石掺量对 Cu²⁺ 离子的相对富集能力，我们发现，在添加 0.5 g 天然沸石粉吸附 8 h 后其富集系数只有 31，这说明 0.5 g 天然沸石粉的反应时间长而富集能力小，达不到理想要求。从表 7 中可以看出，

表 7 两种沸石粉在不同吸附时间下的富集系数										
Tab.7 Adsorption enrichment factor of two kinds of zeolite powders under different adsorption time										
时间 /h	沸石粉不同种类及添加量下的富集系数 E									
	天然沸石粉添加量 /g					改性沸石粉添加量 /g				
	0.5	1	2	3	5	0.5	1	2	3	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.2	14.1	26	34.7	57	29.3	34.7	49.8	55.8	60
2	19	27.4	50.1	51.9	77	50.3	56.2	75.7	80.7	85.6
4	24	43	67	71.5	87.4	70	75.3	90.9	95	99
6	29	54.1	73.3	82.6	97.3	78.8	82.4	98.8	99.1	99.1
8	31	57	76.4	86.8	99.2	82	89.2	99.1	99.2	99.1

天然沸石粉在添加 5 g 的掺量下吸附 6 h 以后其富集系数才能达到 90 以上,其富集能力远不如同样条件下的改性沸石粉。从图 3 和表 7 可以看出,同样掺量相同吸附时间条件下,改性沸石粉的富集系数普遍远大于天然沸石粉,并且在早期 0 ~ 2 h 内的吸附速率也远大于天然沸石粉,比如同样 0.5 g 添加量吸附 2 h,改性沸石粉的富集系数(50.5)是天然沸石粉(19)的 2.5 倍,添加 2 g 吸附 2 h 是天然沸石粉的 1.5 倍,添加 5 g 吸附 2 h 是天然沸石粉的 1.1 倍,这说明,在沸石粉掺量越低的情况下,改性沸石粉的优越性越显著。改性沸石粉的吸附是一个动态平衡过程,我们也发现,改性沸石粉在添加 2 g 吸附 6 h 或 8 h,添加 3 g 吸附 6 h 或 8 h,添加 5 g 吸附 4 ~ 8 h,其富集系数都在 99 左右,相差十分微小,可以忽略不计,这说明,此时改性沸石粉吸附溶液中 Cu^{2+} 的反应已达到动态平衡,因为其在吸附 Cu^{2+} 的同时还存在解吸附过程,因此,溶液中 Cu^{2+} 是不能去除殆尽的。所以改性沸石粉的最佳掺入量为 2 g,既可以保证能充分快速去除溶液中 Cu^{2+} ,同时又不浪费材料。

综上所述,我们可以得到改性沸石粉相比于天然沸石粉对溶液中 Cu^{2+} 的去除作用要优越,且改性沸石粉去除 Cu^{2+} 的最佳掺量建议为 2 g: 100 mg/L。

2.3 不同 pH 值环境对吸附效果的影响

国内外研究证明,溶液 pH 值对于沸石吸附重金属阳离子也是一个重要的影响因素。因此,本次静态吸附试验设计试验三,选取天然沸石粉和改性沸石粉 2 g,在不同 pH 值环境下吸附溶液中的 Cu^{2+} 2 h 和 6 h 后测定 Cu^{2+} 浓度。

从图 4 和图 5 中可以看出,改性沸石粉与天然沸石粉对溶液中 Cu^{2+} 的吸附量随 pH 值的变化趋势一致。并且溶液 pH 值在小于 5 的条件下对沸石粉吸附 Cu^{2+} 的影响较大,pH 值越小,沸石粉对 Cu^{2+} 的吸附量就越小。当溶液 pH 值在 5 ~ 8 时,沸石粉对 Cu^{2+} 的吸附量几乎保持不变。李爱阳^[12]等人研究发现,在溶液 pH 值小于 3 时,由于氢离子的竞争作用,导致重金属离子的吸附效果明显下降;罗道成^[13]等人研究改性沸石对电镀废水中 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附时发现,pH 值小于 4 重金属离子吸附量较小,不利于吸附,pH 值大于 4 重金属离子吸附去除率显著增加,与本试验结论有所不同,但李爱阳等人使用的材料为钠型改性斜发沸石,罗道成等人使用的则是添加烟煤改性后的沸石,与本

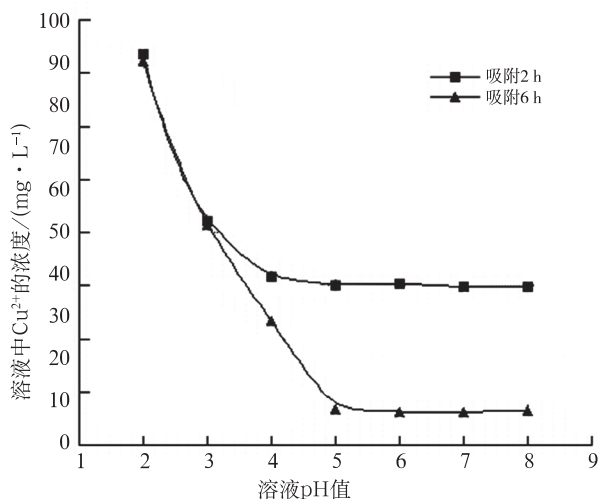


图4 天然沸石粉对 Cu^{2+} 的吸附量随 pH 值的变化关系

Fig.4 Adsorption of Cu^{2+} change with pH value by natural zeolite powder

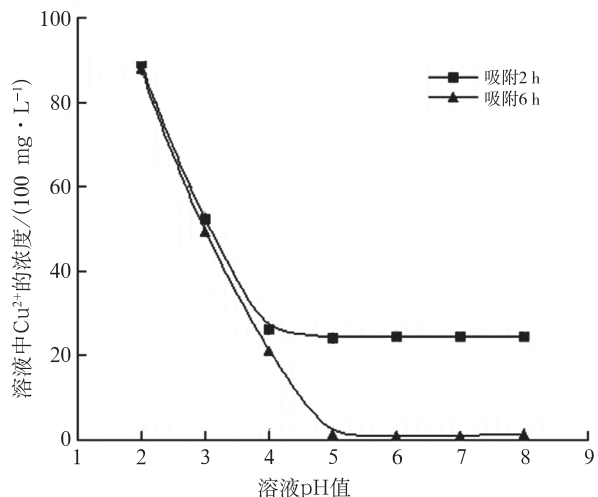


图5 改性沸石粉对 Cu^{2+} 的吸附量随 pH 值的变化关系

Fig.5 Adsorption of Cu^{2+} along with change of pH by modified zeolite powder

文不同,且他们的试验溶液中含多种重金属离子如 Cr^{6+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 等,还有沸石粉颗粒大小、溶液温度、重金属离子浓度等都可能都是导致结论不同的原因,本文对此不做深入研究。

综上,溶液 pH 值在 5 ~ 8 之间对沸石粉吸附 Cu^{2+} 的效果较好。

3 结论

1) 天然沸石粉、改性沸石粉和 4A 沸石粉及水泥对重金属 Cu^{2+} 离子均具备吸附去除作用,其去除能力大小为 4A 沸石粉 $\approx$ 改性沸石粉 $>$ 天然沸石粉 $>>$ 水泥。考虑到制备工艺及经济因素,改性沸石粉是吸附去除 Cu^{2+} 的最佳选择。

2) 改性沸石粉相比于天然沸石粉对溶液中 Cu^{2+}

的去除作用要优越许多,且改性沸石粉去除 Cu^{2+} 的最佳掺量为 2 g: 100 mg/L。

3) 溶液 pH 值在小于 5 的条件下对沸石粉吸附 Cu^{2+} 的影响较大, pH 值越小,沸石粉对 Cu^{2+} 的吸附量就越小; pH 值在 5 ~ 8 之间对沸石粉吸附 Cu^{2+} 的效果较好。

参考文献:

- [1] 杨海琳. 土壤重金属污染修复的研究[J]. 环境科学与管理, 2009, 34 (6): 130-135.
 - [2] LIU Wengang, WEI Dezhou, MI Jinyue, et al. Immobilization of Cu(II) and Zn(II) in simulated polluted soil using sulfurizing agent[J]. Chemical Engineering Journal, 2015 (277): 312-317.
 - [3] 林爱军, 王凤花, 谢文娟, 等. 土壤铜污染对植物的毒性研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39 (35): 21740-21742.
 - [4] 潘科, 朱艾嘉, 徐志斌, 等. 中国近海和河口环境铜污染的现状[J]. 生态毒理学报, 2014, 9 (4): 618-631.
 - [5] 唐启祥, 杨留方, 吴兴惠, 等. 天然沸石及沸石类分子筛[J]. 材料导报, 2004 (18): 256-261.
 - [6] 李长洪, 李华兴, 张新明. 天然沸石对土壤养分有效性的影响[J]. 土壤与环境, 2000, 9 (2): 163-165.
 - [7] 李见云, 郑宾国, 化全县, 等. 沸石粉对溶液中铜的吸附性能研究[J]. 中国农学通报, 2011, 27 (14): 240-243.
 - [8] 金兰淑, 高湘骥, 刘洋, 等. 4A 沸石对复合污染水体 Pb^{2+} 、 Cu^{2+} 和 Cd^{2+} 的去除[J]. 环境工程学报, 2012, 27 (6): 1-4.
 - [9] 许秀云, 蔡玉曼. 改性沸石对重金属离子竞争吸附特性研究[J]. 地质学刊, 2010, 34 (1): 92-97.
 - [10] PANAYOTOVAM. Kinetics and thermodynamics of removal of nickel ions from wastewater by use of natural and modified zeolite[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2001, 10(3): 267-272.
 - [11] 赵亚娟, 赵西成, 江元汝. 粉煤灰合成沸石的研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28 (5): 1008-1012.
 - [12] 李爱阳, 褚宏伟. 改性斜发沸石处理电镀废水中的重金属离子[J]. 材料保护, 2004, 37 (6): 37-45.
 - [13] 罗道成, 易平贵, 陈安国. 改性沸石对电镀废水中 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Ni^{2+} 的吸附[J]. 材料保护, 2002, 35 (7): 138-141.
- (责任编辑 王利君)
-
- (上接第 75 页)
- contaminant hydrology, 1992, 10(3): 225-250.
- [5] Edil T B, Wambold W S, Park J K. Partitioning of VOCs in Clay Liner Materials[C]// Geoenvironment 2000@sCharacterization, Containment, Remediation, and Performance in Environmental Geotechnics. ASCE, 2014:775-790.
 - [6] ROWE R K, BOOKER J R. The analysis of pollutant migration in a non-homogenous soil[J]. Géotechnique, 1984, 34(4):601-612.
 - [7] BOOKER J R, ROWE R K. A finite layer technique for calculating three-dimensional pollutant migration in soil[J]. Géotechnique, 1986, 36(2):205-214.
 - [8] LEO C J, BOOKER J R. A boundary element method for analysis of contaminant transport in porous media I: homogeneous porous media[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 1999, 23(14):1701-1715.
 - [9] 余开彪, 胡斌, 张挺. 垃圾渗滤液在土体中扩散规律的模拟计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(11):1944-1948.
 - [10] 贺国平, 邵景力, 崔亚莉, 等. FEFLOW 在地下水流模拟方面的应用[J]. 成都理工大学学报, 2003 (4): 356-361.
- (责任编辑 王利君)