新型粉煤灰陶粒对水中 Cu(Ⅱ)的去除特性及吸附等温模拟

罗 隽[1], 雷育涛[1], 丘锦荣[1], 谌建宇[1], 庞志华[1], 赵 英[1], 张佳琳[2]
(1.环境保护部华南环境科学研究所,广东 广州 510655;2. 广东省环境科学研究院,广东 广州 510045)

摘 要:以粉煤灰、膨润土等制备新型粉煤灰陶粒,考察粉煤灰陶粒对溶液中 Cu(Ⅱ)的去除特性并进行吸附等温线拟合。结果表明,粉煤灰陶粒对 Cu(Ⅱ)的去除主要为吸附过程,对 Cu(Ⅱ)的吸附效果与陶粒用量、温度及振荡速度有关,较大的粉煤灰陶粒用量、适宜的温度及振荡有较好的 Cu(Ⅱ)去除效果。当温度为 25℃、pH4.5 及振荡速度 150 r/min 时,2.00 g 粉煤灰陶粒对 50 mL 溶液中浓度为 100 mg/L 的 Cu(Ⅱ)去除率为 100%,而同等条件下两种普通市售陶粒的 Cu(Ⅱ)去除率分别只有 14.6%、6.3%。陶粒吸附柱可连续 4 次对 250 mL 浓度为 100 mg/L 的 Cu(Ⅱ)去除率达 90%以上。25℃时粉煤灰陶粒对 Cu (Ⅱ) 的最大吸附量为 2.78 mg/g, 其吸附过程符合 Langmuir 等温式,以 Freundlich 吸附等温式拟合则相关性较差。

关键词:粉煤灰陶粒;Cu;吸附;去除特性;等温模拟
中图分类号: X592 **文献标识码**:A **文章编号**:1004-874X(2014)21-0159-06

Characteristics of Cu(Ⅱ) removal in wastewater by new fly ash ceramisite and its adsorption isotherm simulation

LUO Jun[1], LEI Yu-tao[1], QIU Jin-rong[1], CHEN Jian-yu[1], PANG Zhi-hua[1], ZHAO Ying[1], ZHANG Jia-lin[2]
(1. South China Institute of Environmental Sciences, Environmental Protection Department, Guangzhou 510655, China;
2. Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China)

Abstract: A new kind of fly ash ceramsite was made with fly ash and bentonite. This paper studied the characteristics of the new fly ash ceramsite on the removal of Cu (Ⅱ) in wastewater and its adsorption isotherm simulation. The results showed that adsorption was the main process of Cu(Ⅱ) removal. The adsorption effect of Cu (Ⅱ) was related to the amount of ceramic, temperature and oscillation. Better removal of Cu (Ⅱ) could be attained with the larger amount of fly ash ceremsite, appropriate temperature and oscillation. The Cu (Ⅱ) removal rate could reach 100% with the pH4.5, 25°C, 150 r/min and 2.00 g ceramsite, when the wastewater was 50 mL and the concentration was 100 mg/L, while the removal rate of two kinds of ordinary ceramsites was only 14.6% and 6.3% under the same conditions. The Cu (Ⅱ) removal rate of the ceramsite adsorption column could reach 90% above for 4 times continuously. The maximum adsorption capacity of Cu (Ⅱ) was 2.78 mg/g. The adsorption process accorded with Langmuir adsorption isotherm, rather than Freundlich adsorption isotherm.

Key words: fly ash ceramsite; Cu; adsorption; removal characteristics; isotherm simulation

铜是最常见的重金属之一，常见废水中重金属污染的控制技术主要包括离子交换法、化学沉淀法、吸附法、膜过滤法等[1-4],离子交换法及膜过滤法的处理效果易受到废水水质的影响且处理成本很高，而化学沉淀法及传统的分散型吸附剂如活性炭等则会产生较多的化学污泥,对 Cu(Ⅱ)的去除效率也较低。这些因素往往会影响其在废水处理的应用。近年来有人尝试以矿物型吸附剂如海泡石、改性膨润土、改性蒙脱石等进行 Cu(Ⅱ)的吸附试验,取得了较好的效果。如徐应明等[5]以海泡石进行 Cu(Ⅱ)的吸附,其饱和吸附量可达 22.10 mg/g;成杰民等[6]研制的有机改性膨润土对 Cu(Ⅱ)的吸附量为 6.25 mg/g;周建兵等[7]以十二烷基硫酸钠改性蒙脱石对 Cu (Ⅱ) 的吸附效果在浓度较低时可达 99%以上。矿物型吸附材料近年来受到的关注较多,现有研究为本领域的突破提供了有益的新思路，但这一类吸附剂大多属分散型小颗粒,受沉降性能等方面的限制,其与实际推广应用尚有一段距离，目前仍只处于实验室研究阶段。

收稿日期:2013-10-21
基金项目:环保公益性行业科研专项(201209048);粤港关键领域重点突破项目(2009A030902002)
作者简介:罗隽(1983-),男,博士,工程师,E-mail:luojun@scies.org
通讯作者:张佳琳(1989-),女,硕士,工程师,E-mail:zhangjialin51@126.com

传统废水处理工程填料发展已十分成熟，但大部分填料其在废水处理过程中一般仅起到生物膜载体的作用，自身对污染物的去除能力有限。本课题组结合传统废水处理填料应用广泛、技术成熟等优势，在其基础上以粉煤灰为主要原料开发了一种新型多功能陶粒，既可用作 BAF、人工湿地等废水处理工程的填料，同时本身还具备对多种污染物良好的去除效果。本文对该粉煤灰陶粒去除 Cu(Ⅱ)的特性及影响去除过程的主要因素进行研究，并进行吸附模型拟合分析，以探讨强化常规废水处理工程对 Cu(Ⅱ)去除效率的可能性。

1 材料与方法

1.1 试验材料

粉煤灰陶粒自行研制所得。陶粒由以下按质量百分比计的组分组成：粉煤灰 55%，膨润土 30%，熟石灰 10%，自来水 5%。其中粉煤灰的细度为 200 μm。按以下操作步骤制备得到多功能粉煤灰陶粒：(1) 混和：将粉煤灰、膨润土和熟石灰按上述配比称量，混合搅拌均匀；(2)造粒：将混合原料分次加入圆盘造粒机，每次 1.0 kg，喷洒雾化后的自来水每次 50 mL，造粒，直至造粒直径达到 6 mm，得到粉煤灰陶粒；(3)干化：在自然条件下将粉煤灰陶粒干化 12 h；(4)烧结：以速率 10℃/min 缓慢升温至 400℃，保温预热 35 min，然后继续升温，升温速率为 10℃/min，升温至 950℃后恒温烧结 30 min，降温至室温，得到本粉煤灰陶粒。

供试水样：取分析纯 $CuCl_2$，加一定量的 HCl，用去离子水配成 Cu(Ⅱ)含量在 10 g/L 的储备液，溶液 pH 值保持在 4.5 左右以防止水解。试验时根据需要以储备液稀释成不同浓度的含铜溶液所得，无特殊说明时，稀释后的溶液体积均为 50 mL，pH 值为 4.5 左右。

供试仪器：日本 SHIMADZU 公司 X 射线衍射仪 XRD-6100Lab，日本 SHIMADZU 公司原子吸收光谱仪 AA-6300，日本 HITACHI 公司 H-3000N 扫描电子显微镜，上海博彩有限公司 HZ-03MZR 台式恒温振荡器，美国哈希 Sension1 便携式 pH 测量仪。

1.2 试验方法

分别取一定量的粉煤灰陶粒，然后将不同浓度的溶液加入 150 mL 锥形瓶内，溶液体积均精确控制为 50 mL，并放入预先设好温度的恒温振荡器中进行实验。在内径为 50 mm 的玻璃柱内填入粉煤灰陶粒，填充高度为 200 mm。每次将 250 mL 浓度为 100 mg/L 的含铜溶液缓慢流过填充柱，停留时间为 4 h。完成后测定经过填充柱后溶液的 Cu(Ⅱ)浓度。重复上述试验，直至对 Cu(Ⅱ)无明显吸附效果为止。在同等条件下，与市售普通水处理陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附效果进行对比。

以原子吸收光谱仪测定溶液中的 Cu(Ⅱ)含量，以 X 射线衍射仪分析陶粒的化学组成及结晶度，以扫描电子显微镜观察陶粒的表面形貌。

2 结果与分析

2.1 粉煤灰陶粒原料特性及表面形貌分析

表 1 为粉煤灰陶粒主要组分的成分分析。粉煤灰主要成分以硅氧化物、铝氧化物为主，此外还包括部分 Fe、Ca、Mg、Na、K 等金属氧化物，膨润土成分与粉煤灰类似。

表 1 粉煤灰陶粒主要组分成分分析(%)

原料	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	烧失量
粉煤灰	46.51	34.61	5.08	3.72	0.96	0.93	0.73	5.37
膨润土	58.43	11.26	1.06	1.78	1.50	-	-	-

图 1(封三)为自行研制的粉煤灰陶粒经烧制后的表面形貌。粉煤灰陶粒为近圆球状，表面粗糙且微孔分布丰富，微孔大部分分布在 1~5 μm 之间，以浅微孔居多，也有一定数量的深微孔，部分直达陶粒深处。多孔结构显示其可具备良好的吸附能力。

图 2 为陶粒 XRD 分析谱图。自制陶粒的主要物相为钠钙长石、石英和莫来石，使用 K 值法求算出三者物相质量分数分别约为 57.46%、6.87%、6.46%，陶粒中存在一定数量的玻璃体。陶粒在 950℃下烧成，其硬度很大，筒压强度可达到 6.94 MPa。

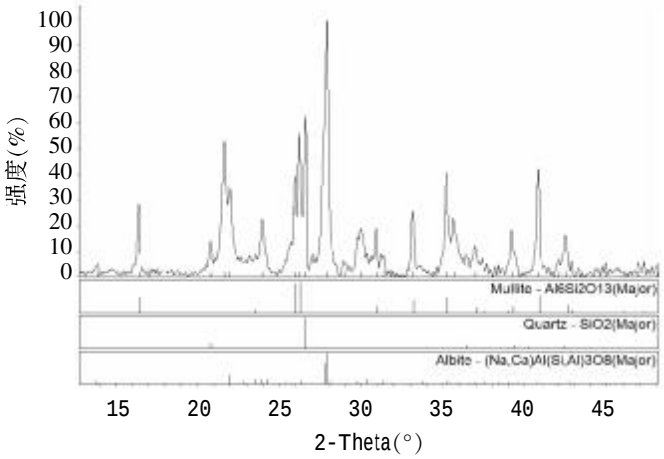


图 2 粉煤灰陶粒的 XRD 谱图

2.2 粉煤灰陶粒用量对 Cu(Ⅱ)吸附效果的影响

分别以陶粒用量为 1.00、2.00、3.00 g 进行 Cu(Ⅱ)吸附试验。吸附试验在 150 mL 锥形瓶中密封进行，Cu(Ⅱ)浓度为 100 mg/L。从图 3A 可以看出，陶粒用量不同对陶粒吸附 Cu(Ⅱ)的效率影响很大，用量为 1.00 g 时在 4 h 内对 Cu(Ⅱ)的吸附率则仅为 45.7%，而陶粒用量

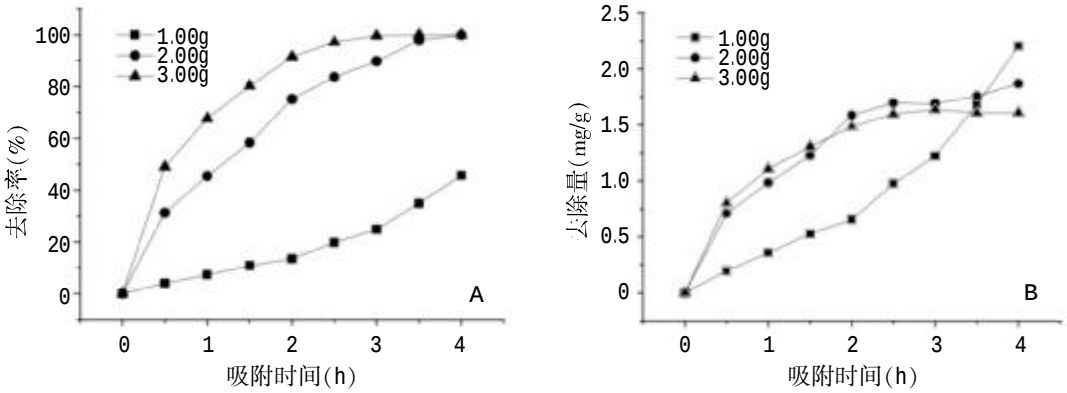


图 3　不同用量时陶粒对 Cu 的吸附效果

为 2.00 g、3.00 g 时对 Cu(Ⅱ)的吸附率在 4 h 内均能达到 100%。图 3B 是不同陶粒用量时，单位质量陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附量，随吸附时间的增加而增加，直至 Cu(Ⅱ)被吸附完全。从实验结果初步判断当吸附时间为 4 h 时，陶粒用量选择 2.00 g 较为适合。

2.3　温度对 Cu 吸附效果的影响

温度通常是影响吸附效果的最重要因素之一。本研究在 15、25、35℃3 个温度下进行等温吸附试验，吸附时间为 4 h，陶粒用量为 2.00 g，Cu(Ⅱ)浓度分别为 50、100、150、200、300、400、500、600、700 mg/L。图 4 显示的是其等温吸附试验结果。可见 4 h 内对 Cu(Ⅱ)有最好吸附效果的是温度 25℃时，其最大吸附量可达到 2.78 mg/g，而 15℃及 35℃时的最大吸附量则分别是 2.19、2.36 mg/g。从总体的试验结果来看，陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附效果由大到小的温度排序大致为 25℃>35℃>15℃。

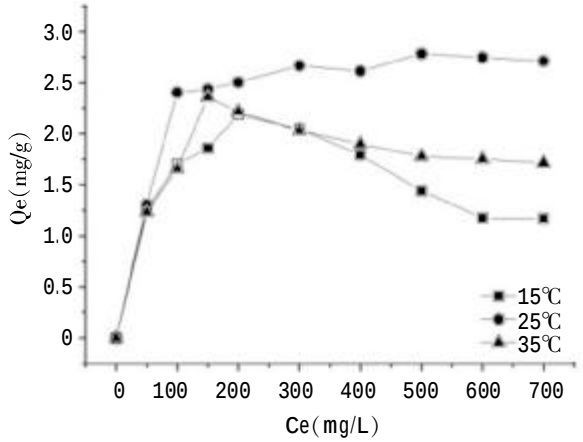


图 4　陶粒在 15℃、25℃及 35℃时对 Cu 的吸附等温线

对以上 3 种温度进行吸附等温线拟合。Langmuir 等温吸附模型和 Freundlich 等温吸附模型的表达形式如下：

$$\frac{Ce}{Qe}=\frac{1}{Q_{max}}Ce+\frac{1}{Q_{max}b} \quad (1)$$

$$\lg Qe=\lg K+\frac{1}{n}\lg Ce \quad (2)$$

式中，Q_{max} 为小球的最大吸附量(mg/g)。

Langmuir 等温吸附模型拟合结果如图 5 所示。3 种温度下的 Ce 与 Qe 之间基本成线性关系，其中 25℃时 Langmuir 等温吸附模型拟合的 R^2 为 0.9961，而 15℃及 35℃时则分别为 0.9418 及 0.9875。相对而言，以 Langmuir 等温吸附模型拟合 25℃时的情况尤为适合。3 种温度下的拟合方程分别为：

Ce/Qe=0.8739Ce -58.4579(15℃)

Ce/Qe=0.3454Ce +11.8281(25℃)

Ce/Qe=0.5820Ce -11.4107(35℃)

而以 Freundlich 等温吸附模型拟合(图 6)时的 R^2 分别为 -0.0835、0.6176、-0.0043，相关性都很小，表明此情况下不适用于 Freundlich 等温吸附模型。

2.4　振荡与静置状态的比较

一般地，振荡体系会加快吸附质在吸附剂中的传质过程，从而有利于吸附[8]。本研究对比了振荡速度为 150 r/min 及静置状态时陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附效果(图 7)。在其他条件一致的情况下，静置时陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附效率明显低于振荡速度为 150 r/min 时，4 h 后其对 Cu 的吸附率约在 30%左右，而振荡时 Cu(Ⅱ)已被吸附完全。静置时陶粒对 Cu(Ⅱ)的单位吸附量 Qe 不足 0.8 mg/g，远低于陶粒对 Cu(Ⅱ)的最大吸附量(2.78 mg/g)。

2.5　陶粒吸附柱去除 Cu(Ⅱ)试验

图 8 为连续使用 5 次时陶粒对 Cu(Ⅱ)的去除效果，可见在前 4 次进行吸附柱去除 Cu(Ⅱ)试验时，其对 250 mL 浓度为 100 mg/L 的 Cu(Ⅱ)溶液有良好的去除效果，对 Cu(Ⅱ)的去除率可达到 90%以上，其中前 2 次的去除率均为 100%，但第 5 次开始对 Cu(Ⅱ)

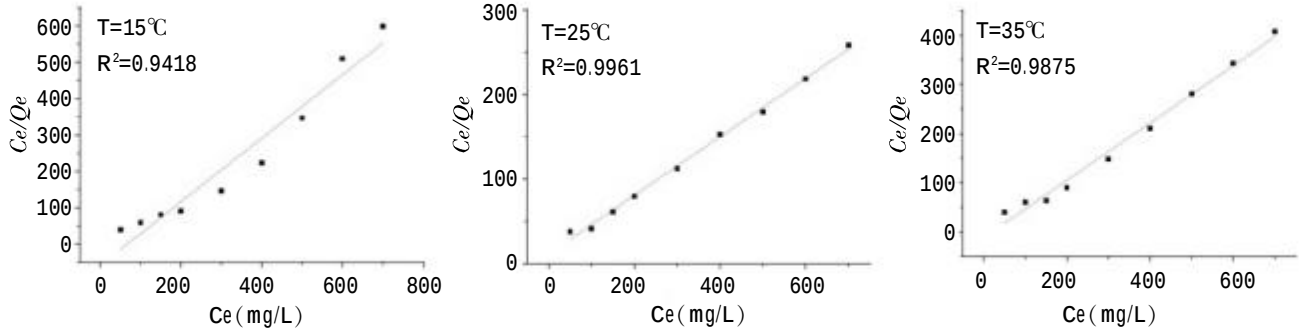


图 5　Langmuir 等温吸附模型拟合结果

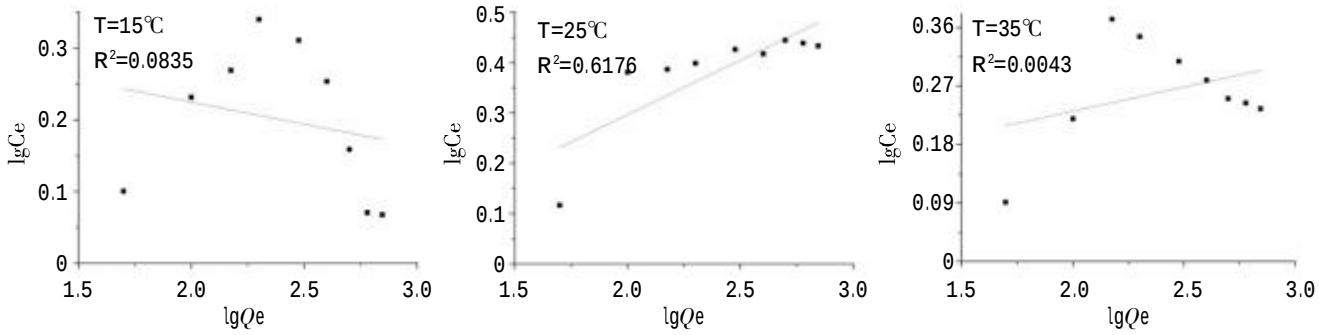


图 6　Freundlich 等温吸附模型拟合结果

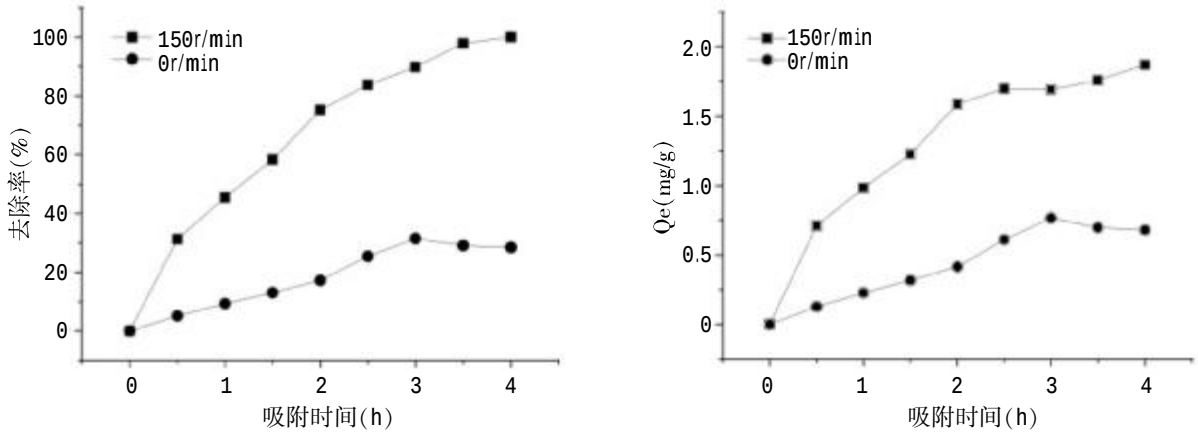


图 7　振荡与静置时陶粒对 Cu(Ⅱ) 的吸附效果对比

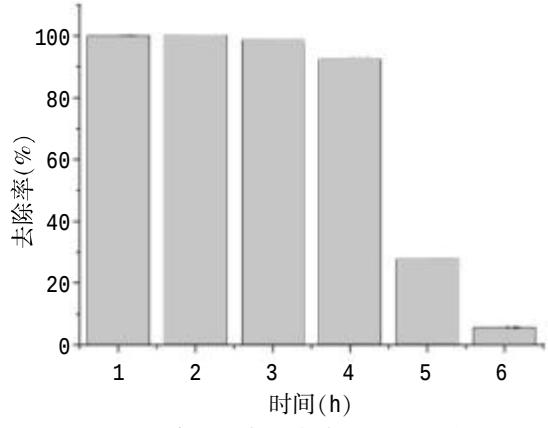


图 8　陶粒吸附柱重复去除 Cu(Ⅱ)试验结果

的吸附率有所降低、为 27.8%,而第 6 次则仅为 5.6%。

2.6　与常规水处理陶粒对 Cu 的吸附效果对比

选择了市售 2 种常规的水处理陶粒与本粉煤灰陶粒进行 Cu(Ⅱ)吸附效果对比,其结果见图 9。常规水处理陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附效果均不明显,4 h 时分别只有 14.6%、6.3%,换算成单位质量的吸附量则分别为 0.35、0.15 mg/g。

3　结论与讨论

3.1　陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附效果

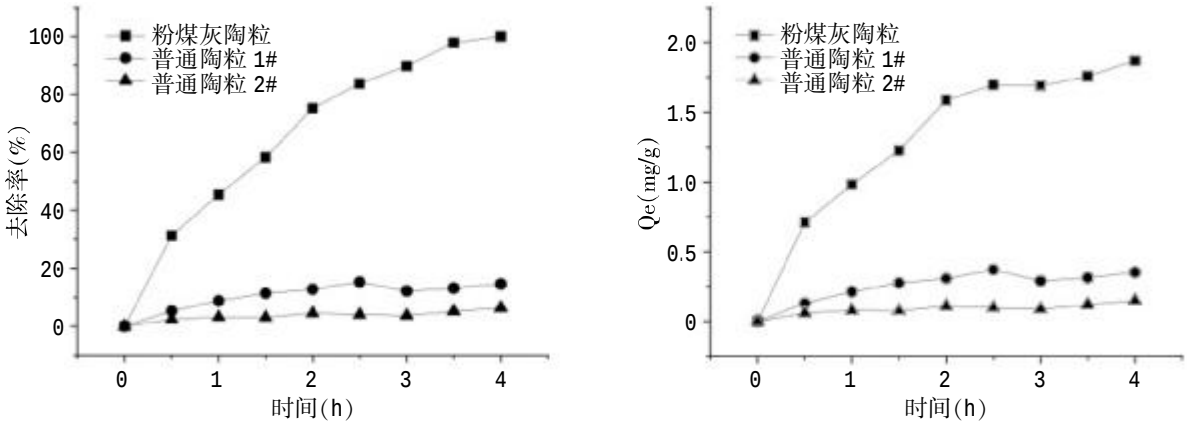


图 9　粉煤灰陶粒与市售常规陶粒去除 Cu 的性能对比

先前一些研究报道中,粉煤灰等吸附剂对 Cu(Ⅱ)的高吸附率均在溶液初始 pH 值较高时获得，而此时 Cu(Ⅱ)与溶液中大量存在的 OH^- 有着明显的共沉淀作用,吸附剂在此过程中对 Cu(Ⅱ)的吸附作用并未真正体现[9,10]。将粉煤灰进行改性后则能有利于 Cu(Ⅱ)的吸附,如曹书勤等[11]以 $Fe(NO_3)_3$ 和 $Al(NO_3)_3$ 为主要原料制备粉煤灰/ 水合金属氧化物复合吸附剂,当吸附剂用量为 20 g/L、溶液 pH 值为 8、吸附时间为 90 min,Cu(Ⅱ) 浓度为 40 mg/L 时对去除率可达 97.8%;吕志江等[12]用高浓度的 HCl 和 H_2SO_4 对粉煤灰进行改性,在 Cu(Ⅱ)初始浓度均为 40 mg/L,pH7,搅拌 3 h,粉煤灰的投加量分别为 12 g/L 的条件下对 Cu(Ⅱ) 的去除率可达到 97.49%。但目前以粉煤灰陶粒去除 Cu(Ⅱ)仍缺乏相关研究。本粉煤灰陶粒在溶液初始 pH 值为 3.5 时仍能获得约 100%的 Cu(Ⅱ)去除率,而常规的水处理陶粒则仅为 15%以下，本粉煤灰陶粒已从单一的生物膜载体功能向多功能化转变,同时具备磷酸盐及 Cu(Ⅱ)的去除功能。陶粒硬度及抗耐磨性都很强,磨损率很低,吸附过程基本在陶粒表面完成。25℃时陶粒对 Cu 的最大单位吸附量为 2.78 mg/g,但当陶粒表层被磨去时,其新的表面可进一步吸附水中的 Cu(Ⅱ),从而可进一步增加其对 Cu(Ⅱ)的吸附量[13]。

3.2　影响陶粒对 Cu(Ⅱ)吸附效果的因素

与其他吸附过程相类似,吸附剂用量较大、振荡速度较高、适宜的温度均有利于陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附[8,14]。从图 4 可以看出,25℃时陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附效果优于 15℃及 30℃时,同时表现为最大吸附量及不同 Cu(Ⅱ)浓度下 4 h 的吸附量均为 25℃时最优。一般认为吸附温度过低时会减缓吸附的速率，而温度过高虽然可加快吸附速率,但同时会降低其平衡吸附量[13,15-16]。对吸附过程而言，加快固液两相之间的传质过程是提高吸附效率的重要手段，试验结果也显示振荡速度为 150 r/min 时其吸附速率及吸附量均明显高于静置时的情况。实际应用中,可通过增大进水流量、提高曝气强度等方式加速溶液中的 Cu(Ⅱ)传递至陶粒。与大多数重金属类似,在高 pH 值时 Cu(Ⅱ)可形成 $Cu(OH)_2$ 等沉淀而去除，研究 pH 值对其去除过程的影响意义不大,故在本文中无涉及此方面内容。

3.3　吸附等温线拟合

陶粒对 Cu(Ⅱ)的吸附过程大致可用 Langmuir 吸附等温模型进行拟合，其相关性 R^2 分别为 0.9418、0.9961、0.9875。以 25℃为例,计算所得 Q_{max} 为 2.79 mg/g,而实测 Q_{max} 为 2.78 mg/g,十分接近,而以 Freundlich 等温吸附模型拟合时则误差较大。吸附等温线的模拟结果表明陶粒对 Cu 的吸附可能是单层吸附,且可能是化学与物理吸附两种作用并存。从其化学组成来看,陶粒中具有 Na_2O、CaO、MgO 等碱性金属氧化物成分,可有利于陶粒对 Cu 的化学吸附；而从其物理结构上看,陶粒表面有大量浅、深微孔,具有比表面积大、孔容丰富等特点,均有利于其吸附溶液中的 Cu(Ⅱ)。

以粉煤灰为主要原料制备了具有良好 Cu(Ⅱ)吸附功能的水处理陶粒，在 25℃、pH 值为 4.5 及振荡速度 150 r/min 条件下,对浓度为 100 mg/L 50 mL 溶液中的 Cu 去除率为 100%，同等条件下普通市售陶粒分别只有 14.6%、6.3%。较大的吸附剂用量、较高的振荡速度及适宜的温度均有利于陶粒对 Cu 的吸附。25℃时粉煤灰陶粒对 Cu 的最大吸附量约为 2.78 mg/g,以 Langmuir 模型拟合所得方程为:$Ce/Qe=0.3454Ce+11.8281$,$R^2=0.9961$。

参考文献:

[1] Wan W S, Fatinathan N S. Adsorption characterization of Pb(Ⅱ) and Cu (Ⅱ) ions onto chitosan-tripolyphosphate beads: Kinetic, equilibrium and thermodynamic studies[J]. Journal of Environmental Management ,2010,(91):958-969.

[2] Taty-Costodes V C, Fauduet H, Porte C, et al. Removal of Cd (Ⅱ) and Pb (Ⅱ) ions, from aqueous solutions, by adsorption onto sawdust of Pinus sylvestris [J].Journal of Hazardous Materials, 2003,105:121-142.

[3] Kurniawan T, Chan G, Lo W, et al. Physico chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals[J]. Chemical Engineering Journal, 2006, 118(1-2):83-98.

[4] Sud D, Mahajan G, Kaur M P. Agricultural waste material as potential adsorbent for sequestering heavy metal ions from aqueous solutions-A review [J]. Bioresource Technology, 2008, 99: 6017-6027.

[5] 徐应明,梁学峰,孙国红,等.海泡石表面化学特性及其对重金属 Pb^{2+}、Cd^{2+}、Cu(Ⅱ)吸附机理研究[J].农业环境科学学报,2009,28(10):2057-2063.

[6] 成杰民,赵丛,解敏丽.两种有机物改性膨润土对 Cu(Ⅱ)和 Zn^{2+} 的吸附-解吸研究[J].离子交换与吸附,2012,28(2):126-134.

[7] 周建兵,吴平霄,朱能武,等.十二烷基磺酸钠(SDS)改性蒙脱石对 Cu(Ⅱ)、Cd^{2+}的吸附研究[J].环境科学学报,2010,30(1):88-96.

[8] 罗隽,庞志华,胡勇有,等.硫酸盐还原颗粒污泥对溶液中 Cr(Ⅵ)去除特性及总 Cr 平衡吸附研究[J].环境科学,2010,31(11):2691-2698.

[9] 周利民,刘峙嵘,黄群武.用粉煤灰吸附废水中的金属离子[J].化工环保,2006,26(6):506-509.

[10] 曾芳,朱洪涛,张慧敏.粉煤灰处理含铜废水的正交实验研究[J].华北电力大学学报,2003,30(6):94-96.

[11] 曹书勤,缑星,刘晶,等.粉煤灰/水合金属氧化物去除工业废水中 Cu(Ⅱ)的研究[J].非金属矿,2012,35(5):66-68.

[12] 吕志江,刘云国,樊霆,等.改性粉煤灰吸附废水中 Cd^{2+}、Pb^{2+}、Cu(Ⅱ)的试验研究[J].非金属矿,2008,31(3):57-59.

[13] 罗沛聪,刘怡,罗隽,等.用于水处理的高效除磷型粉煤灰陶粒滤料的研制[J].环境工程学报,2012,6(11):3949-3954.

[14] 罗隽,胡勇有,仲海涛.烟束曲霉菌丝球对 Cr(Ⅵ)的去除-还原与吸附作用[J].环境科学学报,2007,27(10):1585-1592.

[15] 陈丽萍,司秀荣,李凌云.磷酸活化活性炭对 Cu(Ⅱ)的吸附特征研究[J].生态环境学报,2011,20(2):353-358.

[16] 近藤精一,石川达雄,安部郁夫.吸附科学[M].北京:化学工业出版社,2006.

(责任编辑 白雪娜)

(上接第 158 页)

[5] 许凯扬,刘胜祥,叶万辉.湖北后河自然保护区水丝梨群落研究[J].武汉植物学研究,2002,20(5):359-364.

[6] 魏天兴,赵健,郑江坤,等.退耕还林区水土保持植被恢复及物种多样性特征[J].西北林学院学报,2013,28(1):1-6.

[7] 米勒唐布依斯 D,埃仑伯格 H.植物生态学的目的和方法[M].鲍显诚,张绅,杨邦顺,等译.北京:科学出版社,1986:139-293.

[8] Magurran A E. Ecological Diversity and Its Measurement[M]. New Jersey: Princeton University Press, 1988.

[9] Simpson E H. Measurement of diversity [J].Nature,1949,163: 688.

[10] 钱迎倩,马克平.生物群落多样性的测度方法.生物多样性研究的原理与方法[M].北京:中国科学技术出版社,1994:141-165.

[11] 曹旭平,薛瑶芹,周建云,等.黄土高原子午岭柴松林群落组成及群落结构研究[J].西北林学院学报,2011,26(1):1-7.

[12] 王春玲,郭泉水,谭德远,等.准噶尔盆地东南缘不同生境条件下梭梭群落结构特征研究[J].应用生态学报,2005,16(7):1224-1229.

[13] 郭其强,张文辉,何景峰,等.黄龙山不同白桦林群落结构特征研究[J].西北植物学报,2007,27(1):132-138.

[14] 曾凤,张荣京,陈红锋,等.澳门青洲山翻白叶树群落特征及物种多样性研究[J].西北植物学报,2009,29(8):1684-1691.

[15] 孙儒泳,李庆芬,娄安如,等.基础生态学[M].北京:高等教育出版社,2002:147-149.

[16] 刘金虎,王得祥,王宇超,等.秦岭西水河天然针叶林物种多样性的垂直格局[J].西北林学院学报,2011,26(3):6-11.

[17] 彭少麟,陈章和.广东亚热带森林群落物种多样性[J].生态科学,1983(2):98-104.

[18] 饶显龙,夏祖煌,王丹,等.佛山大浩湖潺槁木姜子群落特征及物种多样性研究[J].浙江林业科技,2013,33(5):19-24.

[19] 张永夏,陈红锋,秦新生,等.深圳大鹏半岛“风水林”香蒲桃群落特征及物种多样性研究[J].广西植物,2007,27(4):596-603.

[20] 冯志立,唐建维,郑征,等.西双版纳热带森林次生演替初期山黄麻先锋群落生物量动态[J].生态学杂志,1999,18(5):1-6.

[21] 孙儒泳,李博,诸葛阳,等.普通生态学[M].北京:高等教育出版社,1993:132-135.

(责任编辑 王玉梅)