

煤炭固废

微波联合碱改性粉煤灰对铬(VI)的吸附性能*

滕菲¹, 张海燕², 齐立强^{1*}

(1. 华北电力大学 环境科学与工程系, 河北 保定 071003; 2. 华电国际电力股份有限公司技术服务分公司, 山东 济南 250014)

摘要:为了强化改性粉煤灰在重金属废水处理中的吸附效果,利用微波联合碱改性的方法,研究微波温度、微波时间、微波功率等制备条件对改性粉煤灰吸附铬(VI)的影响以及吸附等温特性。结果表明,粉煤灰改性的最佳制备条件为:微波功率600 W,微波温度60 °C,微波时间15 min,吸附量达到0.341 mg/g,较改性前提高50%以上。此改性条件下的粉煤灰进行吸附等温的试验研究结果表明,其对铬(VI)的吸附符合Freundlich和Langmuir等温吸附模型,此吸附过程为单分子层吸附。粉煤灰具有较高的经济性,可广泛用于含铬(VI)废水的处理。

关键词:改性粉煤灰;六价铬;吸附性能;制备;吸附剂

中图分类号:X752 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)04-0026-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.005

Research on the Adsorption Performance of Microwave Combined with Alkali Modified Fly Ash for Cr(VI)

TENG Fei¹, ZHANG Haiyan², QI Liqiang¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China; 2. Technical Service Branch of Huadian Power International Corporation Limited, Jinan 250014, Shandong, China)

Abstract: In order to enhance the adsorption effect of modified fly ash in heavy metal wastewater treatment, microwave combined with alkali modification methods was used to study the effects of microwave temperature, microwave time, microwave power and other preparation conditions on the adsorption and the adsorption isotherm characteristic of modified fly ash on Cr(VI). The results showed that the optimal modified fly ash could be obtained under the conditions of microwave power of 600 W, microwave temperature of 60 °C, microwave time of 15 min. The adsorption amount reached 0.341 mg/g, which was more than 50% higher than before modification. The experimental results of adsorption isothermal adsorption of fly ash under this modified condition showed that the adsorption of Cr(VI) accorded with the isotherm adsorption model of Freundlich and Langmuir, and the adsorption process was monolayer adsorption. Fly ash is highly economical and can be widely used in the treatment of wastewater containing Cr(VI).

Key words: microwave-assisted alkali fly ash; Cr(VI); adsorption; preparation; sorbents

* 收稿日期:2018-12-14

基金项目:国家自然科学基金项目(21376072);中央高校基本科研业务费专项资金(2017MS140)

作者简介:滕菲(1994-),硕士研究生,主要从事粉煤灰综合利用研究。

通信作者:齐立强(1976-),博士,教授,主要从事环境工程领域研究。

前言

粉煤灰是一种疏松多孔的固体混合物,它主要由 Fe_2O_3 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 CaO 等组成。粉煤灰中富含硅铝基玻璃微珠,这些形状不规则的玻璃颗粒含有大小不尽相同的小气泡和微小的活性通道,使得粉煤灰呈多孔结构,具有很大的比表面积^[1-5]。粉煤灰因其独特的物理化学性质以及低廉的成本,在水处理方面有很大的应用前景^[6-13],其可用于去除有毒金属离子、无机阴离子以及有机化合物,尤其是对重金属离子的吸附,改性粉煤灰表现出很优异的吸附性能^[14-16],与 Freundlich 等温线模型基本一致^[17,18]。因此,寻求更有效的改性方法来提升粉煤灰的吸附性能越来越受到专家学者的关注。

粉煤灰表面具有致密的玻璃态结构,构成了一层表面保护膜,这抑制了粉煤灰潜在的化学活性。当用碱对粉煤灰改性时,粉煤灰会与碱性活化剂发生凝硬反应,破坏了粉煤灰表面的硅酸盐玻璃网络,增大了粉煤灰的比表面积,提高了粉煤灰的活性^[19]。粉煤灰颗粒表面上羟基中的氢离子会在碱性环境中发生解离,从而使颗粒表面部分带负电荷。因此,废水中带正电荷的金属离子污染物就容易被吸附在改性后的粉煤灰颗粒表面^[20]。

铬是一种有毒重金属。铬的毒性与其存在的价态有关,六价铬的毒性比三价铬的毒性高 100 倍,并且易被人体吸收且在体内蓄积。铬污染来源于铬矿加工、金属表面处理、皮革鞣制、染色等行业的废水排放^[21-23]。目前,国内外处理含铬废水的方法主要有离子交换法、还原沉淀法、电解法和吸附法等。离子交换法处理效果好,但是其成本高且不适用于大水量工业废水的处理;还原沉淀法是目前处理含铬废水应用最为广泛的方法,易操作但还原剂药品需求量大,能耗高;电解法、膜分离法等方法也均因投资成本较高等缺点没有被广泛应用于工业废水的处理^[24,25]。因此,如何高效且经济的处理含铬废水也是现如今环保工作者研究的热点问题。

近年来,微波技术因其高效、清洁、无污染而被广泛用于材料工程领域^[26]。微波可以加快化学反应速率,改变化学反应进程,缩短反应时间。微波与改性材料相互作用,会形成新的作用机理,起到辅助材料改性的作用。单纯地用碱作为改性剂改性粉煤灰,只能解除粉煤灰部分玻璃体的网络聚合,而微波

辅助加热则能克服这个劣势。在化学改性的过程中微波的辅助加热可以使粉煤灰内外受热,最终促进粉煤灰玻璃网状聚合物的裂解^[27]。与此同时,微波辐照可以改变粉煤灰表面的化学性质,使粉煤灰的吸附混凝能力显著提升。唐学红等^[28]用微波-碱协同改性的粉煤灰为吸附剂处理含镉废水,当改性粉煤灰投加量为 1.5 g、吸附时间 1.5 h、pH = 7、反应温度为 20℃ 时,镉离子的去除率可达 91.98%。段小月^[29]等利用废水浸泡、酸改性、碱改性及加热四种方法分别对粉煤灰进行改性,研究四种改性粉煤灰对刚果红的吸附,结果表明,碱改性的粉煤灰对于刚果红的吸附效果最好,去除率可达 87.52%,并指出碱改性粉煤灰的吸附过程符合 Langmuir 吸附等温模型和 Freundlich 等温吸附等温模型。徐姝颖^[30]利用 20% 氢氧化钠对粉煤灰进行改性,处理 10 mg/L 的含铬废水,铬吸附量可达 0.177 mg/g。上述研究表明,碱改性的方法的确可使粉煤灰的吸附性能提升,但为使反应更加充分,湿法碱改性一般需要改性溶液与粉煤灰长时间的搅拌、陈化;而干法碱改性则需要改性剂和粉煤灰在高温下煅烧,消耗大量热能。本研究利用微波联合碱改性粉煤灰的方法,无需高温煅烧或长时间室温陈化,节约热能,节省时间,使粉煤灰的制备过程更加快速高效,并探讨制备条件对改性粉煤灰吸附性能的影响。

1 试验部分

1.1 仪器和试剂

本试验中采用的粉煤灰取自山东邹城电厂,其 XRF 化学组成的分析结果见表 1,从表中可以看出, SiO_2 、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 三种氧化物的含量合计高达 80% 以上。铬(VI)溶液为重铬酸钾溶于蒸馏水中稀释至所需倍数而得;硫酸、磷酸、氢氧化钠、重铬酸钾、丙酮、二苯基碳酰二肼等药品均为分析纯,所用试验用水为二次蒸馏水。

表 1 粉煤灰的化学成分
Table 1 Chemical composition of fly ash

化学成分	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	CaO	TiO_2
含量/%	54.10	17.50	11.60	11.30	2.69
化学成分	K_2O	MgO	BaO	MnO	Others
含量/%	1.18	0.19	0.16	0.13	1.15

试验仪器:ZSX Primus II 型 X 射线荧光光谱仪(日本理学株式会社)、JSM-6390A 扫描电子显微

镜(日本电子株式会社)、SA 3100 比表面积分析仪(美国贝克曼库尔特有限公司)、XH-MC-1 祥鹤试验室微波合成反应仪(北京祥鹤科技发展有限公司)、ZDF6050 真空干燥箱(上海齐欣科学仪器有限公司)、HY-4 调速多用振荡器(常州润华电器有限公司)、T6 新世纪紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司)。

1.2 改性粉煤灰的制备

粉煤灰的预处理:剔除粉煤灰中的块状杂质,过 100 目(0.15 mm)筛,置于干燥箱中在 $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干 2 h,取出后冷却至室温,存放于干洁的密闭玻璃容器中备用。

称取一定质量经过预处理的粉煤灰,将其与质量分数为 10% 的 NaOH 溶液,按照质量比 1:5 混合均匀,将混合物放置在微波合成仪中,按照不同的制备条件,在一定功率,一定温度下进行 5~25 min 短时间的微波辐照。将经过微波辐照的混合物取出,静置约 2 h 冷却至室温后,用二次蒸馏水洗涤三遍,经干燥,冷却,研磨后,即得到不同条件下微波联合碱改性的粉煤灰吸附剂样品若干。用改性的粉煤灰样对铬(VI)水溶液进行吸附试验。

1.3 铬(VI)吸附试验

铬吸附试验均在调速振荡器中进行。含铬溶液均为重铬酸钾溶于水稀释到所需倍数而得。硫酸和氢氧化钠用以调节溶液 pH 值。铬含量的测定采用二苯基碳酰二肼分光光度法。

(1) 制备条件吸附试验

准确称取改性粉煤灰吸附剂 0.5 g 于 150 mL 锥形瓶中,加入浓度为 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铬(VI)溶液 50 mL。在振荡器上振荡吸附 1 h 后,静置 0.5 h,取上清液经 $0.45 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜过滤测定其溶液中铬(VI)的浓度。

(2) 吸附等温试验

准确称取改性粉煤灰吸附剂 0.5 g 于 150 mL 锥形瓶中,加入从低到高不同浓度的铬(VI)溶液 50 mL。在振荡器上振荡吸附 2 h 后,静置 0.5 h,取上清液经 $0.45 \text{ } \mu\text{m}$ 滤膜过滤测定其溶液中铬(VI)的浓度。

2 结果与讨论

从微波辅助碱改性粉煤灰前后的 SEM 的对比图

像(图 1、图 2)可以看出,微波联合碱改性的方法极大地改变了粉煤灰的表面形态和表面结构,改性之后的粉煤灰表面更加粗糙不平,多孔结构更加明显。

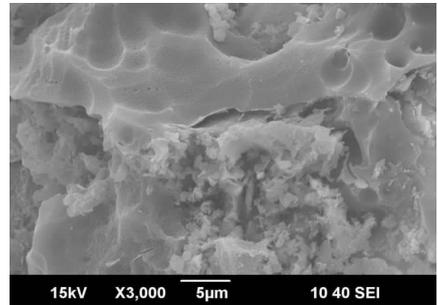


图 1 原状粉煤灰 SEM 图像
Fig. 1 SEM images of raw fly ash

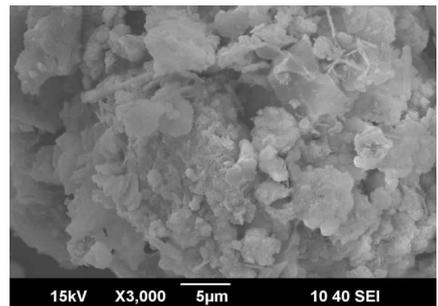


图 2 改性粉煤灰 SEM 图像
Fig. 2 SEM images of modified fly ash

2.1 温度对吸附效果的影响

在微波功率 600 W、微波时间 15 min 条件下,改变微波温度($50 \text{ }^\circ\text{C}$, $60 \text{ }^\circ\text{C}$, $70 \text{ }^\circ\text{C}$, $80 \text{ }^\circ\text{C}$, $90 \text{ }^\circ\text{C}$)制得一系列改性粉煤灰样品,用其处理 50 mL 浓度为 10 mg/L 的铬(VI)废水,振荡吸附 1 h,试验结果如图 3 所示。

由图 3 中可知,随微波温度的升高,所制的改性粉煤灰对铬(VI)的吸附量先呈上升趋势,在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 达到最高值,这是因为微波可以使粉煤灰内外均受热,外部温度上升促进了碱硅反应,使得与碱反应的粉煤灰表面更加粗糙,比表面积增大。 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下改性的粉煤灰比表面积由未改性(灰样 1)时的 $6.104 \text{ m}^2/\text{g}$ 增加到 $16.870 \text{ m}^2/\text{g}$,在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 时更提高到 $20.185 \text{ m}^2/\text{g}$ 。这是因为内部受热则降低了反应活化能,加速破坏粉煤灰结构中的硅氧键和铝氧键,增加活性位点^[27],这都使得改性后的粉煤灰吸附能力增强。在 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,改性粉煤灰的比表面积下降到 $18.077 \text{ m}^2/\text{g}$,其比表面积和吸附性能并没有随着改性温度上升而上升,主要因为当温度过高时,

粉煤灰的内部结构因高温失水而收缩成密度大、孔隙率低、比表面积小的颗粒,进而使得其吸附能力降低^[31]。温度继续升高,粉煤灰的吸附性能快速下降。因此,后续试验采用微波辐射温度为 60 ℃。

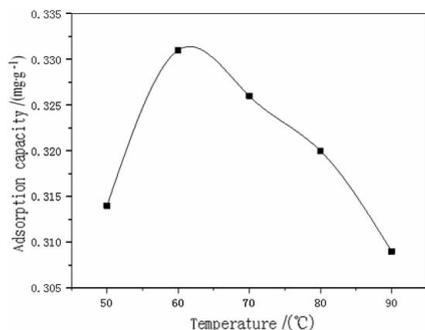


图3 微波温度对改性粉煤灰吸附铬(VI)的影响
Fig.3 Effect of microwave temperature on adsorption of Cr(VI) by modified fly ash

2.2 微波功率对吸附效果的影响

在微波温度 60 ℃、微波时间 15 min 条件下,改变微波功率(500 W,600 W,700 W,800 W,900 W)制得一系列改性粉煤灰样品,用其处理 50 mL 浓度为 10 mg/L 的铬(VI)废水,振荡吸附 1 h,试验结果如图 4 所示。

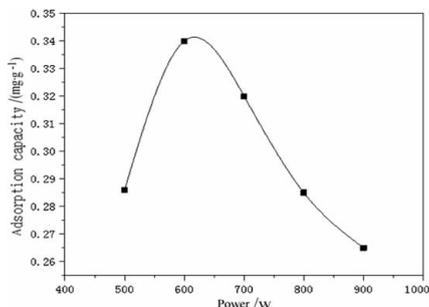


图4 微波功率对改性粉煤灰吸附铬(VI)的影响
Fig.4 Effect of microwave power on adsorption of Cr(VI) by modified fly ash

由图 4 可知,随着微波功率增大,改性粉煤灰对铬(VI)的吸附量大幅上升,在 600 W 条件下,制得的改性粉煤灰吸附效果最好,但随着微波功率的继续增大,吸附量又呈下降趋势。

这是由于粉煤灰中的极性化合物可以不同程度的吸收微波,并将微波能量转化为热能,促进硅铝键、硅氧键和铝氧键的断裂,增加了吸附位点,增强了粉煤灰的活性,微波功率由 500 W 升高至 600 W 时,改性粉煤灰比表面积由 15.312 m²/g 增加到 20.185 m²/g,吸附能力明显增强。而功率过高时,

多孔状的玻璃微珠结构就会随着碱与灰的反应剧烈而收缩成颗粒状,活性通道减少,孔隙率降低,吸附效果不佳,微波功率由 600 W 升高至 700 W 时,改性粉煤灰的比表面积反而下降至 17.368 m²/g,吸附能力也随之下降。因此,微波功率为 600 W 时制得的改性粉煤灰吸附性能最好,后续试验中采用微波功率为 600 W。

2.3 微波时间对吸附效果的影响

在微波温度 60 ℃、微波功率 600 W 条件下,改变微波时间(5 min,10 min,15 min,20 min,25 min)制得一系列改性粉煤灰,用其处理 50 mL 浓度为 10 mg/L 的铬(VI)废水,振荡吸附 1 h,试验结果如图 5 所示。

由图 5 可知,随着微波时间增长,粉煤灰对铬(VI)的吸附量先上升后下降,经过 15 min 微波辐照的改性粉煤灰吸附效果最佳。主要由于微波可加快活化反应速率,使反应体系温度在短时间内迅速升高,一定时间的微波辐照降低了粉煤灰与碱之间反应的活化能,促进了化学反应的进行,加速破坏网状聚合物。微波时间由 10 min 增加至 15 min 时,改性粉煤灰的比表面积由 16.440 m²/g 增加到 20.185 m²/g,吸附能力也大大增加,而经过 20 min 微波辐照的粉煤灰比表面积又下降到了 17.656 m²/g,这是由于微波辐照的时间过长,导致粉煤灰的多孔结构变为密度大、孔隙率低的小球体,从而降低了粉煤灰的吸附能力。因此,微波辐照时间为 15 min 时,制得的改性粉煤灰吸附性能最好。

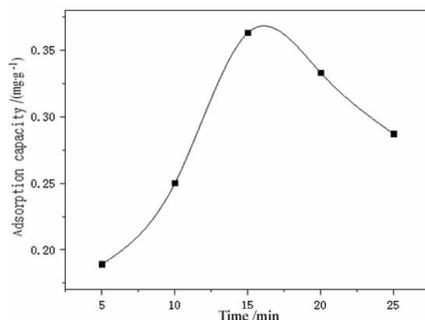


图5 微波时间对改性粉煤灰吸附铬(VI)的影响
Fig.5 Effect of microwave time on adsorption of Cr(VI) by modified fly ash

2.4 改性粉煤灰对铬(VI)的吸附等温特性

吸附等温曲线是指在一定温度下溶质分子在两相界面上进行吸附过程达到平衡时它们在两相中浓

度之间的关系曲线。通过对等温吸附线的拟合分析,不仅可以了解改性粉煤灰对铬(VI)的吸附特征,还能够判断吸附现象的本质,加深对吸附机理的理解。在环境化学中,最常用吸附等温线是 Freundlich 吸附等温线和 Langmuir 吸附等温线。

(1) Freundlich 吸附等温模型的经验公式^[32]:

$$Q_e = KC_e^{1/n} \tag{1}$$

Q_e ——平衡吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;

C_e ——平衡浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

n, K ——经验常数。

将此公式改写为线性形式之后为:

$$\log Q_e = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \tag{2}$$

(2) Langmuir 吸附等温模型的经验公式^[33]:

$$\frac{1}{Q_e} = \frac{1}{X_m b} \cdot \frac{1}{C_e} + \frac{1}{X_m} \tag{3}$$

Q_e ——平衡吸附量, mg/g ;

C_e ——平衡浓度, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;

X_m ——饱和吸附量, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$;

b ——与吸附能相关的常数。

在不同浓度的铬(VI)溶液中,分别测得达到平衡时各溶液中铬(VI)的浓度及改性粉煤灰对铬(VI)的吸附量,绘制出吸附等温线(图6)。图7和图8分别是由改性粉煤灰在不同浓度的铬离子溶液中的平衡吸附量拟合出的 Freundlich 吸附等温线和 Langmuir 吸附等温线。表2列出了改性粉煤灰吸附铬(VI)的两种吸附等温模型下的经验公式以及相关系数。最大吸附量 $X_m = 5.976 2 \text{ mg}/\text{g}$, 吸附指数 $1/n = 0.813 0, 1 < 1/n < 2$, 说明改性粉煤灰可吸附六价铬离子。从相关系数 0.993 0 和 0.988 8 来看, 改性粉煤灰对于铬(VI)的吸附曲线与 Freundlich 吸附等温线和 Langmuir 吸附等温线十分吻合, 表明改性粉煤灰对于铬(VI)的吸附属于单分子层吸附。

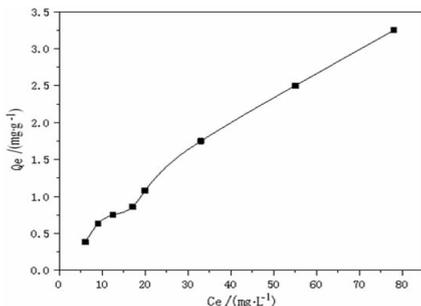


图6 改性粉煤灰吸附铬(VI)的吸附等温线
Fig.6 Adsorption isotherm of Cr(VI) by modified fly ash

表2 Freundlich 和 Langmuir 等温吸附模型相关参数
Table 2 Parameters of Freundlich and Langmuir isothermal adsorption model

Freundlich isotherm			Langmuir isotherm		
$\log Q_e = 0.813 0 \log C_e - 1.020 0$			$1/Q_e = 15.368 4/C_e + 0.043 6$		
K	$1/n$	R	X_m	b	R
0.095 5	0.813 0	0.993 0	5.976 2	0.117 7	0.988 8

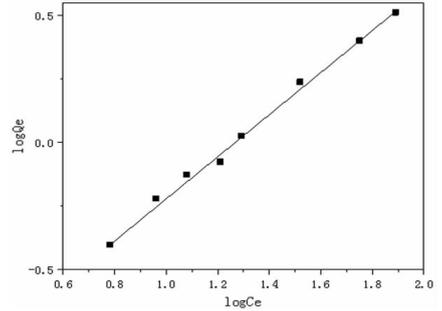


图7 Freundlich 等温吸附模型
Fig.7 Freundlich isotherm of adsorption on Cr(VI)

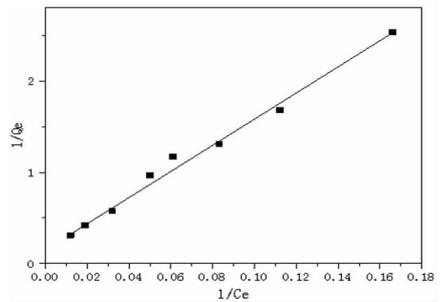


图8 Langmuir 等温吸附模型
Fig.8 Langmuir isotherm of adsorption on Cr(VI)

2.5 与其它吸附剂比较

由上述铬(VI)吸附试验可知,粉煤灰改性的最佳制备条件为:微波功率 600 W,微波温度 60 ℃,微波时间 15 min。表3为改性粉煤灰、未改性粉煤灰及沸石对铬(VI)的吸附量,可以看出未经改性的粉煤灰比表面积十分有限,仅为 6.104 m^2/g ,而经过微波联合碱改性后的粉煤灰比表面积有明显提升,吸附量也有显著提高。最佳改性条件下,比表面积可提升到 20.185 m^2/g 。改性后的粉煤灰与沸石相比较,比表面积虽然相差较大,但改性粉煤灰具有较高的经济性,因此可以广泛用于处理含铬(VI)的废水。

表3 不同吸附剂对铬(VI)的吸附量
Table 3 The adsorption amount of Cr(VI) with different adsorbent

吸附剂	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	吸附量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
未改性粉煤灰	6.104	0.225
改性粉煤灰	20.185	0.341
沸石	600	2.4

3 结论

本文围绕微波联合碱改性粉煤灰的制备条件及改性后粉煤灰对铬(VI)的吸附进行了试验研究。试验探讨了在不同温度、不同微波时间、不同微波功率的条件下所制得的粉煤灰吸附剂对铬(VI)的吸附性能,从而得出粉煤灰的最佳制备条件。试验结果表明:在微波功率 600 W、微波温度 60 ℃、微波时间 15 min 的条件下所制得的改性粉煤灰对铬(VI)的吸附效果最佳。此外,微波联合碱改性的粉煤灰对铬(VI)的吸附曲线与 Freundlich 模型和 Langmuir 模型十分吻合,线性相关系数分别达到 0.993 0 和 0.988 8,表明此吸附过程是单分子层吸附。

参考文献:

- [1] 李少辉, 赵澜, 包先成, 等. 粉煤灰的特性及其资源化综合利用[J]. 混凝土, 2010(4):76-78.
- [2] 石大鑫. 粉煤灰的综合利用[J]. 矿产保护与利用, 1992(3):52-53.
- [3] Blissett R S, Rowson N A. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash[J]. Fuel, 2012, 97(7):1-23.
- [4] Wang S, Wu H. Environmental-benign utilization of fly ash as low-cost adsorbents[J]. J Hazard Mater, 2006, 136(3):482-501.
- [5] Scheetz B E, Earle R. Utilization of fly ash[J]. Curr opin solid St M, 1998, 3(5):510-520.
- [6] 肖翠微. 粉煤灰在水处理领域的应用进展[J]. 洁净煤技术, 2016, 22(4):45-51.
- [7] 黄琴, 吉伟英, 陈端伟. 改性粉煤灰在废水处理中的应用进展[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2008, 8(1):71-75.
- [8] Iyer, R. S, Scott, et al. Power station fly ash—a review of value-added utilization outside of the construction industry[J]. Fuel & energy abstra, 2001, 31(3):217-228.
- [9] 王占华, 周兵, 孙雪景, 等. 粉煤灰改性及其在废水处理中的应用现状研究[J]. 能源环境保护, 2014, 28(4):1-5.
- [10] 张凡, 欧阳平, 张贤明, 等. 粉煤灰改性及其吸附应用研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(4):747-750.
- [11] 于谦. 天然高钙粉煤灰的特性及其应用研究[J]. 矿产保护与利用, 1997, 56(3):48-52.
- [12] 李超, 王丽萍, 郭昭华, 等. 粉煤灰提铝后尾渣合成 13X 分子筛及其对 Pb^{2+} 吸附性能的研究[J]. 矿产保护与利用, 2018, 218(6):104-108.
- [13] 范剑明, 吉仁塔布, 李诚诚, 等. 聚硅酸铝铁絮凝剂的制备

- 及其性能研究[J]. 矿产保护与利用, 2012(4):37-41
- [14] Keng P S, Lee S L, Ha S T, et al. Removal of hazardous heavy metals from aqueous environment by low-cost adsorption materials[J]. Environ chem lett, 2014, 12(1):15-25.
 - [15] 胡友彪, 张慰, 王世超. 粉煤灰对重金属废水的吸附性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(7):96-98.
 - [16] Cho H, Oh D, Kim K. A study on removal characteristics of heavy metals from aqueous solution by fly ash[J]. J Hazard Mater, 2005, 127(1-3):187-195.
 - [17] 彭荣华, 陈丽娟, 李晓湘. 改性粉煤灰吸附处理含重金属离子废水的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(1):48-50.
 - [18] 韩晓晶, 张卓, 高淑娟, 等. 粉煤灰的改性及在水处理中的研究进展[J]. 山东化工, 2016, 45(6):43-45.
 - [19] 张凡, 欧阳平, 张贤明, 等. 粉煤灰改性及其吸附应用研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(4):747-750.
 - [20] 石建稳, 陈少华, 王淑梅, 等. 粉煤灰改性及其在水处理中的应用进展[J]. 化工进展, 2008(3):326-334, 347.
 - [21] Wang Jianlong. Removal of Cr(VI) from aqueous solution by coal flyash adsorption I: Characteristics of chromium adsorption on flyash[J]. Toxicol environ chem, 1999, 68(1):53-62.
 - [22] Wang Jianlong. Removal of Cr(VI) from aqueous solution by coal flyash adsorption II: Kinetics of chromium adsorption on flyash[J]. Toxicol environ chem, 1999, 68(1-2):63-69.
 - [23] G. P. Dasmahapatra, T. K. Pal, A. K. Bhadra, et al. Studies on separation characteristics of hexavalent chromium from aqueous solution by fly ash[J]. Sep Sci technol, 1996, 31(14):2001-2009.
 - [24] 张小庆, 王文洲, 王卫. 含铬废水的处理方法[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(1):111-113.
 - [25] 闫旭, 李亚峰. 含铬废水的处理方法[J]. 辽宁化工, 2010, 39(2):143-146.
 - [26] 欧阳平, 张凡, 张贤明, 等. 微波辅助改性材料的研究进展[J]. 应用化工, 2016, 45(1):156-158.
 - [27] 黄卡玛, 杨晓庆. 微波加快化学反应中非热效应研究的新进展[J]. 自然科学进展, 2006, 16(3):273-279.
 - [28] 唐学红, 肖先举. 微波-碱协同改性粉煤灰处理含镉废水的研究[J]. 化工技术与开发, 2018, 47(9):51-53.
 - [29] 段小月, 曹红丽, 刘伟, 等. 粉煤灰的改性及对刚果红的吸附[J]. 化工环保, 2013, 33(4):294-298.
 - [30] 徐姝颖, 陈华梅, 贾云雪. 氢氧化钠改性粉煤灰处理含铬废水的研究[J]. 精细石油化工进展, 2011, 12(4):35-37.
 - [31] 郭永龙, 王焰新, 蔡鹤生, 等. 水热条件下利用微波加热从粉煤灰合成沸石研究[J]. 地球科学, 2003(5):517-521.
 - [32] Langmuir I. The constitution and fundamental properties of solids and liquids[J]. J Am Chem Soc, 1916, 38(11):2267.
 - [33] Bellot J C, Condoret J S. Modelling of liquid chromatography equilibria[J]. Process biochem, 1993, 28(2):365-376.

引用格式:滕菲,张海燕,齐立强.微波联合碱改性粉煤灰对铬(VI)的吸附性能[J].矿产保护与利用,2019,39(4):26-31.

TENG Fei, ZHANG Haiyan, QI Liqiang. Research on the adsorption performance of microwave combined with alkali modified fly ash for Cr(VI)[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):26-31.