

白立记,苏秀娟,林金娇,等. 甘蔗渣基活性炭微波制备试验研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):268-271,277.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.01.050

甘蔗渣基活性炭微波制备试验研究

白立记,苏秀娟,林金娇,马少健

(广西大学资源环境与材料学院,广西南宁 530004)

摘要:首先通过同步暴露吸波能力测试法探讨甘蔗渣和氯化锌预处理后甘蔗渣的吸波能力,其次运用正交试验方法探讨各因素对甘蔗渣基活性炭产率的影响。结果表明,相同的微波加热时间和微波功率,物料质量增大,物料吸收微波能力也会增大;粗颗粒的物料比细颗粒的物料吸收微波能力好;从吸波能量角度来说,甘蔗渣及氯化锌预处理后的甘蔗渣均为弱吸波物质。氯化锌的预处理时间是影响活性炭产率的主要因素,甘蔗渣基活性炭微波制备工艺较优条件为氯化锌与甘蔗渣质量比为 1:1,浸泡时间为 12 h,蔗渣干质量为 10 g,微波功率为 500 W,热解温度为 400 ℃,保温时间为 10 min,氮气流量为 100 cm³/min,在此条件下,甘蔗渣基活性炭产率为 83%。

关键词:甘蔗渣;微波;活性炭;氯化锌法;正交试验;工艺优化

中图分类号:TQ424.1⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2020)01-0268-04

甘蔗渣是制糖的一种副产品,是一种可持续发展的生物质能源。我国是仅次于巴西和印度的第三大甘蔗种植国,每年约有 2 000 万 t 甘蔗渣。甘蔗渣中含有大量的纤维素、木质素、半纤维素等天然高分子物质,对其在作为燃料发电、饲料、食用菌栽培、功能性食品开发、生物化学液化、制浆造纸、吸附材料、合成树脂、人造板材、绿色化学品、绿色包装材料、生物质燃料开发等方面进行了大量的研究工作。甘蔗渣具有来源集中、产量大、收集简单、运输半径小,而且甘蔗渣成分具有相对稳定、性质均一等特点^[1]。但我国对甘蔗渣的利用程度和水平平均比较低,约 15% 的甘蔗渣用于制作纸浆,85% 的蔗渣作为锅炉燃料或者废弃,不仅造成资源浪费,还严重污染环境。因此,甘蔗渣的高效绿色综合利用是甘蔗制糖企业发展循环经济、提高经济效益、实现糖业可持续发展的重要环节。

微波是一种新型绿色能源,因其对强吸波物质加热升温速率快、热效率高、环保可控等优点引起蔗渣综合利用方面国内外学者的普遍关注,有学者认为微波热解是实现甘蔗渣资源化、能源化完全利用的一个有效途径。

活性炭是一种粉末状或颗粒状的固体,是从含碳物质中经过碳化和活化等工序处理后,所制得的一种具有强吸附性能的炭。制备活性炭的方法有很多种,包括物理法、化学法,化学法最主要是采用高浓度的磷酸和氯化锌等化学试剂作为活化剂对甘蔗渣进行炭化和活化,从而得到成品^[2-3]。用甘蔗渣制备活性炭,开辟了活性炭原料来源的新途径,实现了甘蔗渣资源的有效再生利用。

罗亚楠等研究了磷酸微波活化法在不同操作条件下制备秸秆基活性炭^[4]。杨晓庆等以甘蔗渣为原料,在氯化锌预处理的基础上微波辐射制备活性炭,试验获得活性炭最终产率达到 32.1% 以上,碘吸附值为 1 133.59 mg/g,亚甲基蓝吸附值为 322.5 mg/g,比表面积为 1 131.7 m²/g,孔体积为 0.85 cm³/g,孔径为 3.26 nm^[5]。吴文炳等以甘蔗渣为原料,以氯化锌、磷酸和氢氧化钠为活化剂,微波制备活性炭吸附剂,获得的活性炭性能优于国家一级品指标^[6]。蒋卉等对甘蔗渣氯化锌微波法制备活性炭进行了研究,将甘蔗渣与氯化锌溶液浸泡一段时间后,移至坩埚中,在微波发生装置内完成炭化和活化过程,将产物用 10 倍体积的盐酸进行酸洗,然后再水洗至中性,再进行烘干,即得成品活性炭^[7]。氯化锌微波法相对于磷酸法和碱法制备甘蔗渣活性炭效益较高^[7]。白晓波等将甘蔗渣浸渍在酸性助剂浓度为 15%,添加剂浓度为 3% 的溶液中,浸泡若干小时后,用功率为 600 W 的微波处理 5~10 min,可使活性炭的得率达 64.2%,活性炭对粗

收稿日期:2018-10-24

基金项目:国家自然科学基金(编号:51464003)。

作者简介:白立记(1991—),男,广西贺州人,博士研究生,主要从事微波冶金方面的研究。E-mail:782180407@qq.com。

通信作者:苏秀娟,博士,副教授,硕士研究生导师,研究方向为矿物资源化学提取与综合利用。E-mail:349788570@qq.com。

糖浆脱色率达 74.8%, 对清汁脱色率达 85.3%^[8]。

由此可知,许多学者对甘蔗渣微波制备活性炭进行大量研究,但主要侧重于制备过程各影响因素的考察,包括物料种类和粒径、微波功率、添加物种类及比例等,以及制备后产品性能表征。针对微波加热过程甘蔗渣吸收微波特性、微波在活性炭制备中所起的作用等探讨的非常少,而这些问题的研究对于微波热解过程非常重要;基于此,本试验以广西某糖厂甘蔗渣为研究对象,首先系统研究甘蔗渣在微波场中的微波吸收行为,其次运用正交试验方法探讨微波辅助制备甘蔗渣基活性炭的工艺条件,以期为后续深入系统研究微波辅助制备活性炭的工艺和机制奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

主要试验材料为甘蔗渣,广西某糖厂提供。

主要试剂有盐酸[重庆川东化工(集团)有限公司化学试剂厂]、氯化锌(分析纯,广东光华科技股份有限公司)、磷酸二氢钠(分析纯,成都市科龙化工试剂厂)、磷酸二氢钾(分析纯,国药集团化学试剂有限公司)、亚甲基蓝(成都市科龙化工试剂厂)。

主要设备有 EV025LC7 - NR 家用平板微波炉(美的公司)、CY - PY1100C - M 微波热解炉(湖南长仪微波科技有限公司)、101A - 1 数显电热鼓风干燥箱(上海浦东荣丰科学仪器有限公司)、DE - 3003 普通 K 型数显测温仪(台湾得益公司)、UA - 4802 紫外分光光度计(上海尤尼柯有限公司)、UP5200H 超声波清洗器(南京垒君达超声电子设备有限公司)、JA1003N 电子天平(上海精密科学仪器有限公司)、SHA - B 水浴恒温振荡器(金坛市顺华仪器有限公司)、CY - PY1100C - M 微波热解仪(湖南长仪微波科技有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 甘蔗渣吸收微波能力测试试验 本试验采用笔者所在课题组发明的同步暴露竞争吸收微波能力测试方法,测试物料之间吸收微波能力大小,同步暴露竞争吸收微波测试设备也称为中间介质质量热法测试^[9-10]。

测试方法:将装载物料用的坩埚置于微波炉炉底中心,在坩埚上放置隔热板,再将装载水的塑料盒置于隔热板上方。该方法称为中间介质质量热法,即通过测量中间介质水所吸收的微波能量来间接

反映物料吸收能力大小的方法。

测试、计算步骤:假设在 t 时间内微波输出的微波能量恒定,记为 W_{OM} 。 Q_{TM} 和 Q_w 分别为被测物质、中间介质水同时置于同一微波系统时,在 t 时间内吸收的微波能量; Q_L 为微波腔体内壁耗损、容器壁耗损及其他形式耗损的总损耗能量。(1)当没有测试物料,只有中间介质水在腔体内时,水所吸收的微波能量 Q_{w-1} 为

$$Q_{w-1} = mc(t_2 - t_1) + Q_{L-1} \quad (1)$$

式中: m 为中间介质水的质量,kg; c 为中间介质水的比热容,在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 内随着温度变化较小,总体不影响中间介质水吸收微波转化热能能力,因此,取其值为 $4.18 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t_1 为水的初始温度, $^\circ\text{C}$; t_2 为微波加热时间 t 后水摇匀后测试的温度, $^\circ\text{C}$; Q_{L-1} 为微波加热、测试过程中中间介质水散失的能量,kJ。此时 Q_{w-1} 可认为是 W_{OM} 扣除 Q_L 后的微波总能量。

(2)加入被测物料后,物料和中间介质水同时置于微波输出系统中,测试微波辐射 t 时间后,中间介质水所吸收的微波能量为 Q_{w-2} ,即

$$Q_{w-2} = mc(T_2 - T_1) + Q_{L-2} \quad (2)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为中间介质水在微波加热前、后的温度, $^\circ\text{C}$; Q_{L-2} 为微波加热和测试过程中散失的能量,kJ。

(3)计算被测物料吸收微波能量,记为 Q_{TM} ,以及物料吸收微波相对能量,记为 RE_c 。经过初步试验验证,当 T_2 和 t_2 相差不大时,公式(1)中 Q_{L-1} 与公式(2)中 Q_{L-2} 近似相等,因此,由公式(1)和公式(2)可得出被测物料吸收微波能量 Q_{TM} ,即

$$Q_{TM} = Q_{w-1} - Q_{w-2} \quad (3)$$

为方便对比讨论测试物料吸收微波能力大小,以物料吸收微波相对能量 RE_c 作为吸收微波能力评判指标,其表达式为

$$RE_c = \frac{Q_{TM}}{Q_{w-1}} \times 100\% \quad (4)$$

由此可知,测试得到的 Q_{TM} 和 RE_c 分别是微波辐射 t 时间后物料吸收的绝对微波能量和相对能量。因此,在低温下或微波辐射较短时间以 RE_c 和 Q_{TM} 为判断依据比较不同物料之间吸收微波能力大小。

1.2.2 活性炭制备 将现有的试验样品放入烘箱中 105°C 干燥 4 h,放入密封袋中保存。取一定质量的甘蔗渣,在氯化锌溶液中浸泡一定时间后,抽滤,然后放到微波炉专用的坩埚中,并压紧。将

坩埚放置到微波热解炉中,在一定的条件下进行热解试验。待产物冷却至室温后,取出坩埚,将炭化后的产品用 10% 稀盐酸洗涤 2 次,然后再用水洗涤,使洗涤水 pH 值为 6~7 时为止,再放到微波炉中,干燥 5 min,所得产品为甘蔗渣基活性炭。干燥后产品的表征:称质量,计算固体物料的产率。

表 1 正交试验因素和水平的选取

水平	F ₁ :氯化锌与蔗渣质量比	F ₂ :氯化锌浸泡时间(h)	F ₃ :蔗渣干质量(g)	F ₄ :微波功率(W)	F ₅ :热解温度(℃)	F ₆ :保温时间(min)	F ₇ :氮气流量(cm ³ /min)
1	1	12	10	500	400	10	100
2	2	24	15	1 000	600	20	150
3	3	36	20	1 500	800	30	200

本试验用正交助手设计,结果如表 2。根据上述的正交表进行试验,试验顺序是随机化的。

表 2 L₁₈(3⁷) 正交试验

序号	F ₁	F ₂	F ₃	F ₄	F ₅	F ₆	F ₇
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3	3
4	2	1	1	2	2	3	3
5	2	2	2	3	3	1	1
6	2	3	3	1	1	2	2
7	3	1	2	1	3	2	3
8	3	2	3	2	1	3	1
9	3	3	1	3	2	1	2
10	1	1	3	3	2	2	1
11	1	2	1	1	3	3	2
12	1	3	2	2	1	1	3
13	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	3	1	2	1	3
15	2	3	1	2	3	2	1
16	3	1	3	2	3	1	2
17	3	2	1	3	1	2	3
18	3	3	2	1	2	3	1

2 结果与分析

2.1 微波功率对甘蔗渣吸收微波能力的影响

物料为 10.00 g 甘蔗渣和 10.00 g 氯化锌浸泡过的甘蔗渣,中间介质水为 1 000 mL,微波加热时间为 2 min,根据“1.2.1”节中的试验步骤测出中间介质水的初始温度和微波加热后的温度,并根据公式(3)和公式(4)计算物料吸收微波相对能量 RE_c 和物料吸收的微波能量 Q_{TM} 。结果如图 1、图 2 所示。

由图 1、图 2 可知,在微波功率不变的条件下,随着微波辐射时间的增加,各物料相对吸收微波能量基本小于 4%,与其他物料如四氧化三铁、二氧化钛等相比属弱吸波物料,因此在后续微波制备活性

1.2.3 正交试验 拟选择正交试验方法来确定甘蔗渣基活性炭微波制备方法,正交表设计方法如下:

本试验以活性炭的质量作为试验目标函数。选择微波功率、蔗渣干质量、热解温度、保温时间、氯化锌与甘蔗渣质量比、氯化锌浸泡时间、氮气流量作为试验因素,每个因素选择 3 个水平,具体见表 1。

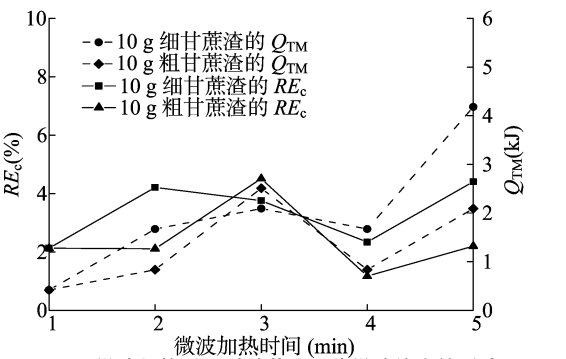


图1 微波加热时间对甘蔗渣吸收微波能力的影响

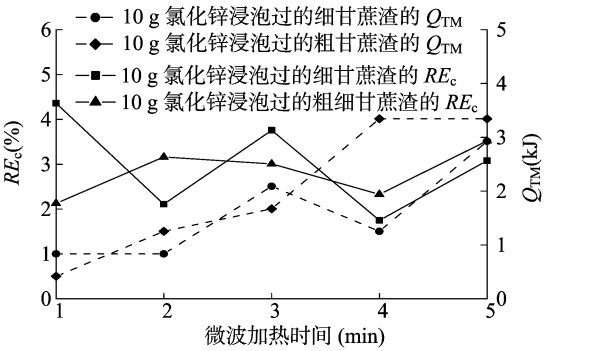


图2 微波加热时间对氯化锌浸泡过的甘蔗渣吸收微波能力的影响

炭过程中需选择微波敏化剂或者选择吸波坩埚。

2.2 被测样品质量对吸波能力的影响

微波加热时间为 2 min,微波输出功率为 500 W,中间介质水为 1 000 mL,测出中间介质水的初始温度和微波加热后的温度,根据公式(3)和公式(4)计算物料吸收微波相对能量 RE_c 和吸收微波能量 Q_{TM} 。结果如图 3、图 4 所示。

由图 3、图 4 可以看出,物料质量相同时,4 种甘蔗渣吸收微波相对能量和吸收微波能量相差不大;随着物料质量的增加,甘蔗渣吸收微波相对能量和吸收微波能量也随之增加,但增加的幅度不大。同

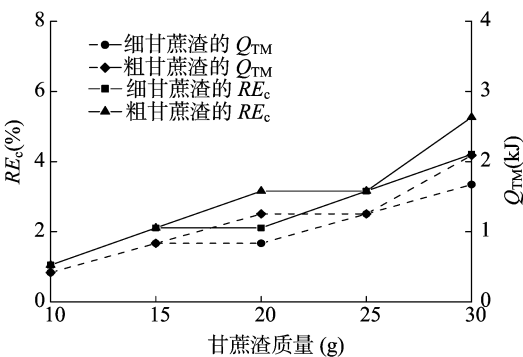


图3 甘蔗渣质量对甘蔗渣吸收微波能力的影响

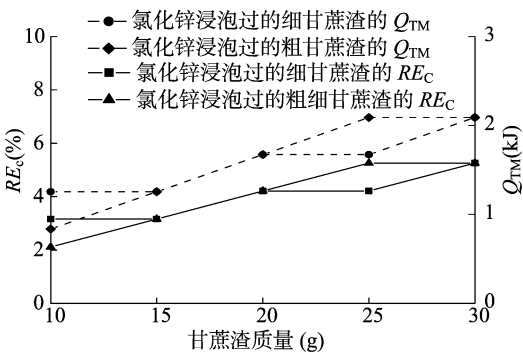


图4 氯化锌浸泡过的甘蔗渣质量对甘蔗渣吸收微波能力的影响

时还可以看出,浸泡过氯化锌的甘蔗渣其吸收微波的能力大于未处理的甘蔗渣。

2.3 甘蔗渣基活性炭微波制备研究

以甘蔗渣为原料,基于微波法制备活性炭国内外学者进行了较多的研究,对文献总结整理发现,对活性炭产率有影响的因素主要有甘蔗渣预处理剂氯化锌浓度、浸泡时间、甘蔗渣干质量、微波功率、热解温度、保温时间和氮气流量。

由表 3 可以看出,试验序号为 1 所获得活性炭产率相对最大。将上述的试验结果进行极差和方差分析,结果如表 4 所示。由表 4 可知,在微波制备甘蔗渣浸泡基活性炭过程中,对活性炭产率影响最大的为时间,微波功率和甘蔗渣干质量位于其次,热解温度与氯化锌与甘蔗质量比渣影响相差不多,而保温时间与氮气流量影响较小。由此还可以看出,制备甘蔗渣活性炭的较优条件:氯化锌与甘蔗渣质量比为 1 : 1,浸泡时间为 12 h,甘蔗渣干质量为 10 g,微波功率为 500 W,热解温度为 400 ℃,保温时间为 10 min,氮气流量为 100 cm³/min。在此条件下,得到甘蔗渣基活性炭产率为 83%。

表 3 活性炭制备参数试验方案

序号	因素							性能指标
	氯化锌与甘蔗渣质量比	浸泡时间(h)	蔗渣干质量(g)	微波功率(W)	热解温度(℃)	保温时间(min)	氮气流量(cm ³ /min)	活性炭产率(%)
1	1(1:1)	1(12)	1(10)	1(500)	1(400)	1(10)	1(100)	83.00
2	1(1:1)	2(24)	2(15)	2(1 000)	2(600)	2(20)	2(150)	34.00
3	1(1:1)	3(36)	3(20)	3(1 500)	3(800)	3(30)	3(200)	31.60
4	2(2:1)	1(12)	1(10)	2(1 000)	2(600)	3(30)	3(200)	35.30
5	2(2:1)	2(24)	2(15)	3(1 500)	3(800)	1(10)	1(100)	8.20
6	2(2:1)	3(36)	3(20)	1(500)	1(400)	2(20)	2(150)	33.10
7	3(3:1)	1(12)	2(15)	1(500)	3(800)	2(20)	3(200)	36.67
8	3(3:1)	2(24)	3(20)	2(1 000)	1(400)	3(30)	1(100)	38.95
9	3(3:1)	3(36)	1(10)	3(1 500)	2(600)	1(10)	2(150)	34.60
10	1(1:1)	1(12)	3(20)	3(1 500)	2(600)	2(20)	1(100)	35.15
11	1(1:1)	2(24)	1(10)	1(500)	3(800)	3(30)	2(150)	32.20
12	1(1:1)	3(36)	2(15)	2(1 000)	1(400)	1(10)	3(200)	30.87
13	2(2:1)	1(12)	2(15)	3(1 500)	1(400)	3(30)	2(150)	26.80
14	2(2:1)	2(24)	3(20)	1(500)	2(600)	1(10)	3(200)	39.45
15	2(2:1)	3(36)	1(10)	2(1 000)	3(800)	2(20)	1(100)	33.60
16	3(3:1)	1(12)	3(20)	2(1 000)	3(800)	1(10)	2(150)	31.20
17	3(3:1)	2(24)	1(10)	3(1 500)	1(400)	2(20)	3(200)	33.90
18	3(3:1)	3(36)	2(15)	1(500)	2(600)	3(30)	1(100)	31.07

3 结论

研究结果表明,甘蔗渣吸波能力测试试验中,微波功率、微波辐射时间对甘蔗渣及氯化锌浸泡过的甘蔗渣吸收微波能力影响较小;随着甘蔗渣质量

越大,其吸收微波能力缓慢上升;粗颗粒的甘蔗渣的吸收微波能力略高于细颗粒的甘蔗渣吸收微波能力,氯化锌预处理过的甘蔗渣吸收微波能力比未处理的甘蔗渣吸波能力强;甘蔗渣属弱吸波物质。

(下转第 277 页)

[11] Ebbs S D, Lasat M M, Brady D J, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc from a contaminated soil [J]. Journal of Environmental Quality, 1997, 26 (5) : 1424 – 1430.

[12] 陈友媛, 卢爽, 惠红霞, 等. 印度芥菜和香根草对 Pb 污染土壤的修复效能及作用途径 [J]. 环境科学研究, 2017, 30 (9) : 1365 – 1372.

[13] 杨卓, 韩德才, 李博文. 不同栽培条件下印度芥菜对重金属的吸收比较 [J]. 环境科学研究, 2014, 27 (3) : 295 – 300.

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[16] 刘铭, 刘凤枝, 刘保峰. 土壤中有效态铅和镉的测定 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26 (增刊 1) : 300 – 302.

[17] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.

[18] 吕建波, 徐应明, 贾堤, 等. 土壤镉、铅污染对油菜生长行为及重金属累积效应的影响 [J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11 (2) : 107 – 110.

[19] Tessier A, Campbell P, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. Analytical Chemistry, 1979, 51 (7) : 844 – 851.

[20] 苏德纯, 黄焕忠, 张福锁. 印度芥菜对土壤中难溶态 Cd 的吸收及活化 [J]. 中国环境科学, 2002, 22 (4) : 55 – 58.

[21] 贾夏, 董岁明, 周春娟. Cd、低 Pb/Cd 下冬小麦幼苗根系分泌物酚酸、糖类及与根际土壤微生物活性的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32 (13) : 4052 – 4061.

[22] 杨志新, 刘树庆. 土壤重金属复合污染对油菜生长的影响 [J]. 河北农业大学学报, 2000, 23 (3) : 27 – 30.

[23] Xian X. Effect of chemical forms of cadmium, zinc, and lead in polluted soils on their uptake by cabbage plants [J]. Plant and Soil, 1989, 113 (2) : 257 – 264.

[24] Kennedy C D, Gonsalves F A N. The action of divalent Zn, Cd, Hg, Cu, and Pb on the trans – root potential and H⁺ efflux of excised roots [J]. Journal of Experimental Botany, 1987, 190 : 800 – 817.

[25] 曹裕松, 李志安, 邹碧. 根际环境的调节与重金属污染土壤的修复 [J]. 生态环境, 2003, 12 (4) : 493 – 497.

[26] 李廷强, 朱恩, 杨肖娥, 等. 超积累植物东南景天根际可溶性有机质对土壤锌吸附解吸的影响 [J]. 应用生态学报, 2008, 19 (4) : 838 – 844.

[27] Brookes P C. The use of microbial parameters in monitoring soil pollution by heavy – metals [J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19 (4) : 269 – 279.

[28] Delorme T A, Gagliardi J V, Angle I S, et al. Influence of the zinc hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl. and the nonmetal accumulator *Thifolium pratense* L. on soil microbial populations [J]. Canadian Journal of Microbiology, 2001, 47 (8) : 773 – 776.

[29] 李廷强, 舒钦红, 杨肖娥. 不同程度重金属污染土壤对东南景天根际土壤微生物特征的影响 [J]. 浙江大学学报 (农业与生命科学版), 2008, 34 (6) : 692 – 698.

(上接第 271 页)

表 4 活性炭制备试验结果极差分析

项目	氯化锌与甘蔗渣质量比	浸泡时间 (h)	甘蔗渣干质量 (g)	微波功率 (W)	热解温度 (℃)	保温时间 (min)	氮气流量 (cm ³ /min)
k ₁	41.14	41.35	42.10	42.58	41.10	37.89	38.33
k ₂	29.41	25.47	27.94	33.99	34.93	34.91	31.98
k ₃	34.40	32.47	34.91	28.38	28.91	32.65	34.63
极差	11.73	15.88	14.16	14.20	12.19	5.24	6.35

氯化锌法制备甘蔗渣基活性炭试验中, 各因素主次顺序依次为浸泡时间、微波功率、甘蔗渣干质量、热解温度、氯化锌与甘蔗渣质量比、氮气流量、保温时间。制备甘蔗渣活性炭的较优条件: 氯化锌与甘蔗渣质量比为 1 : 1, 浸泡时间为 12 h, 蔗渣干质量为 10 g, 微波功率为 500 W, 热解温度为 400 ℃, 保温时间为 10 min, 氮气流量为 100 cm³/min。在此条件下, 得到甘蔗渣基活性炭产率为 83%。

参考文献:

[1] Paul W, Wen C, Mario E. Fluorescence analysis of a standard fulvic acid and tertiary treated wastewater [J]. Journal of Environment Quality, 2001, 30 (6) : 2037.

[2] Chen J, Gu B, Lebeuf E J, et al. Spectroscopic characterization of the structural and functional propeties of natural organic matter fractions [J]. Chemosphere, 2002, 48 (1) : 59 – 68.

[3] 符嫦娥. 吸附催化研究进展 [J]. 河北化工, 2009, 32 (11) : 11 – 12.

[4] 罗亚楠, 于丽颖, 于晓洋. 磷酸 – 微波活化法制备秸秆基活性炭 [J]. 广州化工, 2015, 43 (13) : 82 – 84.

[5] 杨晓庆, 陈晓波, 张丹, 等. 甘蔗渣微波活性炭的制备及再生研究 [J]. 江苏农业科学, 2012, 40 (11) : 276 – 278.

[6] 吴文炳, 陈建发, 林小兰, 等. 甘蔗渣微波制备活性炭吸附剂及其再生研究 [J]. 湖北民族学院学报 (自然科学版), 2010, 28 (2) : 201 – 203, 210.

[7] 蒋卉, 蒋文举, 金燕, 等. ZnCl₂ – 微波法制甘蔗渣活性炭工艺条件研究 [J]. 资源开发与市场, 2005, 21 (2) : 93 – 94.

[8] 白晓波, 黄谷亮, 雷程. 微波法制备蔗渣活性炭及其用于糖液脱色的研究 [J]. 广西蔗糖, 2009 (3) : 42 – 44.

[9] 陈燕清, 何春林, 梁玉石. 含砷硫铁矿吸收微波特性研究 [J]. 广东化工, 2012, 39 (12) : 38 – 40.

[10] 苏秀娟, 莫秋红, 何春林, 等. 锰及其化合物微波吸收性能研究 [J]. 矿冶工程, 2015, 35 (5) : 90 – 94.