第35卷 第3期 2020年6月



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20180465

吸附有机气体饱和废活性炭热再生的实验效果

万月亮,赵梦醒,王燕燕,刘廷志,武晨煜 (天津市制浆造纸重点实验室,天津科技大学轻工科学与工程学院,天津 300457)

摘 要:采用热处理方法对多次再生饱和废活性炭进行再生处理,研究确定温度 800 ℃、保温时间 60 min 为吸附有 机气体饱和废活性炭热再生最佳条件.此条件下,再生活性炭碘吸附值为 329.69 mg/g,亚甲基蓝吸附值为 83.95 mg/g, 与新活性炭相比,碘吸附性能和亚甲基蓝吸附性能恢复率分别为 70.03%和 68.83%. 通过对再生活性炭表征,探讨了热再生过程活性炭结构及性能变化. 红外表征显示经热再生处理,活性炭 C=C基团和 C—O基团消失,表明吸附质成功 实现脱附; XRD 和孔隙分析则表明热再生处理能改善活性炭的石墨化程度,被吸附质覆盖、堵塞或填充的微孔会被释 放还原,增加微孔数量和比例,再生后活性炭平均孔径由 6.85 nm 降低至 2.26 nm、比表面积由 520.67 m²/g 提高到 1143.43 m²/g、孔容由 0.21 cm³/g 增加到 0.39 cm³/g,吸附性能得到很大改善.

关键词:废活性炭;热再生;有机气体

中图分类号:TQ424.1⁺9 文献标志码:A 文章编号:1672-6510(2020)03-0046-06

Thermal Regeneration Effect of Volatile Organic Compounds on Waste Activated Carbon Adsorption

WAN Yueliang, ZHAO Mengxing, WANG Yanyan, LIU Tingzhi, WU Chenyu (Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: The method of heat treatment was used to regenerate the waste activated carbon which saturated with volatile organic compounds. The optimum conditions of thermal regeneration of saturated activated carbon adsorbed by organic gas were determined as temperature 800 °C and holding time 60 min. Under these conditions, the iodine adsorption value of regenerated activated carbon was 329.69 mg/g, and the methylene blue adsorption value was 83.95 mg/g. Compared with the new activated carbon, the recovery rates of iodine adsorption and methylene blue adsorption were 70.03% and 68.83%. Based on the characterization of regenerated activated carbon, the structure and properties of the activated carbon during thermal regeneration were discussed. FTIR analysis showed that C=C and C—O groups of regenerated activated carbon disappeared after the thermal regeneration treatment. This indicated that the adsorbate was successfully removed in the thermal reatment. The changes of XRD analysis results between regenerated activated carbon materials, but did not destroy the activated carbon construction. Specific surface and aperture distribution analyses showed that the average aperture was reduced from 6.85 nm to 2.26 nm, the specific surface area increased from 520.67 m²/g to 1 143.43 m²/g, and the pore capacity increased from 0.21 cm³/g to 0.39 cm³/g after the thermal regeneration treatment.

Key words: waste activated carbon; thermal regeneration; volatile organic compounds

活性炭是以煤焦油、合成高分子材料、果壳、农 作物废弃物等为原料,经过高温或其他炭化活化方法

得到的微晶质碳材料.活性炭中含有无定形碳且具 有乱层结构,比表面积大、孔隙结构发达,具有极强

作者简介:万月亮(1994—),女,山东即墨人,硕士研究生;通信作者:刘廷志,研究员,liutz@tust.edu.cn

收稿日期: 2018-11-28; 修回日期: 2019-03-01

的吸附能力,广泛应用于医学、化工生产、食品制造、 环境治理等领域.活性炭吸附过程复杂,涉及到范德 华力、静电作用及络合反应3种机理^[1].

活性炭吸附大量污染物后,其表面所带官能团和 内部孔隙结构会发生相应的变化,导致活性炭比表面 积减少,活性下降,需要再生才可恢复.吸附饱和活 性炭可通过现场再生处理,实现循环利用.活性炭再 生是指在不毁坏活性炭原有孔隙结构的前提下,采用 不同的方法,使污染物从活性炭上脱附,恢复其吸附 性能,达到循环再利用目的.但一般再生过程受现场 条件限制,无法 100%恢复活性炭吸附性能,多次再 生后,活性炭结构也会发生变化,活力下降,无法继 续使用,成为危险固体废物,需要集中处置.目前常 用的饱和活性炭再生方法有热再生法^[2]、水蒸气再生 法^[3]、溶剂再生法以及各类新型再生技术.

热再生技术是通过加热对炭材料进行处理,通常 包括干燥、热解及活化 3 个阶段,对应的温度范围一 般在 105℃以下、105~800℃和 800~1000℃.干燥 阶段是水分的蒸发及部分挥发性有机气体(VOCs)的 脱附过程;热解阶段为低沸点有机物的热脱附过程及 高沸点大分子有机物的热解过程;活化阶段主要作用 是清理活性炭孔隙内的残余物,恢复活性炭的吸附性 能^[4]. Bagreev 等^[5]通过 300℃热处理吸附硫化氢饱 和的废椰壳基活性炭,连续 3 次吸附–热再生循环 后,活性炭孔结构 100%再生,但硫化氢吸附能力仅 为初始值的 30%.

水蒸气再生是指在 80~200℃条件下通入水蒸 气,打破活性炭与吸附质之间平衡关系,实现吸附质 的脱附及活性炭的再生.高温水蒸气能与活性炭孔 隙内的基团发生反应,使活性炭内部具有发达的孔隙 结构,改善吸附性能^[6].Sabio 等^[7]对硝基苯酚模拟废 水吸附活性炭进行再生,分析了硝基苯酚饱和炭的热 解、热解-气化和直接气化的再生过程,发现热解过 程不能完全消除活性炭吸附的污染物,直接气化处理 能清理沉积在活性炭孔隙内的杂质,降低操作成本, 使活性炭的吸附性能恢复率达到 90%.

溶剂再生法是通过打破活性炭、吸附质和再生溶 液之间平衡关系,使吸附质脱附恢复活性炭的吸附性 能^[8-9].范明霞等^[10]以质量分数为 5%的硝酸溶液为 再生溶剂,再生多种重金属饱和吸附的活性炭,发现 再生次数为 5 次时,活性炭的质量损耗率低于 20%, 性能恢复率达 80%,再生效果较好.

电化学再生法是使饱和活性炭在电场的作用下

发生极化,形成微电解槽^[11-13],通过氧化-还原反应, 使污染物发生分解或脱附,实现再生. 该法对活性炭 的影响较小^[14]. Berenguer 等^[15]采用滤压式电化学电 池对吸附酚饱和的活性炭进行电化学再生,饱和活性 炭的孔隙度显著恢复,吸附再生率接近 80%.

超声波、微波^[16]等再生法是利用波在活性炭表 面施加能量,加剧活性炭表面基团热运动或使污染物 炭化^[17],使吸附质脱附,达到再生目的^[18]. Ania 等^[19] 采用微波的加热方式对活性炭再生,认为微波加热可 更有效地保留再生活性炭的多孔性结构. 吕春芳 等^[20]采用微波辐射法再生吸附亚甲基蓝饱和的活性 炭,再生活性炭的性能恢复率接近 100%.

本研究采用的活性炭原料为经多次现场再生,吸附性能下降严重的废活性炭,再进行现场再生也无法继续使用.对其进行更强再生处理,恢复其吸附性能,既可实现资源化利用,又可解决固废运输、处置等问题,可谓一举多得.

1 材料与方法

1.1 实验原料和试剂

饱和废活性炭由天津市武清立邦涂料公司提供, 为蜂窝状活性炭,用于涂料生产车间有机挥发性气体 (VOCs)的吸附控制,并经过多次现场 200~300℃低 温再生,已丧失大部分吸附性能,无法继续使用,属 危险固废;新活性炭为饱和废活性炭同批样品,未 使用.

氯化钾、碘,分析纯,天津市北方天医化学试剂 厂;硫代硫酸钠,分析纯,北京化工厂;可溶性淀粉、 亚甲基蓝,分析纯,天津市江天化工技术有限公司; 五水合硫酸铜、磷酸二氢钾,分析纯,天津市化学试 剂一厂.

1.2 实验方法

1.2.1 废活性炭再生

废活性炭再生在密封罐(图 1)内进行,密封罐由 量热用氧弹改造而成,在上盖侧面开一个直径 1.2 mm小孔,以均匀由于加热而产生的内外压力.

称取一定量的废活性炭,转移到自制密封罐中, 置于马弗炉中,按照 15℃/min 速率升温,从室温升 至设定温度,并于此温度保温一定时间;热再生结束 后,自然降温至室温,取出活性炭,置于放有中速定 性滤纸的布氏漏斗中,通过抽滤装置抽滤.由于难裂 解的有机物大分子会在高温下发生炭化形成有机残 炭,并残留在活性炭的孔隙结构内,堵塞孔隙,减小 孔容,导致活性炭的吸附性能不能完全恢复,所以, 抽滤后用活性炭 10 倍质量的 95~100 ℃自来水冲洗 活性炭,实现再生活性炭的活化.最后,于 105 ℃条 件下干燥至质量恒定,得到热再生活性炭.粉碎过 筛,进行指标测定.



图 1 自制密封罐 Fig. 1 Modified sealing cans

1.2.2 热再生活性炭表征

活性炭热稳定性采用美国 TA 公司的 TGA-Q500 型热重分析仪进行测试.以 10℃/min 的速率 从室温升高至 900℃,并绘制活性炭的热重分析曲 线;红外表征参照文献[21]中的制样方法,采用 FTIR-650 型傅里叶红外光谱仪进行检测,分析表面 基团变化;活性炭的晶体结构分析参照文献[22]采用 TD-3500 型 X 射线衍射分析仪测定,扫描角度 20 的 范围为 5°~70°,步长为 4°/min;孔隙特性分析采用 Autosorb-iQ 型全自动比表面和孔径分布分析仪测 定,用 BJH 计算法和 Langmuir 计算法对吸附--脱附 等温线进行分析,通过 DFT 计算活性炭的孔径分布 图;碘吸附值和甲基蓝吸附值分别参照 GB/T 7702.7—2008《煤质颗粒活性炭试验方法·碘吸附 值的测定》、GB/T 7702.6—2008《煤质颗粒活性炭 试验方法·亚甲基蓝吸附值的测定》进行测定.

2 结果与讨论

2.1 活性炭热稳定性分析

为研究废活性炭中有机挥发物的热稳定性,并为 后续再生脱附提供参考,实验中首先采用 TGA-Q500 型热重分析仪,以氮气为保护气,测定废活性炭的热 重分析曲线,并与新活性炭进行对比,结果如图 2 所示.

由图 2 可知:新活性炭与废活性炭的热解过程大 致可以分为 3 个阶段.第一阶段为 20~100℃,此阶 段存在明显的失重峰,是快速失重的过程,此过程

中,一部分是活性炭吸附水分的蒸发^[23],另一部分为 挥发性有机气体. 对照两个活性炭样本,废活性炭的 失重峰较新活性炭延迟,且宽度远大于新活性炭,主 要为活性炭吸附的小分子挥发气体的脱附. 第二阶 段为 100~500℃,主要是活性炭吸附的易挥发物质 的物理脱附过程^[24],对比新活性炭和废活性炭可以 发现:在 100~500℃,新活性炭相对较稳定,基本没 有变化,而废活性炭质量随温度升高一直呈现下降趋 势,说明有大量物质不断脱附和释放,在 100~ 120℃之间、近 300℃和 500℃附近存在宽峰,说明 此阶段有某种有机挥发物大量脱附. 第三阶段在 500~900℃,主要是活性炭吸附的难降解有机物的 热解过程^[11],热解过程需克服化学吸附作用,故在较 高温度下才能发生. 新活性炭在 600 ℃左右存在一个 明显的失重峰^[12],主要是活性炭在成型过程中添加 的粘结料的热解过程,包括黏合性木质素、煤焦油等 有机黏合剂. 而废活性炭没有,这是因为饱和活性炭 多次现场再生,这些物质已经变性或挥发去除. 对照 新活性炭,废活性炭在 100~900℃质量持续下降, 而新活性炭只在 600 ℃左右存在一个峰,说明废活性 炭在升温过程中持续有污染物脱除,这是废活性炭吸 附能力下降的主要原因.



图 2 活性炭热重分析曲线 Fig. 2 Thermal gravimetric curve of activated carbons

2.2 热再生条件优化

热再生方法是活性炭再生最常用方法,此法除挥 发物外,不存在其他二次污染,较适合于有机气体饱 和废活性炭再生,本文以碘吸附值、亚甲基蓝吸附值 为指标,对再生温度和保温时间两个最主要参数进行 优化.

2.2.1 再生温度优化

取一定量的饱和废活性炭,按照 1.2.1 节的方法,制备热再生活性炭,在不同再生温度下保温

60 min, 探讨温度对再生效果影响, 结果如图 3 所示.

从图 3 可知:随着再生温度的升高,再生活性炭的碘吸附值和亚甲基蓝吸附值总体呈先上升后下降的趋势.当再生温度为 800 ℃时,再生活性炭吸附性能最好,碘吸附值、亚甲基蓝吸附值分别为 329.69 mg/g、83.95 mg/g.随着温度升高,饱和废活性炭吸附的有机气体通过脱附或裂解方式不断从活性炭中解离,使活性炭孔隙结构得以恢复,当温度超过 800 ℃,活性炭的微晶结构发生膨胀,中孔孔洞结构可能会发生塌陷,堵塞孔隙结构,使孔容减小,导致活性炭的吸附性能下降^[25-26].



图 3 再生温度对再生活性炭吸附性能的影响 Fig. 3 Effect of regeneration temperature on activated carbon adsorption

2.2.2 保温时间对再生效果的影响

取一定量的饱和废活性炭,按照 1.2.1 节的方法,在 800 ℃温度下分别保温 30、60、90 和 120 min,研究保温时间对再生效果的影响,结果如图 4 所示.





由图 4 可知:当温度为 800℃,保温时间在 60 min 内,随时间的延长,再生活性炭的吸附性能逐 渐改善.保温时间超过 60 min,活性炭的吸附性能反 而降低.结合饱和废活性炭热失重过程,可以看出在 升温过程中,活性炭吸附的有机物不断裂解,达到最 高温度后,会有一些物质继续裂解,但过长的保温时 间可使活性炭的孔隙结构发生改变,特别是 2 nm 以 下的微孔的塌陷,会在很大程度上影响活性炭的吸附 性能^[27-28],因此保温时间不宜过长,以 60 min 为 宜. 饱和废活性炭经 800℃热再生处理后,再生活性 炭得率为 75.19%,主要损失为活性炭吸附的有机物 的裂解和脱附,对炭结构的烧蚀并不严重.

2.3 再生活性炭表征

在 800 ℃温度下,保温再生 60 min,对饱和活性 炭进行再生,对得到的再生活性炭进行表征. 2.3.1 热再生对活性炭晶型影响

为研究热再生对活性炭的晶体结构影响,采用 TD-3500 型 X 射线衍射仪,测定饱和废活性炭和再 生活性炭的 X 射线衍射曲线,结果如图 5 所示.



图 5 活性炭的 X 射线衍射图 Fig. 5 XRD patterns of activated carbons

由图 5 可知:饱和废活性炭与热再生活性炭都存 在 2 个特征衍射峰,一个强度高、较明显在 2 θ = 29° 处,另一个强度较低、在 2 θ = 50°左右,分别对应的是 活性炭的 002 晶面和 100 晶面^[29].饱和废活性炭经 热再生处理后,在 2 θ = 29°及 50°左右的特征衍射峰 强度增加,说明热再生处理会使废活性炭无定形结构 减弱,内部晶体结构更加有序,微晶结构更加规 整.而这一过程伴随着废活性炭的脱吸过程,特别是 一些通过化学吸附而结合在活性炭表面的有机物,在 高温作用下裂解或脱除,使得活性炭组分中石墨结构 碳与污染物脱离,恢复成石墨结构碳,其比例增加是 微晶结构均一化和规整化的原因.李洪美^[29]发现热 处理会使活性炭的微晶结构规整化,从而改善吸附性 能,这与本实验结果结论类似.

2.3.2 热再生活性炭红外表征

采用 FTIR-650 型傅里叶变换红外光谱仪,研究 热再生活性炭与饱和废活性炭的红外光谱图,结果如 图 6 和表 1 所示.由表 1 可知:这两种活性炭样品在 3 405 cm⁻¹ 处、1 024 cm⁻¹ 处和指纹区 500~1000 cm⁻¹ 处都存在较强的特征吸收峰,主要是由 O—H 键和 C—N 键伸缩振动引起的. 指纹区出现的特征峰较 多,分子结构的微小变化都会引起此处特征峰的变 化;饱和废活性炭经 800℃热再生处理后,在波数为 1631 cm⁻¹和 1100 cm⁻¹处的特征峰消失,意味着经 800℃热再生处理后,活性炭吸附的对二甲苯、邻二 甲苯、乙苯等芳香烃类以及醛类、烷烃类有机挥发性 气体得到了有效去除. 路遥等^[30]发现热再生处理能 分解活性炭表面吸附的邻氨基苯甲酸、邻氨基苯甲酸 甲酯等,使 C=C 键和 C—O 键的伸缩振动幅度减 小,特征峰减弱,这一结论与本实验结论类似.



图 6 活性炭红外光谱图

Fig. 6 FTIR spectra of activated carbons

表1 不同活性炭表面吸收峰归属及变化

Tab. 1Attribution and changes of surface absorptionpeaks of different activated carbons

油**/r/ama = 1	咽齿酸白尾	峰强度	
i)文 女义/CIII	吸收喗归周	饱和废活性炭	再生活性炭
3 405	О—Н	强	强
1 631	C = C	强	_
1 100	С—О	强	—
1 024	C—N	强	强
500~1000(指纹区)	_	强	强

2.3.3 热再生对活性炭孔隙特性的影响

热再生活性炭与饱和废活性炭吸附--脱附研究结 果如图 7 所示.由图 7 可知:两个活性炭样品在相对 压力较低时氮气的吸附量就比较大,相对压力较低 时,吸附等温线平缓上升;随着相对压力增高,吸附 质会发生毛细管凝聚现象,氮气吸附量增加较快,随 着压力的增加,活性炭微孔吸附结束,只产生表面吸 附,氮气吸附量增加缓慢;在接近饱和压力时,中孔 开始吸附,气体吸附量又急剧上升,吸附等温线都属 于Ⅰ型与Ⅳ型的结合^[31],说明活性炭具有发达的微 孔和中孔.在脱附过程中,两个活性炭样品的脱附曲 线与吸附曲线并不一致,饱和废活性炭滞后环较宽呈 现 H2 型,活性炭内部孔结构类型可能为墨水瓶孔, 其吸附等温线出现"脱尾"现象,说明微孔所占比例

天津科技大学学报 第35卷 第3期

较小^[32];热再生活性炭的滞后环较窄,说明再生活性炭的微孔所占比例增加.这与中微孔在再生过程中 解吸恢复有关.另外,从图 7 中还可以看出,在相同的压力下,再生活性炭的吸附量要高于饱和废活性炭,这说明再生活性炭的孔容较大.



图 7 活性炭 N₂吸附–脱附曲线



图 8 和表 2 分别表示活性炭通过 DFT 方法导出的孔径分布图和通过 Langmuir 计算法和 BJH 计算法得到的活性炭比表面积及中孔孔隙结构数据.



图 8 活性炭孔径分布曲线

Fig. 8 Pore-size distribution curves of activated carbons

表 2 活性炭比表面积和孔径参数

 Tab. 2
 The surface area and pore structure parameters of activated carbons

指标	饱和废活性炭	800 ℃再生活性炭
比表面积/(m ² ·g ⁻¹)	520.67	1 143.43
孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)	0.21	0.39
平均孔径/nm	6.85	2.26
中空孔容/(cm ³ ·g ⁻¹)	0.12	0.12
中孔平均孔径/nm	3.63	3.63

由图 8 可知:两个活性炭样品的孔径分布均在 1~10 nm,超过 10 nm 的孔径数极少.1~10 nm 范围 内的孔隙结构中,饱和废活性炭的微孔所占比例较 少,经 800℃热再生处理后,活性炭的微孔数量变多.

由表 2 可知:饱和废活性炭经热再生处理后,比 表面积由 520.67 m²/g 提高到 1143.43 m²/g、孔容由 0.21 cm³/g 增加到 0.39 cm³/g, 平均孔径由 6.85 nm 降 低至 2.26 nm. 废活性炭经 800 ℃热再生处理后,导 致吸附物质脱吸或分解,活性炭微孔恢复,比例增 大,因此平均孔径减小.余银明^[33]发现电热再生法会 损坏再生活性炭的微孔,在活性炭的孔径分布图 4~ 5 nm 范围会出现新的分布峰,这与本研究结果类似.

3 结 论

(1)以吸附涂料生产工业有机气体饱和废活性炭 为原料,采用热再生方法对饱和废活性炭再生,最佳 再生温度为 800℃,保温时间为 60 min. 此条件得到 的活性炭碘吸附值、亚甲基蓝吸附值分别为 329.69 mg/g、83.95 mg/g;与新炭相比碘吸附性能与 亚甲基蓝吸附性能恢复率分别为 70.03%、68.83%.

(2)废活性炭中含有的有机物会堵塞微孔,导致 平均孔径增大而比表面积降低.通过对比新活性炭 与废活性炭的热重曲线发现在热处理过程中吸附有 机物会持续脱附或分解.热再生处理能使废活性炭 无定形结构减弱,内部晶体结构更加有序,微晶结构 更加规整;红外及孔隙特性分析表明热再生可有效使 有机物裂解或脱附.孔隙特征及晶体结构分析确定 微孔结构恢复,有效提高了比表面积和微孔孔容.

参考文献:

- [1] 胡子安. 活性炭在水处理方面的应用[J]. 当代化工研 究,2018(9):4-6.
- [2] San Miguel G, Lambert S D, Graham N J D. The regeneration of field-spent granular-activated carbons[J]. Water Research, 2001, 35 (11) : 2740–2748.
- [3] Salvador F, Martin-Sanchez N, Sanchez-Hernandez R, et al. Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part I: thermal regeneration[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2015, 202 (1): 259–276.
- [4] 聂欣,曾贵东,刘成龙. 饱和活性炭物理类再生方法的 研究现状[J]. 现代化工,2017,37(2):51-56.
- [5] Bagreev A, Rahman H, Bandosz T J. Thermal regeneration of a spent activated carbon previously used as hydrogen sulfide adsorbent[J]. Carbon, 2001, 39(9): 1319–1326.
- [6] 夏洪应,彭金辉,刘晓海,等.水蒸气活化再生乙酸乙烯合成触媒载体活性炭[J].化学工程,2007,35(4):
 61-64.
- [7] Sabio E, González E, González J F, et al. Thermal regen-

eration of activated carbon saturated with pnitrophenol[J]. Carbon, 2004, 42 (11) : 2285–2293.

- [8] Furuya E, Sato K, Kataoka T, et al. Amount of aromatic compounds adsorbed on inorganic adsorbents [J]. Separation and Purification Technology, 2004, 39 (1/2) : 73–78.
- [9] Okwadha G D O, Li J, Ramme B, et al. Thermal removal of mercury in spent powdered activated carbon from Toxecon process[J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135 (10) : 1032–1040.
- [10] 范明霞, 童仕唐. 吸附重金属离子活性炭再生工艺研究[J]. 工业水处理, 2017, 37(3): 82-84.
- [11] 李琨,莫恒亮,陈亦力,等.活性炭吸附-电化学再生法 处理纳滤浓水的研究[J].工业水处理,2017,37(12): 56-59.
- [12] 张会平,傅志鸿,叶李艺,等.活性炭的电化学再生机 理[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2000,39(1):79-83.
- [13] 董文龙. 几种活性炭再生方法的比较[J]. 湖北林业科 技,2012(2):63-65.
- [14] Narbaitz R M, Cen J. Electrochemical regeneration of granular activated carbon[J]. Water Research, 1994, 28(8):1771–1778.
- [15] Berenguer R, Marco-Lozar J P, Quijada C, et al. Electrochemical regeneration and porosity recovery of phenolsaturated granular activated carbon in an alkaline medium[J]. Carbon, 2010, 48 (10) : 2734–2745.
- [16] Breitbach M, Bathen D, Schmidt-Traub H. Effect of ultrasound on adsorption and desorption processes [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2003, 42 (22): 5635–5646.
- [17] Hamdaoui O, Naffrechoux E, Suptil J, et al. Ultrasonic desorption of p-chlorophenol from granular activated carbon[J]. Chemical Engineering Journal, 2005, 106 (2):153–161.
- [18] 刘晓咏,欧阳平.吸附材料微波辐射再生的研究进展 [J].应用化工,2016,45(2):328-331.
- [19] Ania C O, Parra J B, Menendez J A, et al. Effect of microwave and conventional regeneration on the microporous and mesoporous network and on the adsorptive capacity of activated carbons[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2005, 85 (1/2) : 7–15.
- [20] 吕春芳,高盼盼. 微波技术再生污泥活性炭的研究[J]. 应用化工,2013,42(8):1405-1407.
- [21]程富江,刘廷志,李祥祥.磷酸活化脱墨渣制备中孔活 (下转第 80 页)

· 80 ·

tation[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(6):880–892.

- [15] 宋瑞霞,孙相东,王小春. 基于 HSI 颜色空间和暗原色 先验的去雾算法[J]. 系统科学与数学,2017,37(10): 2111-2120.
- [16] Sun S, Zhang R. Region of interest extraction of medical

(上接第51页)

性炭研究[J]. 中国造纸, 2017, 36(1): 36-41.

- [22] 孟祥美,万月亮,冯琨,等.不同改性方法对制浆木片 筛渣吸附效果的影响[J].中国造纸,2018,37(8):24-30.
- [23] Shende R V, Mahajani V V. Wet oxidative regeneration of activated carbon loaded with reactive dye[J]. Waste Management, 2002, 22(1):73–83.
- [24] 樊强. 湿式氧化法再生粉末活性炭的研究[D]. 天津: 天津大学,2014.
- [25] 刘军利,古可隆. 高温处理对活性炭孔隙结构的影响 [J]. 林产化学与工业,1999,19(3):37-40.
- [26] Kaneko K, Ishii C, Ruike M. Origin of superhigh surface area and microcrystalline graphitic structures of activated carbons [J]. Carbon, 1992, 30 (7) : 1075–1088.
- [27] Arriagada R, Garcia R, Molina-Sabio M, et al. Effect of steam activation on the porosity and chemical nature of activated carbons from Eucalyptus globulus and peach

image based on improved region growing algorithm[C]// Energy and Environmental Engineering. New York: MSEEE, 2017: 372–376.

[17] 王鑫. 基于双目视觉的移动机械臂物体抓取控制[D]. 重庆:重庆大学,2016.

责任编辑:郎婧

stones[J]. Microporous Materials, 1997, 8(3/4): 123–130.

- [28] 张小璇. 染料废水的活性炭吸附及其热再生研究[D]. 厦门:厦门大学,2005.
- [29] 李洪美. 活性炭纤维对有机废气吸附性能的研究[D]. 大连:大连理工大学,2008.
- [30] 路遥,李建芬,李红霞,等. 废弃粉末活性炭热解再 生实验及表征分析[J]. 化工进展,2018,37(1):389-394.
- [31] 马承愚,毛宇,徐鹏飞,等. KOH/NaOH 活化法辣椒秸 秆制备高表面积活性炭与表征[J]. 功能材料,2013, 44(5):704-708.
- [32] Hu Z, Srinivasan M P, Ni Y. Novel activation process forpreparing highly microporous and mesoporous activated carbons [J]. Carbon, 2001, 39 (6): 877–886.
- [33] 余银明. 活性炭电热再生技术机理性研究[D]. 杭州: 杭州电子科技大学,2015.

责任编辑:周建军

(上接第56页)

508.

- [3] 苏腾,陈中兴,陆柱. 混凝剂的研究应用现状与开发动 向(一)[J]. 净水技术,2000(3):7–9.
- [4] 苏滕,陆中兴. 混凝剂的研究应用与开发动向(二)[J]. 净水技术,2000(4):8-12.
- [5] 王昶,刘芳,胡文红,等.改性蛭石无机矿物絮凝剂的 性能研究[J].天津科技大学学报,2018,33(2):53-57.
- [6] 周俊波. 过滤分离技术在中国化工行业的应用与未来 发展趋势[C]//2014 中国(北京)国际过滤技术高峰论 坛论文集. 北京:万方数据电子出版社,2014.
- [7] 郭二民,李海生,李明,等. 传统过滤器改造连续动态

过滤器的研究[J]. 环境科学研究,2005,18(5):56-58.

- [8] 冯令艳,吕岩林.内循环连续式砂滤器微絮凝过滤机 理研究[J].黑龙江水利科技,2002,30(2):4-6.
- [9] Reddy S P, Sultan C, Kapania R K, et al. Accurate computing of higher vibration modes of thin flexible structures [J]. AIAA Journal, 2016, 54(5):1704–1718.
- [10] 王昶,林鹏,豆宝娟,等. 黏土矿物为原料絮凝剂的制 备及应用研究[J]. 天津科技大学学报,2015,30(1): 62-66.
- [11]汤鸿霄.无机高分子絮凝理论与絮凝剂[M].北京:中国建筑工业出版社,2006.

责任编辑:周建军