

活性炭吸附挥发性有机物的影响因素研究进展

刘晓敏, 邓先伦*, 朱光真

(中国林业科学研究院林产化学工业研究所; 生物质化学利用国家工程实验室; 国家林业局
林产化学工程重点开放性实验室; 江苏省生物质能源与材料重点实验室, 江苏 南京 210042)

摘要:从挥发性有机物(VOCs)的基本概念出发,介绍了其主要来源、危害及其污染控制技术,并在此基础上具体地介绍了活性炭吸附法。综述了影响活性炭吸附性能的因素如活性炭的孔结构、表面化学结构、活化技术、VOCs的入口浓度、VOCs的物化性质、多组分VOCs吸附、吸附柱填充密度等。

关键词:活性炭; 吸附; 挥发性有机化合物

中图分类号: TQ424

文献标识码: A

文章编号: 1673-5854(2010)06-0052-07

Research Progress in the Activated Carbon Adsorption on Volatile Organic Compounds

LIU Xiao-min, DENG Xian-lun, ZHU Guang-zhen

(Institute of Chemical Industry of Forest Products, CAF; National Engineering Lab. for Biomass Chemical Utilization; Key and Open Lab. on Forest Chemical Engineering, SAF; Key Lab. of Biomass Energy Sources and Materials, Jiangsu Province, Nanjing 210042, China)

Abstract: The sources, harmfulness of VOCs and methods of treating VOCs were introduced based on the concept of volatile organic compounds (VOCs). Activated carbon adsorption technology was mainly introduced. Factors that influenced the performance of activated carbon adsorption were summarized, including pore structure of activated carbon, surface chemical structure, activated methods, the import concentration of VOCs, the physical-chemical properties of the VOCs, mixed VOCs adsorption and packing density of adsorption column.

Key words: activated carbon; adsorption; volatile organic compounds

所谓挥发性有机化合物 (volatile organic compounds, 简称 VOCs) 是指沸点范围从 50 ~ 100 °C 到 240 ~ 260 °C 的有机化合物, 其中高沸点范围的特指极性有机物^[1]。VOCs 是石油化工、涂料装饰、印刷工业、电子制造、表面防腐、制鞋、交通运输以及各种化工生产过程中排放的废气中的主要污染物。VOCs 种类繁多, 多数有毒, 危害人类健康; 参与形成光化学烟雾和气溶胶, 污染环境; 卤代烃类有机物可以破坏臭氧层。VOCs 污染问题已经引起世界的高度重视, 世界各国都通过立法不断限制 VOCs 的排放量, 美、日、欧盟多年前即执行了严格的 VOCs 排放标准, 中国作为发展中国家, 目前首要考虑的是解决 VOCs 污染问题^[2]。就目前的工业水平而言, 无法避免这些挥发性污染物的排放。因此人们迫切需要有效治理这些污染物的技术。目前, VOCs 的治理方法主要有: 催化燃烧法^[3-4]、冷凝法、吸收法^[5-6]、生化法^[7]、吸附法^[8-9]和膜分离法。其中, 吸附法因其具有简单、实用、环保等优点而成为最有潜力的去除方法。通常将吸附法与冷凝法联用, 吸附剂首选活性炭, 因为活性炭具有吸附能力强, 耐酸碱、耐热, 原料充足, 易再生等优点。本文综述了活性炭吸附挥发性有机物的影响因素的研究进展。

收稿日期: 2010-07-14

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BADB1B03); 林业公益性行业科研专项(201004051)

作者简介: 刘晓敏(1987-), 女, 山东临沂人, 硕士生, 研究方向: 活性炭吸附; **E-mail:** lyliuxiaomin@126.com

* 通讯作者: 邓先伦(1956-), 研究员, 硕士生导师, 从事活性炭研究与开发; **E-mail:** Dengxianlun_483@163.com。

1 空气中的挥发性有机化合物

1.1 VOCs 的主要来源

随着工业发展和人们生活水平的提高,VOCs 的排放量与日俱增,并具有范围广、排放量大、种类多等特点。它们的主要来源见表1^[10]。从表1中可以看出,VOCs 主要来源于石油化工、制浆造纸、合成材料的生产等排放的废气。

表1 挥发性有机废气的主要来源

Table 1 The main source of volatile organic waste gas

废气物质 waste gas	主要来源 main sources
硫醇类	制浆造纸、炼油制气、制药、合成树脂和橡胶、合成纤维
胺类	水产加工、畜类加工、皮革、油脂化工、饲料、骨胶生产
吡啶类	粪便、生活污水处理、炼焦、屠宰、肉类腐烂
醛类	炼油、石化、医药、铸造、内燃机排气、垃圾处理、房屋装修
醇类	石化、林产化工、铸造、制药、合成材料和洗涤剂
酚类	钢铁、焦化、燃料、制药、合成材料和香料
酮类	溶剂、涂料、油脂、石化、炼油、合成材料
醚类	溶剂、医药、合成纤维与橡胶、炸药、软片
酯类	合成纤维、合成树脂、涂料、粘合剂
脂肪酸类	石化、油脂、皮革、酿造、制药、制皂、合成洗涤剂
有机卤素衍生物	合成树脂、合成橡胶、溶剂、灭火器材、制冷剂

1.2 VOCs 的危害

VOCs 的无处理排放,不仅会污染大气环境、破坏生态平衡,而且对人体也会产生伤害。其危害主要表现在以下3个方面^[11]:1)毒性大。大多数VOCs有毒、有恶臭,对人的眼、鼻、呼吸道有刺激作用,对心、肺、肝等内脏及神经系统产生有害影响,甚至造成急性和慢性中毒,可致癌、致突变^[12];2)使空气臭氧含量超标。有机挥发性物质与氮氧化物在阳光照射下生成臭氧,空气中臭氧浓度过高会对人产生不适,严重的会导致人体皮肤癌变和肺气肿;3)消耗高空臭氧层。用于制冷和表面前处理过程中清洗油污的溶剂,如氟利昂及含氯溶剂(如1,1,1-三氯乙烷等)等会消耗臭氧,使空气中臭氧层变薄,使紫外线辐射到地球表面上的量增加,产生光化学烟雾及导致大气酸化,对生命体造成危害。

1.3 VOCs 的污染控制技术

根据VOCs的性质以及我国的发展现状,目前广泛应用于VOCs治理的措施基本上分为两大类^[13]:一类是从根本上进行控制的预防性措施,从源头杜绝VOCs排放;另一类是以末端治理为主的控制性措施。第一类方法是人们所期望的,但是由于目前生产技术的限制,向环境中排放和泄漏不同浓度的有机废气是不可避免的,这时就必须采用第二类方法。末端控制技术包括回收法和消除法。回收法是通过物理方法,在一定温度压力下,用选择性吸附剂和选择性渗透膜等方法来吸附VOCs,主要包括活性炭吸附、变压吸附、冷凝法和生物膜法等^[14-15];消除法是通过化学或生物反应,用光、热、催化剂和微生物等将有机物转化为水和二氧化碳,主要包括燃烧、光催化降解、生物降解、等离子体技术等^[16-18]。

但是由于废气中污染物的浓度往往比较低($<3\ 000\ \text{mg}/\text{m}^3$)、污染面比较广,热力焚烧、催化燃烧、冷凝等传统方法往往不适用,迫使人们研究新技术。通常采用物理方法对VOCs进行吸附、吸收、冷凝等,根据不同的环境、浓度具体地选用^[19]。目前,对于许多工艺过程产生的低浓度有机废气(直接排放又会超标)的治理,活性炭吸附被认为是运行费用低、净化效果好、应用较理想的工艺路线,工业应用也最广泛^[20-22]。

2 影响活性炭吸附 VOCs 的因素

活性炭是一种具有高度发达的孔隙结构和极大比表面积的人工炭材料制品,是一种已在化工、石油、环保等行业得到广泛应用的吸附材料^[23]。它主要由碳元素(质量分数为 87%~97%)组成,同时也含有氢、氧、硫、氮等元素,以及一些无机矿物质。通常,活性炭的孔容积达 0.2~1.0 cm³/g、比表面积为每克几百至 3 000 m²以上^[23-24]。吸附作用是活性炭的最显著的特征之一,可以从气相或液相中吸附各种非极性物质,且吸附能力很强。

活性炭与树脂、硅胶、沸石等吸附剂相比,具有很多优越性:孔隙结构高度发达、比表面积大;炭表面上含有(或可以附加上)多种官能团;具有催化活性;性能稳定,能在不同温度和酸碱度下使用;可以再生^[24-25]。

2.1 活性炭的性能方面的影响

2.1.1 活性炭孔隙结构 活性炭的吸附性能主要与其孔隙结构和表面官能团决定^[26],尤其是孔隙结构对活性炭的性能有时甚至有决定性的影响。孔隙结构是指孔隙容积、孔径分布、比表面积和孔的形状。

活性炭孔的大小从几十个纳米到数千纳米以上。根据 IUPAC 的分类^[27],活性炭的孔隙按其直径大小可以分为:直径大于 50 nm 的大孔,直径介于 2~50 nm 的中孔和直径小于 2 nm 的微孔。通过原料的选择、活化工工艺条件的调整可在一定程度上控制活性炭材料的孔结构及孔径分布。活性炭的吸附作用绝大部分是在微孔内进行的,吸附量受微孔数量的支配,尽管如此,大孔和中孔的作用也不能忽视。Smisek 等^[28]的研究表明,只有少数微孔直接通向外表面,在绝大多数情况下,活性炭的孔隙结构主要按下列方式排列:大孔直接通向活性炭的外表面,过渡孔是大孔的分支,微孔又是过渡孔的分支(相似于人体的血管组织)。微孔的吸附作用是以大孔的通道作用和中孔的过渡作用为基础。因此,吸附性能好的活性炭在孔结构上应有充分发育的微孔,同时又有数量及排列均适宜的过渡孔和大孔^[29]。

汤进华等^[30]在研究活性炭孔结构和表面官能团对甲醛吸附性能影响过程中发现:活性炭比表面积和孔容分布对甲醛气体的吸附有明显的影 响,微孔比表面积大,吸附效果显著,中孔在吸附过程中起通道作用,加快活性炭对甲醛气体的吸附。另外,樊亚娟等^[31]在几种市售活性炭和改性活性炭吸附汽油蒸汽的实验中,发现活性炭对丁烷的吸附受孔容特别是中孔孔容的影响,提高活性炭的微孔比表面积和中孔孔容是改进丁烷吸附性能的关键因素。并且提出丁烷吸附的理想孔径为微孔上限和中孔下限。

在吸附过程中,吸附剂的孔径与吸附质分子或离子的几何尺寸需要有一定的匹配,只有可几孔径分布下的孔容和比表面积的增加才能增加对吸附质的吸附能力。研究表明对吸附剂利用率最高的孔径与吸附质分子直径的比值是 1.7~3.0^[32]。因此,在选择吸附剂的时候应更多考虑孔径分布的可几性。

2.1.2 活性炭表面化学结构 影响活性炭吸附性能的另一个主要因素是表面化学结构,如表面官能团的种类及数量等。一般认为当活性炭表面的官能团为碱性时,容易吸附酸性化合物;反之,容易吸附碱性化合物;但是它与吸附性能的关系比较复杂,尚有待深入了解。

表面化学结构改性主要是改变活性炭的表面酸、碱性,引入或除去某些表面官能团,使其具有某种特殊的吸附或催化性能^[33]。近些年来,人们试图通过物理法、化学法以及物理化学联合等方法对活性炭进行表面化学结构改性,以改善其对吸附质的吸附选择性和吸附容量^[34-36]。常用的是在活性炭表面上负载金属离子或催化氧化剂如 TiO₂。Figueiredo 等^[37]使用过氧化氢、硝酸及氧化性气体在不同条件下处理活性炭,研究了改性活性炭的表面化学结构,发现液相氧化主要增加表面羧基量,气相氧化主要增加表面羟基和羰基的量。

汤进华等^[30]在研究活性炭吸附甲醛时,认为经过 HNO₃、H₂O₂ 改性后的活性炭样品表面含氧官能团的数量增加,使得活性炭表面的 C=O、O=C—O 等官能团的比例增加明显,更加有利于甲醛气体的吸附,而氨基改性的样品表面的含氧官能团的减少,使得吸附效果大大减弱。

Chiang 等^[38]用 $Mg(NO_3)_2$ 和 $Ba(NO_3)_2$ 处理活性炭后,表面极性增强,其对醋酸(极性)的吸附量大于苯(非极性)的吸附量。Wigmans 等^[39]采用 $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ 在活性炭表面引入锡金属,改性后比表面积、孔容和孔径均减小,但对 CO 的吸附性能却大大增加。目前,关于金属负载改性活性炭对吸附性能的影响有大量研究报道,但对金属负载改性与活性炭吸附性能之间的变化规律还没有做深入的研究。

2.1.3 活性炭活化技术 活性炭的制备方法主要有物理活化法和化学活化法^[24,39-40]。活性炭的最终性能受原料特性和制备工艺的共同影响^[41],因而选用不同的原料或改变制备条件都有可能调节活性炭的性能^[42]。

物理活化法俗称两步法,先将原料在一定温度下炭化,然后用活化剂如水蒸气或二氧化碳在高温下进行活化;化学活化法俗称一步法,化学活化剂如氯化锌、磷酸、氢氧化钾和碳酸钾等与原料混合浸渍后,在一定温度下将炭化/活化同时进行。世界各国对活性炭的各种制备方法进行了广泛的研究^[43-48]。

胡刘平等^[49]使用不同的活化技术制备了各种活性炭并且研究了对甲醛的吸附性能,研究表明:活化剂是决定活性炭吸附性能的主要因素,活化剂不同,活性炭的孔结构也不同,最终的吸附性能也不同。另外,活化温度是活性炭孔形成的主要因素,活化温度在工艺允许的范围内越高,所生产的活性炭对甲醛吸附越好。

同时,浸渍比、活化时间都会对活性炭的吸附性能产生影响。浸渍比,即化学活化剂(如磷酸)与木屑的质量比,是化学活化法制备活性炭工艺过程中重要的影响因素^[46-47]。张会平等^[50]在不同操作条件下采用磷酸活化法制得了各种活性炭并比较了其吸附性能,实验表明:浸渍比是磷酸活化法制备活性炭的最重要的影响因素,浸渍比选择在 100%~150%,可以得到较高的比表面积及较高的微孔和中孔孔容。谭非等^[51]在微波加热条件下碳酸钾活化松木屑制得活性炭并对其吸附性能进行了研究,认为微波加热法比传统方法制备活性炭工艺更简单,时间更少。牟大庆^[52]在以竹屑为原料,采用微波辐射磷酸法制备活性炭的试验中,也得出相同的结论:微波法是一种具有极高生产效率的活化方法,大大地缩短了传统活化工艺所需的时间,可以在较短的时间内制得性能较优的活性炭产品。

2.2 空气中 VOCs 性质的影响

2.2.1 VOCs 的入口浓度 VOCs 的入口浓度对活性炭吸附有极大影响。活性炭在吸附 VOCs 时,入口浓度越大,达到吸附饱和的时间越短,同时活性炭越容易失活。因此在实际应用中,应根据 VOCs 的种类和具体的吸附要求综合考虑,谨慎处理入口浓度。

高瑞英等^[53]研究了活性炭吸附 VOCs 中苯系物的实验,结果表明不同入口浓度的 VOCs 的 10% 透过时间与入口浓度的对数存在线性关系: $\lg t_b = A \lg C_0 + B$,入口浓度越大,透过时间越短,透过曲线越陡。孙辉等^[54]研究不同浓度的甲苯穿过活性炭纤维的实验也表明初始浓度大的苯系物穿透时间短。

2.2.2 VOCs 物化性质 吸附剂的极性对活性炭的吸附程度影响颇大。此外,吸附质的相对分子质量、沸点、比蒸发速率、熵变等因素也会影响吸附量的大小。当用同一种活性炭作吸附剂时,对于结构类似的有机物,其相对分子质量愈大、沸点愈高,则被吸附得愈多^[55-56]。对结构和相对分子质量都相近的有机物,饱和性愈大,则愈易被吸附。

李敬岩等^[57]在研究改性活性炭对石脑油中有机氯的吸附性能研究时认为,由于石脑油中有机氯化物属于弱极性物质,易于被酸性官能团吸附,所以采用硝酸、双氧水对活性炭进行改性,增加了表面酸性官能团,增加了极性有机物和活性炭表面之间的结合能,有利于有机氯的吸附。

薛文平等^[58]认为,用活性炭纤维吸附同浓度的苯、甲苯时,在相同的实验条件下,甲苯所需的时间大于苯,表明了苯与甲苯在活性炭纤维表面的吸附能力随着吸附质的相对分子质量的增大而增大,即有机物的相对分子质量越大,极性越大,穿透时间越长,吸附量越大。

陈良杰等^[59]采用 kc-4.0 型颗粒活性炭对甲苯、对二甲苯、乙酸甲酯、乙酸乙酯、乙醇、正丙醇进行吸附实验,结果表明挥发性有机物的比蒸发速率、饱和蒸气压和电离势能与活性炭饱和吸附量具有显著的相关性;比蒸发速率越大、饱和蒸气压越大或电离势能越大,活性炭饱和吸附量越小。Chiang 等^[60]考察

了3类活性炭对4种VOCs(四氯化碳、氯仿、苯、二氯甲烷)的吸附能力,发现对吸附热高、熵变低的苯的吸附效果最好。

2.2.3 多组分VOCs吸附 多组分VOCs吸附时,除了各组分间固有的吸附外,由于吸附能力的差异,各组分间还会发生竞争吸附,使得吸附过程更加复杂。活性炭对不同有机废气的吸附结合常数有所差异,而有机废气在活性炭表面的吸附过程实际上是吸附和解吸的动态平衡过程,吸附能力强的组分在达到穿透点以后,会对吸附能力弱的有机废气的活性位点形成竞争性结合,进而置换出吸附能力弱的有机废气,最后达到吸附的动态平衡,表现在穿透曲线上即为浓度跃升现象。

金一中等^[61]研究了活性炭对苯和甲苯的吸附,结果表明活性炭在吸附苯-甲苯的废气实验过程中,由于使用的活性炭对甲苯的吸附能力强于苯,甲苯能从活性炭中置换出已被吸附的苯。薛文平等^[58]研究VOCs在活性炭纤维上的吸附性能时,也得出同样的结论:混合气体(苯、甲苯)在活性炭纤维上的吸附有明显的二组分吸附特征,吸附时两组分间存在相互竞争,吸附能力强的甲苯分子有置换吸附能力弱的苯分子的现象发生。

2.3 其他因素

流量、吸附柱填充密度、溶解度等对活性炭的吸附也有影响。孙辉等^[54]研究了吸附法去除室内苯系物,结果表明,气流量加大会较快到达穿透点和吸附饱和点,使穿透曲线发生左移,曲线斜率不变;填充密度对穿透时间与饱和时间都有影响,密度大有利于吸附。

李影等^[62]研究了活性炭对水中苯系物(BTEX)和甲基叔丁基醚(MTBE)^[63]的吸附,结果表明:活性炭对BTEX和MTBE的吸附能力大小顺序为:乙苯>邻二甲苯>甲苯>苯>MTBE,其顺序与污染物在水中的溶解度大小成反比例关系。

3 结语与展望

本文综述了活性炭吸附法吸附挥发性有机气体的方法;总结了影响活性炭吸附的主要因素。活性炭孔结构和表面化学结构是影响吸附的主要因素,孔结构和表面化学结构同时又与活化过程有关系。挥发性有机气体的入口浓度越大,到达穿透点的时间和吸附饱和的时间越短。吸附剂的极性与吸附质相近时易于吸附;吸附质的相对分子质量也会影响吸附量的大小。多组分有机气体共存时,会发生相互作用和竞争吸附,吸附能力强的有机废气能置换出吸附能力弱的有机废气。流量、吸附柱填充密度等也是重要的影响因素。所以在实际应用中,应该结合考虑活性炭吸附VOCs的综合影响因素,选出最佳的工艺参数和流程。

随着社会经济的发展、科技的进步和人们生活水平的提高,人们对赖以生存的环境提出更高的要求,对VOCs治理的关注越来越大,治理VOCs的措施也会更加的合理、有成效。活性炭作为一种具有强大比表面积的吸附剂和催化剂载体,随着具有更佳吸附性能或满足特定需求的新型活性炭,如活性炭纤维、活性炭纳米管等先进材料的研发,及活性炭的表面改性的研究,活性炭在VOCs的治理方面将具有更广阔的前景。

参考文献:

- [1] WANG J N, CAO S R, LI Z, et al. Human exposure to carbon monoxide and inhalable particulate in Beijing China [J]. Biomed Environ Sci, 1988, 1(1): 512.
- [2] 李婕, 羌宁. 挥发性有机物(VOCs)活性炭吸附回收技术综述[J]. 四川环境, 2007, 26(6): 104-105, 111.
- [3] 蔡超, 薛屏. Cu^{2+} 掺杂对 Ce-Zr-O 固溶体结构及苯催化燃烧性能的影响[J]. 宁夏大学学报: 自然科学版, 2005, 26(4): 345-348.
- [4] 王军, 沈美庆, 王晓玲, 等. 燃烧法控制有机废气污染的催化剂性能研究[J]. 燃烧科学与技术, 2001, 7(3): 242-244.
- [5] 李湘凌, 林岗, 周元祥, 等. 复方液吸收法处理低浓度苯类废气[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2002, 25(5): 794-796.
- [6] 衣新宇, 赵修华, 朱登磊. 表面活性剂吸收法治理含苯废气的中试实验[J]. 能源环境保护, 2004, 18(3): 24-27.
- [7] SORIAL G A, SMITH F L, SUIDAN M T, et al. Removal of ammonia from contaminated air by trickle bed air biofilters [J]. J Air & Waste

- Manage Assoc,2001,51(5):756765.
- [8] FAISAL I K, ALOKE KR G. Removal of volatile organic compounds from polluted air [J]. *J Loss Prev Process Industries*,2000,13(6):527-545.
- [9] DAS D, GAUR V, VERMA N. Removal of volatile organic compound by activated carbon fiber [J]. *Carbon*,2004,42(14):29492962.
- [10] DRAGT A J, VAM HAM J. *Biotechniques for Air Pollution Abatement and Odour Control Policies* [M]. Maastricht:Elsevier,1992.
- [11] KEVIN L, WH ITAL L. Air pollution control [J]. *Metal Finishing*,1993,91(5A):195204.
- [12] 刘亚敏,付智娟. 可挥发性有机化合物治理技术及研究进展[J]. *江西化工*,2006(1):2326.
- [13] 陈平,陈俊. 挥发性有机化合物的污染控制[J]. *石油化工环境保护*,2006,29(3):2923.
- [14] RUHL M J. Recover VOCs via adsorption on activated carbon[J]. *Chemical Engineering Progress*,1993,89(7):3741.
- [15] RUDDY E N, CARROL L A. Select the best VOC control strategy[J]. *Chemical Engineering Progress*,1993,89(7):2835.
- [16] 张宇峰,邵春燕,张雪英,等. 挥发性有机化合物的污染控制技术[J]. *南京工业大学学报*,2003,25(3):8993.
- [17] 余成洲,张贤明,张春辉. 挥发性有机化合物废气治理技术及其新进展[J]. *重庆工商大学学报:自然科学版*,2009,26(1):3539.
- [18] 李坚,马广大. 电晕法处理易挥发性有机物(VOCs)的实验研究[J]. *环境工程*,1996,17(3):3933.
- [19] 卢辛成,蒋剑春. 挥发性有机物的治理以及活性炭的应用研究进展[J]. *生物质化学工程*,2009,43(1):4951.
- [20] 张春菊,叶代启,吴军良. 先进实用挥发性有机废气吸附与催化净化技术[J]. *能源环境保*,2005,19(4):58.
- [21] 刘宁锴,陆烽,郝群英,等. 吸附-催化燃烧法处理低浓度有机废气[J]. *污染防治技术*,1997,10(4):218219.
- [22] 乔惠贤,尹维东,栾志强,等. 大风量 VOCs 废气治理[J]. *环境工程*,2004,22(1):3638.
- [23] 蒋文举,江霞,朱晓帆,等. 微波加热对活性炭表面基团及吸附性能的影响[J]. *林产化学与工业*,2003,23(1):3942.
- [24] JANKOWSKA H, SWIATKOWSKI A, CHOMA J. *Active Carbon* [M]. New York:Ellis Horwood,1991.
- [25] 古可隆,李国君,古政荣,等. 活性炭[M]. 北京:教育科学出版社,2008.
- [26] RODRIGUEZ-REINOSO F. Activated carbon [C]//MARSH H, HEINZ E A, RODRIGUEZ-REINOSO F. *Introduction to Carbon Technologies*. Alicante:Universidad,1997:35103.
- [27] GREGG S J, SING K S W. 吸附、比表面与孔隙率[M]. 1版. 高敬琮,等,译. 北京:化学工业出版社,1989.
- [28] SMISEK M, CERNY S. *Active Carbon* [M]. New York:Elsevier,1970.
- [29] 解强,张香兰,李兰廷,等. 活性炭孔结构调节:理论、方法和实践[J]. *新型炭材料*,2005,20(2):183190.
- [30] 汤进华,梁晓峰,龙东辉,等. 活性炭孔结构和表面官能团对吸附甲醛性能影响[J]. *炭素技术*,2007,3(26):2124.
- [31] 樊亚娟,张双全,姚国富,等. 吸附汽油蒸气活性炭的制备研究[J]. *中国矿业大学学报*,2005,34(6):817820.
- [32] 古可隆. 活性炭的应用(一) [J]. *林产化工通讯*,1999,33(4):3740.
- [33] 王淑勤,樊学娟. 改性活性炭治理室内空气中甲醛的实验研究[J]. *环境科学与技术*,2006,29(8):3940.
- [34] VINKE P, VAN DER EIJK M, VERBREE M, et al. Modification of the surfaces of a gas activated carbon and a chemically activated carbon with nitric acid, hypochlorite, and ammonia [J]. *Carbon*,1994,32(4):675686.
- [35] BOUDOU J P, MARTINEA-ALONZO A, TASCÓN J M D. Introduction of acidic groups at the surface of activated carbon by microwave-induced oxygen plasma at low pressure[J]. *Carbon*,2000,38(7):10241029.
- [36] BANSODE R R, LOSSO J N, MARSHALL W E. Adsorption of volatile organic compounds by pecan shell- and almond shell-based granular activated carbons [J]. *Bioresource Technology*,2003,90(2):175184.
- [37] FIGUEIREDO J L, PEREIRA M F R, FREITAS M M A, et al. Modification of the surface chemistry of activated carbons [J]. *Carbon*,1999,37(9):13791389.
- [38] CHIANG Hung-Lung, HUANG C P, CHIANG P C, et al. Effect of metal additives on the physicochemical characteristics of activated carbon exemplified by benzene and acetic acid adsorption [J]. *Carbon*,1999,37(12):19191928.
- [39] WIGMANS T. Industrial aspects of production and use of activated carbons[J]. *Carbon*,1989,27(1):1322.
- [40] 孙保帅,俞力家,龚彦文. 用花生壳制备活性炭的研究[J]. *河南工业大学学报:自然科学版*,2009,30(4):4548.
- [41] LYUBCHIK S B, BENOIT R, BEGUIN F. Influence of chemical modification of anthracite on the porosity of the resulting activated carbons [J]. *Carbon*,2002,40(8):12871294.
- [42] PARRA J B, PIS J J, DE SOUSA J C, et al. Effect of coal preoxidation on the development of microporosity in activated carbons[J]. *Carbon*,1996,34(6):783787.
- [43] LUA A C, GUO J. Activated carbon prepared from oil palm stone by one-step CO₂ activation for gaseous pollutant removal[J]. *Carbon*,2000,38(7):10891097.
- [44] LOZANO-CASTELLO D, LILLO-RODENAS M A, CAZORLA-AMOROS D, et al. Preparation of activated carbons from Spanish anthracite I. Activation by KOH[J]. *Carbon*,2001,39(5):744749.
- [45] HAYASHI J, KAZEHAHA A, MUROYAMA K, et al. Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation[J]. *Carbon*,2000,38

(13):18731878.

- [46] AHMADPOUR A, DO D D. The preparation of activated carbon from macadamia nutshell by chemical activation[J]. Carbon, 1997, 35(12): 1723-1732.
- [47] AHMADPOUR A, DO D D. The preparation of activated carbon from coal by chemical and physical activation[J]. Carbon, 1996, 34(4): 471-479.
- [48] BERNARDO E C, EGASHIRA R, KAWASAKI J. Decolorization of molasses' wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse [J]. Carbon, 1997, 35(9): 1217-1221.
- [49] 胡刘平, 莫开林, 杨凌, 等. 活性炭对甲醛吸附的研究[J]. 四川林业科技, 2007, 28(4): 5255.
- [50] 张会平, 叶李艺, 杨立春. 磷酸活化法活性炭的吸附性能和孔结构特性[J]. 化工进展, 2004, 23(5): 5245-528.
- [51] 谭非, 王彬元, 林金春, 等. 微波加热化学活化法制备活性炭的优化工艺研究[J]. 生物质化学工程, 2010, 44(1): 14.
- [52] 牟大庆. 微波辐射磷酸法制备竹材活性炭及表征[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(5): 115-118.
- [53] 高瑞英, 陈秋燕, 李忠军. 活性炭吸附 VOC 苯系物的影响因素研究[J]. 广东轻工职业技术学院学报, 2005, 4(4): 1618, 22.
- [54] 孙辉, 薛文平, 姜莉莉, 等. 活性炭纤维吸附苯系物影响因素的研究[J]. 环境科学与技术, 2007, 30(7): 1819.
- [55] 叶振华. 化工吸附分离过程[M]. 北京: 中国化工出版社, 1992.
- [56] SIEGELL J H. Control loading emissions[J]. Hydrocarbon Processing, 1998(5): 6466, 70.
- [57] 李敬岩, 南国枝, 范维玉, 等. 改性活性炭对石脑油中有机氯的吸附性能的研究[J]. 石油炼制与化工, 2009, 40(6): 6464.
- [58] 薛文平, 孙辉, 姜莉莉, 等. VOCs 在活性炭纤维上吸附性能的研究[J]. 大连轻工业学院学报, 2007, 27(2): 152-155.
- [59] 陈良杰, 王京刚. 挥发性有机物的物化性质与活性炭饱和吸附量的相关性研究[J]. 化工环保, 2007, 27(5): 409-412.
- [60] CHIANG Yu-Chun, CHIANG Pen-Chi, HUANG Chin-Pao. Effects of pore structure and temperature on VOC adsorption on activated carbon [J]. Carbon, 2001, 39(4): 523-534.
- [61] 金一中, 徐灏, 谢裕坛. 活性炭吸附苯、甲苯废气的研究[J]. 高校化学工程学报, 2004, 18(2): 258-263.
- [62] 李影, 张魏, 吕燕, 等. 活性炭对水中 MTBE 和 BTEX 的吸附性能[J]. 华东理工大学学报: 自然科学版, 2009, 35(6): 866-872.
- [63] MORMILE M R, SHI L, SUFLITA J M. Anaerobic biodegradation of gasoline oxygenate: Extrapolation of information to multiple sites and redox condition[J]. Environmental Science and Technology, 1994, 28(9): 1727-1732.

计量标准器具 竭诚欢迎使用检定

松香色度标准块

本产品具有国内行业中质量检验的权威性
长期、周到的售后服务让客户无后顾之忧

松香色度标准装置(又名《松香颜色分级标准》玻璃比色块),是符合我国松香光学特性具有完整体系的松香颜色分级标准。1982年荣获林业部科技成果二等奖。1987年至今,被《脂松香》、《松香试验方法》国家标准所采用,并多次经国家质量监督检验检疫局复查考核合格。

用有色光学玻璃制成的最高标准一套称为“中国松香色度标准装置”,计六个级别,每级一块,编号为S20,保存在中国林业科学研究院林产化学工业研究所。本标准块为最高标准的复制品,分为壹等品和贰等品两种。壹等品适用于商检、质检、内外贸、工厂中心化验室和教学、科研等单位;贰等品适用于工厂车间化验室。根据检定规程,壹等品与最高标准的色差 $\Delta E_{ab}^* \leq 1.5$,贰等品与最高标准的色差 $\Delta E_{ab}^* \leq 2.0$ 。林产化学工业研究所为本标准块全国唯一的制造单位和归口检定单位。制造计量器具许可证证书编号为(苏)制00000095号。产品出厂两年内免检,以后按检定规程要求每两年采用双光束分光光度计复检一次。林产化学工业研究所将竭诚为您服务,欢迎来电来函订购,欢迎将标准块寄我所检定。

联系地址:210042 南京市锁金五村16号
中国林科院林产化学工业研究所

电 话:(025)85482450,85482533

联系人:郭长泰

传 真:(025)85413445