

# 饱和活性炭物理类再生方法的研究现状

聂欣\*, 曾贵东, 刘成龙

(杭州电子科技大学机械工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:**根据活性炭吸附物脱离时的最终行为特性,将物理类方法再生分为脱附再生与分解再生,并对相关方法的研究现状及其工业应用进行了综述。在当前的研究热点—活性炭分解类再生方法的研究中,普遍存在着试验研究条件与工业实际需求不符的情况。鉴于目前活性炭吸附物的复杂多样性,未来活性炭再生研究者应着眼于通用性较好的再生方法,并结合2种或多种再生手段。以工业应用需求为导向,以热再生技术及其经济性指标为参照,同时考虑再生设备的易用性、价格、小型化等因素,对再生方法进行系统研究。而饱和生物活性炭的再生研究工作还需要进一步加强。

**关键词:**饱和活性炭;物理再生;脱附;分解

中图分类号:X78

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2017)02-0051-06

DOI:10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.02.011

## Research status of physical regeneration methods for saturated activated carbon

NIE Xin\*, ZENG Gui-dong, LIU Cheng-long

(Mechanical Engineering College, Hnagzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Based on the final behavior characteristics of activated carbon adsorbates, the physical regeneration methods can be divided into desorption regeneration and decomposition regeneration. The research situations and the industrial applications of related methods are also reviewed. However, in the current research hotspot, decomposition regeneration of activated carbon, the mismatching of experimental conditions and industrial actual demand is widely present. In view of the complexity and diversity of activated carbon adsorbates, the related researchers are suggested to devote to developing more versatile regeneration methods in the future. Meanwhile, based on the demand of industrial application, new regeneration methods are needed to be systematically studied, using renewable regeneration technology and its economic index as reference. The factors such as the usability, price and miniaturization of regeneration equipment should be taken into account as well. At the same time, the research works about regeneration of saturated biological activated carbon should also be enhanced.

**Key words:** saturated activated carbon (SAC); physical regeneration; desorption; decomposition

活性炭是一种具有发达孔隙结构、巨大比表面积和稳定化学性质的类似石墨结构的无定型的碳质材料。其强大吸附性能由多孔的物理结构特性和表面化学特性共同决定,前者为主要决定因素,大的比表面积和大量微孔有利于活性炭吸附。而表面化学特性在吸附的作用,通常由表面官能团种类和数量决定。表面官能团与吸附物的相互作用机理通常包括 $\pi-\pi$ 色散力作用机理、氢键形成机理和吸附质-活性炭供受电子机理<sup>[1]</sup>。活性炭在很多领域被广泛应用,其中包括气相液相的净化处理、食品工业的脱色、天然气和乙炔的载体、溶剂回收以及作为多相催化剂或双层电容器电极等。其中应用于净化处理消耗的数量最多,超过活性炭使用量的一半<sup>[2]</sup>。活性炭作为吸附剂可以对液相和气相中的有机和无机污染物进行吸附,累积的吸附质会导致活性炭的吸

附位点减少,使得吸附能力逐渐减弱甚至消失,从而形成了饱和活性炭(SAC)。SAC通常的处理方法有填埋、焚烧和再生利用,前2种处理方法会造成资源浪费和环境污染,而对SAC进行再生有利于节约资源、保护环境,因此极具实际意义和研究价值。SAC再生是通过运用物理或化学等方法对失去活性的SAC进行再生处理,去除吸附物,释放吸附位点,恢复其吸附性能达到循环利用目的。

## 1 饱和活性炭再生方法分类

自20世纪初以来,对活性炭再生研究已经进行了近1个世纪,且一直是材料与环境学科的研究热点,探究了多种不同类型的再生方法。这源于活性炭的来源多样性(煤基、生物质、石油基等)、形态多样性(粉状活性炭、颗粒活性炭、活性炭纤维、活

性炭布、纳米活性炭)、吸附物的多样性等原因。

本文中根据饱和活性炭的主要再生手段,将再生方法分为 3 大类,物理再生、化学再生、生物再生,见图 1。生物再生法是指在 SAC 上进行微生物接种,通过微生物的降解作用再生。但该方法存在一定的逻辑矛盾,一方面是再生过程中需要大量细菌,将污染物快速降解,另一方面是此过程中有机污染物会越来越少,又反过来影响细菌的生长,这使得其再生时间长、效率较低。且生物膜的积聚容易对活性炭孔隙产生堵塞,降低活性炭吸附性能,同时再生效率易受水质和温度的影响。化学再生是利用再生介质与吸附有机物的化学反应、化学降解等手段进行再生的方法,包括酸碱再生、电化学、氧化再生等。其中,电化学再生是对吸附污染物进行分解破坏,具有较好的环境效益,且再生损耗小。但其通用性较差,不能再生含多类吸附质的 SAC,其次所需再生时间较长,不利于工业规模化应用;氧化再生指氧化性物质如  $O_2$ 、 $O_3$ 、 $H_2O_2$  等快速对 SAC 的吸附物进行氧化反应,实现吸附物降解与活性炭再生。其问题在于活性炭多孔结构易遭破坏,再生损耗大。酸碱再生指改变 pH 以及和部分吸附质直接反应来实现 SAC 再生。该方法问题在于其对吸附物具有选择性,也难以对含多类吸附质 SAC 再生,通用性差,再生效率较低,再生时间较长。总体来说,化学再生对吸附物具有较强选择性且对环境有一定影响,目前未见大规模工业应用。

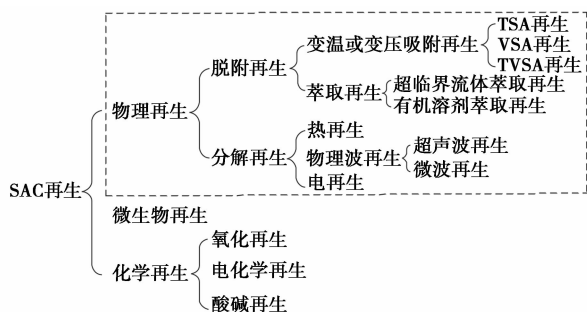


图 1 SAC 再生方法分类

目前工业应用较多、通用性较好的再生方法主要是物理再生法。对于物理再生法,可根据再生过程中的吸附物的最终去除行为特性<sup>[3]</sup>,将再生方法分为 2 大类,脱附再生、分解再生。

## 2 脱附再生法

脱附再生通过变温、变压和溶剂萃取等手段打破吸附质与吸附剂的吸附平衡,使得吸附质以原有

形式从活性炭上脱附,实现 SAC 的再生,主要分为变温或变压吸附再生和萃取再生 2 子类。

### 2.1 变温或变压吸附再生

变温或变压吸附再生包括 3 种再生法:①变温吸附(TSA)再生根据介质不同分为水蒸汽变温吸附再生、热惰性气体变温吸附再生和电热变温吸附再生。其中水蒸汽变温吸附再生是目前应用最为广泛的 TSA 技术,原因在于水蒸汽热焓高且易得,具有较好的经济性和安全性。其原理是利用气体组分在活性炭上吸附性能的差异以及吸附容量随温度变化的特性,在常温或低温下进行吸附,当活性炭吸附达到饱和时通过再生介质(水蒸汽,惰性气体或电流)对 SAC 升温至  $80 \sim 200^\circ\text{C}$ <sup>[4]</sup>,打破吸附平衡,实现目标气体的脱附与吸附剂的再生。在吸附平衡情况下,温度越低,吸附量越大,反之则越小。因而该技术通过周期性温度变换可实现吸附-脱附循环进行。②真空变压吸附(VSA)于 1925 年被提出,到 20 世纪 70 年代后 VSA 技术获得了迅速发展。其原理是在高压下( $100 \sim 1\,000\text{ kPa}$ <sup>[5]</sup>)利用气体组分在固体材料上吸附特性的差异,吸附能力强的组分被选择性吸附在吸附剂上,而吸附能力弱的组分排出,从而实现混合气体的分离。当活性炭饱和时进行减压,以抽真空或气流吹扫方式对吸附炭床进行减压至  $5 \sim 100\text{ kPa}$ ,打破吸附平衡,从而实现目标气体脱附富集与吸附剂再生。VSA 通过周期性的压强变换可实现吸附-脱附循环进行。③真空变温变压吸附再生(TVSA)是将 VSA 与 TSA 技术相结合的一种再生方法,通过温度和压强同时改变实现 SAC 再生。其原理为活性炭在低温高压下对吸附物进行吸附,当活性炭吸附饱和后进行减压和升温,打破吸附平衡实现目标气体收集与 SAC 的再生。Thiruvengkatachari 等<sup>[6]</sup>探究了 TVSA 技术对吸附烟气所含  $CO_2$  的 SAC 进行了循环的吸附-脱附试验,再生装置如图 2 所示。研究表明,TVSA 相对于 VSA 不仅降低了再生条件,而且减小了再生能耗,吸附-脱附周期更短,同时可以获得更高纯度的  $CO_2$ 。

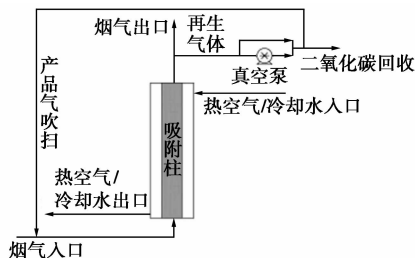


图 2 TVSA 再生系统装置示意图

## 2.2 萃取再生

萃取再生法是利用超临界流体或者有机溶剂相较于活性炭对吸附质具有更大的溶解度,打破吸附质与活性炭的吸附平衡,使得吸附质的传质方向发生改变,由固相吸附进入液相实现SAC的再生。根据再生介质的不同萃取再生通常分为超临界流体萃取再生法和有机溶剂萃取再生法。

超临界流体再生是20世纪70年代末发展起来的一种新技术。一些流体在常压、常温下对某些物质的溶解能力较弱,而在超临界状态下却有巨大溶解能力,常见的有 $\text{CO}_2$ 和水。 $\text{CO}_2$ 在温度 $31^\circ\text{C}$ 和压强 $7.2\text{ MPa}$ 下呈临界状态,液态水在温度 $374^\circ\text{C}$ 和压强 $22\text{ MPa}$ 下呈临界状态。流体在达到临界点后,其特性将会发生非常大的改变,黏性系数和介电常数降低,扩散系数和密度变大<sup>[7]</sup>,此时稍改变压力,溶解度会产生数量级的变化,它们对有机物具有极强的溶解能力。因此利用流体此种特性,把超临界流体作为萃取剂,通过调节压力,让吸附在活性炭上的有机物溶解在超临界流体中。再通过温度压力的变化,将有机物与超临界流体有效分离实现有机物的回收和SAC再生,见图3。有机溶剂萃取再生则是利用有机溶剂对有机物具有较大溶解度的固有性质,来实现吸附质的脱附。有机溶剂再生效率由活性炭、溶剂与吸附物三者相互作用共同决定。①溶剂-活性炭。活性炭的吸附位点通常在微孔内,因而通常选择分子最小或最轻的无机溶剂,使溶剂能够进入微孔内带走吸附物<sup>[8-9]</sup>。②溶剂-吸附物。吸附物在有机溶剂中的溶解度越高,则再生效率越高,因而选择有机溶剂需考虑对吸附物的溶解度。且尽量选择其分子比吸附物分子小的有机溶剂,加快传质速率。③活性炭-吸附物。吸附物与活性炭的结合力越小,越有利于SAC再生,因而与活性炭形成强结合力的吸附质不适用于此法。常用的有机溶剂有甲醇、乙醇和丙酮等。有机溶剂完成萃取再

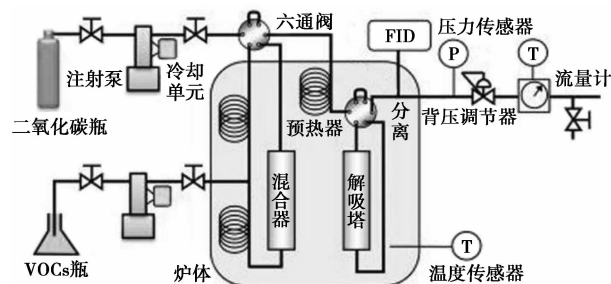


图3 超临界 $\text{CO}_2$ 萃取再生装置示意图

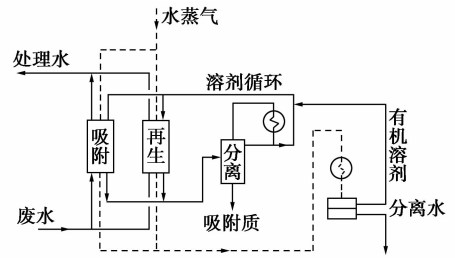


图4 有机溶剂萃取再生装置示意图

生后,需对活性炭进行氮气吹扫,或冷液态水、热水或蒸汽冲洗来去除残留吸附质<sup>[9]</sup>。如图4所示。

## 2.3 脱附再生法的应用现状与优缺点

脱附再生的再生对象通常为以物理吸附形式吸附在活性炭上的吸附质如气体或VOCs等,由于活性炭对吸附质为弱吸附,因而再生条件要求较低,再生效率通常较高。脱附再生法对活性炭的物理结构和表面化学特性影响很小且几乎无再生损耗,同时吸附质容易回收,再生经济性较好,且大多可实现原位再生。

TSA再生广泛应用于烟气脱硫、易挥发性有机物(VOCs)回收、空气分离和气体纯化等,再生损耗较小。其缺点是再生效率易受温度影响,不同吸附质需要确认对应最佳再生温度。且由于TSA是在2条不同温度的等温吸附线之间上下移动进行着吸附-脱附过程,温度影响着吸附炭床的吸附容量,如果吸附炭床温度过高将会对下一个吸附阶段产生阻碍作用<sup>[10]</sup>,因而脱附阶段和吸附阶段之间必须进行降温处理,需要配备大功率的冷凝系统。而且脱附比吸附时间长,因而TSA再生系统通常需要并联运行多个吸附炭床。

而VSA与TVSA再生法广泛应用于空气净化,如温室气体 $\text{CO}_2$ 吸附分离;回收VOCs,如甲烷、乙烷、丙酮等; $\text{H}_2$ 生产的净化。陈道远<sup>[11]</sup>利用VSA技术探究了合成氨过程中 $\text{CO}_2$ 在颗粒活性炭上的吸附再生。利用活性炭对体积分数为20%的 $\text{CO}_2$ 和80%的 $\text{N}_2$ 组成的混合气体进行了6次循环吸附再生,探究表明,活性炭经过多次的循环吸附再生仍然能够保持优良的吸附性能。

超临界流体萃取再生法对吸附甲苯、间二甲苯和甲醇等有机污染物的SAC再生非常快速有效,但其通常不能对强吸附型有机物和重分子污染物(如杀虫剂)以及不溶于超临界流体的吸附质进行再生,对吸附质具有选择性,通过加入有机共溶剂后可以提高超临界流体再生的再生效率。

有机溶剂萃取再生对吸附高溶度、低沸点小分子有机物的 SAC 具有较好的再生效果,但不适用于强吸附作用的有机物以及大分子有机物。且应用较窄,一种溶剂只能脱附某些有机污染物,不适用于吸附多类别有机物的 SAC 再生。且有机溶剂如苯和丙酮具有高毒性,对环境危害很大,目前工业上应用较少。

目前,真空变温变压吸附再生的工业应用相对较为成熟。但所有脱附类方法无法用于复杂有机物,特别是与炭表面通过化学键结合的物质吸附后再生。

### 3 分解再生法

分解再生法再生机制为通过高温使吸附质发生分解,由大分子有机物分解成小分子有机物后脱离,实现 SAC 的再生。分解类再生法主要包括物理波再生、热再生和电再生 3 个子类。

#### 3.1 热再生

热再生法诞生于 20 世纪初,是目前发展历史最长、最成熟、工业应用最广的再生方法。其加热装置主要有回转炉、多层炉、移动炉和流态化炉等。热再生通常分为 3 步骤:①干燥阶段,在 105℃ 下,炭粒内大部分水分蒸发,并伴随着部分 VOCs 一起脱附。②热解阶段,在惰性气体气氛下将 SAC 加热到 800℃ 以上进行分解。105 ~ 400℃ 时,主要为低沸点有机物的热分解和脱附,而 400℃ 以后主要为高沸点有机物发生分解,先由大分子有机物分解成小分子有机物后从活性炭表面脱附,继续分解成 CO<sub>2</sub>、CO 和 H<sub>2</sub>O 等物质。而烧焦残余物和难裂解有机物在高温下炭化,以固定碳形式残留在活性炭孔隙内后积聚,一定程度上减小了再生活性炭的吸附性能。③活化阶段,在 800 ~ 1 000℃ 时通入适量水蒸汽、CO<sub>2</sub> 或两者混合物等弱氧化性气体对残余物进行氧化分解,消除残余物同时恢复原始活性炭的孔隙结构与吸附性能。

#### 3.2 物理波再生

##### 3.2.1 超声波再生

超声波再生是 20 世纪 90 年代发展起来的一项新技术。超声波是指频率在 20 kHz 以上的声波,其作用于液体时会被介质吸收而减弱并产生空穴现象<sup>[12]</sup>。高强度的超声波为克服液体的传递阻力产生空穴,空穴不断长大到达临界尺寸爆裂成小气泡所释放能量导致了 3 种效应<sup>[12-13]</sup>:①形成热点;

②产生高压冲击波;③形成高速液体微射流。空穴的爆裂临界尺寸由超声波的频率以及强度控制,低频率下临界尺寸往往更大。超声波在低频声波(20 ~ 100 kHz)作用下,产生的 3 种效应共同作用于 SAC,能够提高传质系数<sup>[14]</sup>,减弱吸附物与活性炭的结合力,加快吸附物从固相向液相的脱附和热分解作用。超声波为高频时(300 ~ 800 kHz),除产生 3 种效应,空穴爆裂还会与周围液体分子摩擦使空穴处带电产生电离,电离的发生会导致水分子的解离,生成大量的羟基自由基对吸附物产生化学效应<sup>[15]</sup>,加快 SAC 的再生。如图 5 所示。

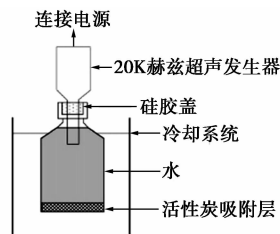


图 5 超声波再生装置

##### 3.2.2 微波再生

微波是一种频率在 300 MHz ~ 300 GHz 的电磁波。微波再生发展自热再生。SAC 中吸附质大多是强极性物质,介质损耗因数通常较大,在磁场作用下易极化、磁化,通过偶极子的旋转和离子迁移诱发分子搅动使得分子间相互摩擦将微波的电磁能量转化为热能<sup>[16]</sup>,使吸附物受热分解和脱附,再通入弱氧化性气体,进一步恢复活性炭的孔隙结构实现 SAC 再生。再生装置如图 6 所示,SAC 的升温速率和再生效率的大小主要取决于吸附质的介质损耗因数的大小<sup>[17]</sup>。该加热方式从内到外全体积直接加热,不存在温度梯度,通常快速且均匀,几分钟可以实现高达 1 000℃ 的升温<sup>[18]</sup>。

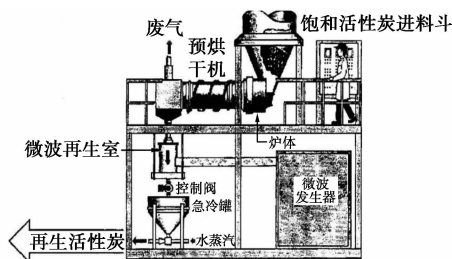


图 6 微波再生系统装置

#### 3.3 电再生

电再生和热再生的再生机制一样,都是通过高温使得吸附物受热分解和脱附实现再生,区别在于

再生介质不同。电再生以电流作为再生介质,利用活性炭的导电性对活性炭施加电压,通过焦耳热效应使得吸附物受热分解和脱附,再对炭床通入弱氧化性气体  $\text{CO}_2$  或水蒸汽,对残余物进行氧化分解可以进一步恢复原始活性炭的孔隙结构实现 SAC 的再生。电再生技术的加热方式为从内到外全体积直接加热,相较于热再生技术不存在温度梯度,使得吸附物的脱附传质更为快速。

日本学者在 1976 年就提出了电再生的活性炭再生专利,见图 7,流经电极的活性炭颗粒之间还会产生电弧放电,产生电锤效应,同时使得内部间隙中少量的氧气变成臭氧,可以进一步提高再生效率。电再生法利用焦耳效应对 SAC 加热再生,因而其再生效率受电阻大小的影响,适宜于低电阻下的 SAC 再生。而应用于水处理的颗粒状活性炭,因为表面吸附了大量的有机物,特别是在目前水厂臭氧生物活性炭技术的大量应用,其表面还存在一层生物膜,这些有机物和生物膜如同在表面包裹了一层厚厚的有机绝缘层,使得其电阻成百上千倍地升高。这时低电压下难以对饱和活性炭进行导电加热,而当加载在电极板两端的电压过高时,会产生击穿现象,造成活性炭的大量烧结与烧损。对此,我国研究者曾提出了一种高压脉冲再生方式,采用 11 kV 的高压电对 GAC 进行脉冲放电,见图 8,在实验室中成功实现吸附苯酚的 GAC 的再生。但该方法对设备及其控制提出了很高的要求,真正要实现工业化应用还需要较长的时间。

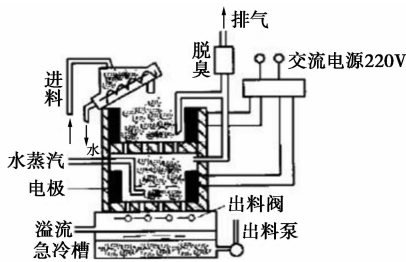


图7 两段式电弧放电再生装置

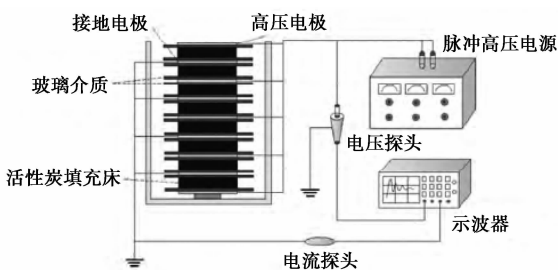


图8 介质阻挡放电再生装置示意图

### 3.4 分解再生法的应用现状与优缺点

环境污染的加剧以及污染物多样化使得吸附物质种类复杂化,活性炭在这方面使用量增大。这其中,相当多的有机污染物与活性炭的吸附呈现以化学键相结合的形式,再生过程都存在着化合物的分解,不同的吸附物质在活性炭再生时具有不同的行为特性。这方面的应用与研究是活性炭领域的一个研究热点。

超声波再生对苯酚、硝基酚、氯酚等有较好的再生效果。相较于热再生,具有再生损耗小,再生设备简单等优点。但再生效率不高,对吸附物具有选择性。Lim 等<sup>[15]</sup>利用 20 kHz 超声波对吸附三氯乙烯 (TCE) 的 SAC 进行了再生试验,结果显示,仅位于活性炭表层的 TCE 得到了去除,无法有效再生。

微波选择性加热的特性决定了再生对象需要具有较高的介质损耗因数,因而通常适用于极性吸附物 SAC 的再生,如苯酚、甲苯、丙酮等 VOCs,具有一定的局限性。但微波再生和电再生一样具有较高的再生效率和较短的再生时间,相对于热再生法能耗更小。但目前微波再生的应用受限于微波穿透深度,频率为 2 450 MHz 时传统深度大约为 12.2 cm,还很难满足工业规模的应用。

分解再生中的热再生作为最成熟、工业应用最为广泛的活性炭再生法,源于其良好的通用性,适用于不同形态和吸附多种吸附质的 SAC,以及较高的再生效率。热再生广泛应用于多类别污染物情况下的污水、废气等处理,其中利用水蒸汽活化的蒸汽热再生法应用最为广泛。热再生目前能耗较高、再生损耗较大,其中大于 50% 的能耗用于干燥阶段,而再生损耗通常达到 5% ~ 15%。且再生时间通常较长,这源于其较慢的升温速率,和设备通常较为复杂。这些问题的存在推动了在热再生法的基础上发展而来的电再生法。

电再生是一种新型热再生技术,通用性较好,再生效率高,另外焦耳效应加热显著减少了再生时间,加热更均匀,再生损耗更小。但其缺点在于再生效率易受 SAC 的电阻影响,吸附了大量有机物的 SAC 电阻率增加,使得电再生的升温速率变慢而影响再生<sup>[19]</sup>。所以低电阻率的 SAC 如饱和活性炭布和饱和活性炭纤维都有较好的再生效率,而对于电阻偏大的颗粒状 SAC 电再生较为困难。特别是目前水厂臭氧生物活性炭技术 ( $\text{O}_3$ -BAC) 的应用,在延长了活性炭使用周期的同时,也使得活性炭表面形成

一层较厚的生物膜,形成绝缘层,必然会进一步增大活性炭电阻率,使之无法直接进行电再生。

#### 4 总结与展望

目前,在物理两类再生方法中,主要用于烟气脱硫、VOCs 的回收,空气分离和气体纯化等方面的脱附类再生方法中的变温变压吸附再生等技术的工业应用已经较为成熟。但对于用于吸附诸多复杂有机污染物的分解类再生方法的研究,还存在着实验研究与工业实际应用的差距,这主要包括:①目前在实验室进行的研究过程中,往往采用一种吸附物质制备的饱和活性炭进行再生,而目前环境有机污染面临着多样性与复杂性,与活性炭工业应用情况不符。②目前水厂臭氧生物活性炭技术应用越来越广泛,在延长了活性炭使用周期的同时,也使得活性炭表面形成一层较厚的生物膜,必然对活性炭的再生过程产生较大影响,而目前对其有针对性的再生方法研究较少。③对工业应用中的一些关键因素,如单位再生能耗、再生时间等经济参数以及设备的小型化、易用性、易维护性、可靠性等进行系统研究较少。

鉴于目前活性炭吸附物质的复杂多样性,未来活性炭再生方法研究应着眼于通用性较好的再生手段,以工业应用需求为导向,在现有的热再生基础上,以目前工业应用广泛的热再生与经济参数为参照,同时考虑再生设备的易用性、价格、小型化等因素,并通过结合不同再生方法的优点进行创新,对再生方法进行系统研究。因为目前对于吸附多种复杂有机物的活性炭再生,没有一种单纯的再生手段能够较完美地实现工业再生,故结合不同再生手段的方法是一切实可行的选项,同时,结合活性炭中不同有机物的物理和化学吸附原理,采用不同的再生手段对不同吸附原理的有机物分类再生,应该是今后的研究发展方向之一。

#### 参考文献

[1] 杨颖,李磊,孙振亚,等. 活性炭表面官能团的氧化改性及其吸附机理的研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(24):6132-6138.

[2] 李艳芳,孙仲超. 国内外活性炭产业现状及我国活性炭产业的发展趋势[J]. 新材料产业,2012,(11):4-9.

[3] Zanella O, Tessaro I C, Férés L A. Desorption- and decomposition-based techniques for the regeneration of activated carbon[J]. Chemical Engineering & Technology,2014,37(9):1447-1459.

[4] Salvador F, Martin-Sanchez N, Sanchez-Hernandez R, et al. Regen-

eration of carbonaceous adsorbents. Part I: Thermal regeneration[J]. Microporous & Mesoporous Materials,2015,202(1):259-276.

[5] Salvador F, Martin-Sanchez N, Sanchez-Hernandez R, et al. Regeneration of carbonaceous adsorbents. Part II: Chemical, microbiological and vacuum regeneration[J]. Microporous & Mesoporous Materials,2015,202:277-296.

[6] Thiruvenkatachari R, Su S, Yu X X, et al. Application of carbon fibre composites to CO<sub>2</sub> capture from flue gas[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2013,13:191-200.

[7] Salvador F, Sánchez-Montero M J, Salvador A, et al. Study of the energetic heterogeneity of the adsorption of phenol onto activated carbons by TPD under supercritical conditions[J]. Applied Surface Science,2005,252(3):641-646.

[8] Lu P J, Lin H C, Yu W T, et al. Chemical regeneration of activated carbon used for dye adsorption[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers,2011,42(2):305-311.

[9] He X, Male K B, Nesterenko P N, et al. Adsorption and desorption of methylene blue on porous carbon monoliths and nanocrystalline cellulose[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2013,5(17):8796-8804.

[10] Kim K J, Kang C S, You Y J, et al. Adsorption-desorption characteristics of VOCs over impregnated activated carbons[J]. Catalysis Today,2006,111(S3/4):223-228.

[11] 陈道远. 变压吸附法脱除二氧化碳的研究[D]. 南京:南京工业大学,2003.

[12] 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.

[13] Breitbach M, Bathen D. Influence of ultrasound on adsorption processes[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2001,8(3):277-283.

[14] 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.

[15] Lim J L, Okada M. Regeneration of granular activated carbon using ultrasound[J]. Ultrasonics Sonochemistry,2005,12(4):277-282.

[16] Wei M C, Wang K S, Lin I C, et al. Rapid regeneration of sulfanilic acid-sorbed activated carbon by microwave with persulfate[J]. Chemical Engineering Journal,2012,193:366-371.

[17] Çalışkan E, Bermúdez J M, Parra J B, et al. Low temperature regeneration of activated carbons using microwaves: Revising conventional wisdom[J]. Journal of Environmental Management,2012,102:134-140.

[18] Zhang L, Jiang H, Yong D. Microwave regeneration characteristics of activated carbon for flue gas desulfurization[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology,2012,40(11):1366-1371.

[19] 占戈. 活性炭电再生技术的实验研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学,2012. ■