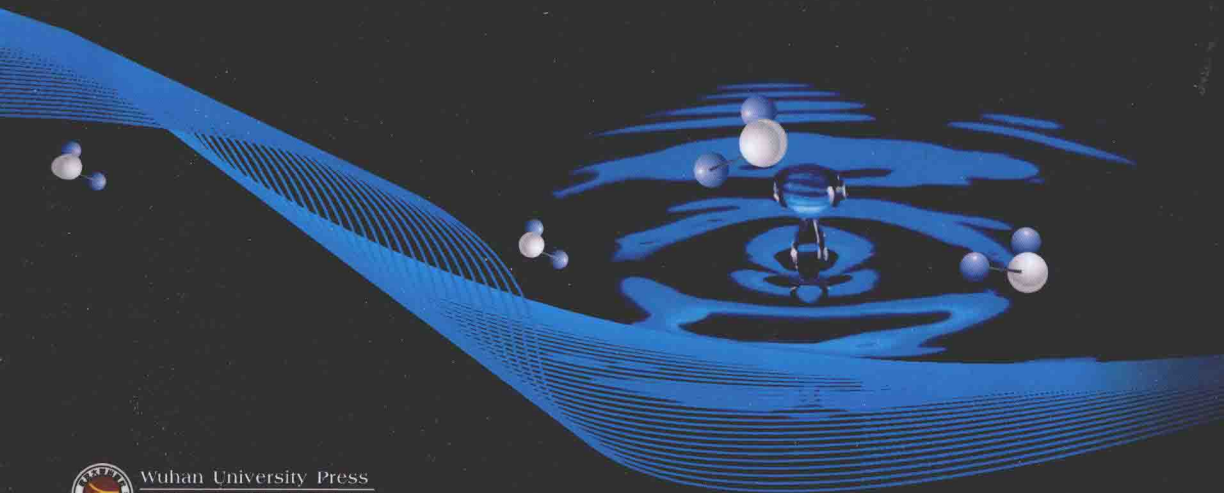


纳米技术

在水污染控制中的应用

NAMI JISHU
ZAI SHUIWURAN KONGZHIZHONG DE YINGYONG

谢昆 陈星 付川 祁俊生 / 著



Wuhan University Press
武汉大学出版社

纳米技术在水污染控制中的应用

谢昆 陈星 付川 祁俊生 著



Wuhan University Press

武汉大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

纳米技术在水污染控制中的应用/谢昆, 陈星, 付川著. —武汉: 武汉大学出版社, 2014. 7

ISBN 978-7-307-13841-4

I. 纳… II. ①谢… ②陈… ③付… III. 纳米技术—应用—水污染—污染控制—研究 IV. X520.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 167407 号

责任编辑: 刘倩

责任校对: 何玲

版式设计: 三山科普

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷: 北京京华虎彩印刷有限公司

开本: 787×960 1/16 印张: 11.75 字数: 229 千字

版次: 2014 年 6 月第 1 版 印次: 2014 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-13841-4 定价: 26.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购买我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

内 容 简 介

纳米技术是 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一，各种纳米材料已经能够方便地被合成出来，对纳米结构表面的化学修饰也已经取得了重要进展。纳米颗粒具有比表面积大、表面活性位点多、表面反应活性高、催化效率高、吸附能力强等特性，因此被引入水污染控制的研究中，并表现出显著的效果，逐渐成为当今环境领域的研究热点之一。本书对我国水资源现状、水质问题进行了概括性分析和探讨，系统地介绍了近年来纳米技术在水污染控制各个领域的研究进展以及应用如纳米吸附剂、纳米光降解催化剂、纳滤膜、纳米传感器、纳米絮凝剂、纳米修复剂等，并对该领域研究的发展方向进行了论述。

本书提供了大量应用实例，适合水处理行业、环境功能材料研发的相关人员参考，同时也可作为给水排水工程、环境科学与工程等相关专业高等院校师生的参考书。

前 言

近年来,随着广大人民群众和国民经济各部门对用水的水质、水量的要求不断提高,以及我国可持续发展战略和环境保护政策的实施,水污染控制技术得到了广大给水排水、环境工程、环境科学、化学化工、石油、冶金等许多领域的工程技术人员关注,从而也获得了迅速发展。纳米技术是 21 世纪前沿科学技术的代表领域之一,各种纳米材料已经能够方便地被合成出来,对纳米结构表面的化学修饰也已经取得了重要进展。纳米技术为材料和器件领域提供了崭新的思考方式,进而影响了其他许多领域。用纳米尺度结构作为可调的物理变量,大大扩展了现有化学物质和材料的性能。纳米颗粒具有比表面积大、表面活性位点多、表面反应活性高、催化效率高、吸附能力强等特性,因此被引入水污染控制的研究中,并显示出显著的效果,逐渐成为当今环境领域的研究热点之一。

本书共编著七章。第 1 章概述了纳米材料的定义、类型和特性,并对后面章节中要详细阐述的各类纳米材料应用领域做了简要介绍;第 2 章介绍了碳纳米管、富勒烯、石墨烯和金属-有机骨架等新型纳米吸附剂的特性,以及它们对水中各类污染物的吸附处理应用;第 3 章重点介绍了纳米 TiO_2 作为光降解催化剂在水处理中的应用;第 4 章介绍了纳滤膜技术;第 5 章论述了纳米传感器在环境监测中的应用;第 6 章介绍了水处理混凝技术和各种纳米絮凝剂在水处理中的应用;第 7 章介绍了纳米技术在环境修复中的应用实例,包括工程实例,并展望了纳米技术在水污染防治领域的发展前景。

本书参编人员均是在相关技术领域开展研究与教学的中青年专业人员。第 1 章、第 2 章、第 5 章和第 6 章由谢昆完成;付川主持撰写了第 3 章;陈星负责撰写第 4 章;祁俊生撰写了第 7 章,并对全书的整体构思提出了很多建设性意见。全书由谢昆负责统编。

在本书的编写过程中,引用了一些论著中的部分文字、图表和数据,对于所引文献的作者,我们表示衷心的感谢。本书是在武汉大学出版社的大力支持和帮助下出版的,对他们的关心和辛勤劳动,也表示衷心的感谢。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏之处,恳请读者给予批评指正。

谢 昆

目 录

内容简介

前言

第一章 绪论	1
1.1 纳米材料概述	1
1.2 水资源概况	2
1.3 水污染控制	4
1.4 纳米技术在水污染中的应用概述	6
参考文献	7
第二章 纳米吸附剂	8
2.1 概述	8
2.2 碳纳米管	16
2.3 富勒烯和石墨烯	27
2.4 金属-有机骨架(MOF)材料	39
参考文献	53
第三章 纳米光降解催化剂	63
3.1 概述	63
3.2 纳米 TiO_2 的改性研究	68
3.3 纳米 TiO_2 在水处理中的应用	80
参考文献	88
第四章 纳滤膜	96
4.1 概述	96
4.2 纳滤膜分离机理及模型	97
4.3 有机纳滤膜	101
4.4 无机纳滤膜	109
参考文献	114
第五章 纳米传感器	118
5.1 传感器概述	118
5.2 纳米敏感材料与纳米传感器	122

5.3 纳米传感器在水质监测中的应用	129
参考文献.....	142
第六章 纳米絮凝剂.....	148
6.1 混凝技术概述	148
6.2 混凝剂(絮凝剂)及其效能	150
6.3 絮凝机理	154
6.4 纳米絮凝剂的水处理应用	158
参考文献.....	166
第七章 纳米技术在水污染控制中的其他应用.....	170
7.1 地下水修复	170
7.2 纳米螯合剂和多孔纳米聚合物	175
7.3 展望	177
参考文献.....	178
附录 中英文常用术语缩写对照.....	179

第一章 绪 论

1.1 纳米材料概述

1.1.1 纳米材料的定义及类型

纳米材料又称为超微颗粒材料，是指三维空间中至少有一维处于纳米尺度范围（1~100nm）或由纳米粒子作为基本单元构成的材料。

纳米量级的材料因其物质颗粒接近原子大小，其物质的性能发生突变，产生了常规颗粒所不具备的效应（小尺寸效应、表面效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应），表现在机械性能、磁、光、电、热等方面与传统材料有很多大的不同，具有辐射、吸收、催化、吸附及二元协同性等许多新特性，使得它在很多领域有着广阔的应用前景。

1.1.2 纳米材料的特性

1. 小尺寸效应

由于纳米材料中的微粒尺寸小到光波波长或德布罗意波波长、超导态的相干长度等物理特征相当或更小时，晶体周期性的边界条件被破坏，非晶态纳米微粒的颗粒表面层附件原子密度减小，使得材料的声、光、电、磁、热、力学等特征出现改变而导致新的特性出现的现象，被称为纳米材料的小尺寸效应。

2. 表面效应

纳米材料由于其组成材料的纳米粒子尺寸小，微粒表面所占有的原子数目远远多于相同质量的非纳米材料粒子表面所占有的原子数目。随着微粒子粒径变小，其表面所占粒子数目呈几何级数增加。单位质量粒子表面积的增大，表面原子数目的骤增，使原子配位数严重不足。高表面积带来的高表面能，使粒子表面原子极其活跃，很容易与周围的气体反应，也容易吸附气体。这一现象被称为纳米材料粒子的表面效应。

3. 量子尺寸效应

在纳米材料中，微粒尺寸达到与光波波长或其他相干波长等物理特征尺寸相当或更小时，金属费米能级附近的电子能级由准连续变为离散并使能隙变宽的现象称为纳米材料的量子尺寸效应。

4. 宏观量子隧道效应

纳米材料中的粒子具有穿过势垒的能力被称为隧道效应。宏观物理量在量子相干器件中的隧道效应称为宏观量子隧道效应。例如磁化强度：具有铁磁性的磁铁，其粒子尺寸达到纳米级时，即由铁磁性变为顺磁性或软磁性。

以上四种效应体现了纳米材料的基本特征。除此以外，纳米材料还有在此基础上的其他特征，例如介电限域效应、表面缺陷、量子隧穿等。

1.2 水资源概况

1.2.1 水资源总量及分布

水是人类及一切生物赖以生存的必不可少的重要物质，是工农业生产、经济发展和环境改善不可替代的极为宝贵的自然资源。目前地球上水的总贮量约有 13.9 亿 km^3 ，其中约 97% 为海洋咸水，不能直接为人类利用，可供人类直接利用的淡水资源是十分有限的。人类目前比较容易利用的淡水资源，主要是河流水、淡水湖泊水以及浅层地下水。这些淡水储量只占全部淡水的 0.3%，占全球总水量的十万分之七，即全球真正有效利用的淡水资源每年约有 9000 km^3 。

即使是这有限的淡水，分配又极不平衡。世界每年约有 65% 的水资源集中在不到 10 个国家中，而占世界总人口 40% 的 80 个国家却严重缺水，水源最丰富的地方是拉丁美洲和北美洲，而在非洲、亚洲、欧洲人均拥有的淡水资源就少得多。

1.2.2 全球水资源面临的问题

1) 人类对水资源需求不断增加，水资源总量严重不足。马林·福马肯马克曾提出了一个衡量缺水状况的人均标准，即所谓“水关卡”。按照这一标准，每人每年应有可用淡水 1000 m^3 ，如果低于这个标准，现代社会就会受到制约。用这个标准来衡量，目前许多国家都低于这个标准。如肯尼亚每人每年只有 600 m^3 ，约旦仅有 300 m^3 ，埃及仅有 20 m^3 。

在 20 世纪，世界人口增加了两倍，而人类用水增加了 5 倍。世界上许多国家正面临水资源危机：12 亿人用水短缺，30 亿人缺乏用水卫生设施，每年有 300 万~400 万人死于和水有关的疾病。到 2025 年，水危机将蔓延到 48 个国家，35 亿人为水所困。水资源危机带来的生态系统恶化和生物多样性被破坏，也将严重威胁人类生存。

2) 经济发展带来水资源污染问题日益严重。联合国水资源世界评估报告显示，全世界每天约有 200t 垃圾倒进河流、湖泊和小溪，每 1L 废水会污染 8L 淡

水；所有流经亚洲城市的河流均被污染；美国 40% 的水资源流域被加工食品废料、金属、肥料和杀虫剂污染；欧洲 55 条河流中仅有 5 条水质差强人意。

例如，欧洲著名的莱茵河曾因工业污染使河中鱼类消失殆尽。伏尔加河沿岸 75% 的工业废水未经处理就排入河中。亚洲的大部分河流被污染。欧盟的一份报告中指出，在欧洲，农药对地下水的污染比预计的要严重得多，从现在起 50 年内， 60000m^3 的含水层将受到这种污染。

水资源污染主要来自人类所有制造排放的废水、废气和废渣。长期以来，人们并不把治理污水放在心上，而放任污水横流，甚至把大江小河当做城市“清洁器”，指望江水带走垃圾和废物。全世界每年排放污水约为 4260 亿 t，造成 55000亿 m^3 的水体受到污染，约占全球径流量的 14% 以上。据联合国调查，全球河流的稳定流量的 40% 左右已被污染。

“世界自然基金会”曾经在题为《世界面临最严重危险的 10 条河流》的报告中列出了受威胁最深的大河：亚洲的湄公河、怒江、长江、恒河和印度河，欧洲的多瑙河，南美洲的拉普拉塔河，北美洲的格兰德河，非洲的尼罗河，大洋洲的墨累-达令河。“世界自然基金会”称，这 10 条“人类的血脉”正遭受人为破坏：河水被抽干，水坝破坏生态系统，污染严重，而生活在流域中的人类和野生动物也面临威胁，全球有大约 41% 的人口居住在这些流域，1 万种淡水动物和植物中至少 20% 已经灭绝。

1.2.3 我国水资源现状

1. 我国水资源状况及特点

我国水资源总量约为 2.8 万亿 m^3 。其中地表水 2.7 万亿 m^3 ，地下水 0.83 万亿 m^3 ，由于地表水与地下水相互转换、互为补给，扣除两者重复计算量 0.73 万亿 m^3 ，与河川径流不重复的地下水资源量约为 0.1 万亿 m^3 。目前，我国有 16 个省（区、市）人均水资源量（不包括过境水）低于严重缺水线，有 6 个省、区（宁夏、河北、山东、河南、山西、江苏）人均水资源量低于 500m^3 。

我国水资源的主要特点是：

1) 总量并不丰富，人均占有量更低。中国水资源总量居世界第六位，人均占有量为 2240m^3 ，约为世界人均的 $1/4$ ，在世界银行连续统计的 153 个国家中居第 88 位。

2) 地区分布不均，水土资源不相匹配。长江流域及其以南地区国土面积只占全国的 36.5%，其水资源量占全国的 81%；淮河流域及其以北地区的国土面积占全国的 63.5%，其水资源量仅占全国水资源总量的 19%。

3) 年内年际分配不匀，旱涝灾害频繁。大部分地区年内连续四个月降水量占全年的 70% 以上，连续丰水或连续枯水年较为常见。

2. 我国水资源开发利用存在的问题

多年来,来自于水质监测一线的水质污染数据显示:人口数量的几何增长、现代工业废水的乱排乱放、城市垃圾、农村农药喷洒等,造成本来已是极少的淡水资源加剧短缺。据统计,全国各大城市地下水不同程度受到污染,全国 78 条主要河流有 54 条遭污染。七大水系中有一半河段受到污染,86%城市河段污染超标,比较严重的有:黄河、淮河、辽河、太湖、巢湖、滇池等河流湖泊。

目前我国水资源开发利用主要存在以下几个问题:第一,农业用水、工业用水和人们的生活用水不断增加。水资源的供需矛盾日益突出,城市供水严重不足,已经不能满足社会生产和人们的生活需求。第二,水资源遭到严重污染,水质不断下降。由于农业用药和工业生产而造成的水污染现象越来越严重,从而造成水资源的相对紧缺。由于工业生产的用水量剧增而大量开采地下水,从而导致地下水形成漏斗区,给海水倒灌提供了便利。第三,过度开采水资源,破坏生态环境。为了满足日益增加的生产生活用水量,人们不断开采水资源,从而破坏大量的植被,加剧了水土流失。

1.3 水污染控制

1.3.1 水污染概念

自然界中的水并非静止不动的,而是处在不断的循环运动中,包括自然循环和社会循环。在水循环系统中,由于非水环境污染进入水中的杂质,称为自然杂质或者本底杂质;由于环境污染进入水中的杂质,称为污染物。当进入水体中的污染物量超过了水体自净能力而使水体丧失了规定的使用价值时,称为水体污染或者水污染。

水环境可受到多方面的污染,其中主要污染源有:①大气降水及地面径流;②农业面源污染;③向自然水体排放的各类污、废水;④垃圾、固体废弃物及其渗出液;⑤船舶废水、固体废弃物及船舶漏油。其中最普遍的污染源为降雨及农业面源污染和排放的各类污、废水。

不同污染源造成的水体污染主要有以下几种基本类型:

1) 需氧型污染:大多数有机物(及少数无机物)被水体中的微生物吸收利用时,需要消耗水中的溶解氧。溶解氧降低到一定程度后,水中的生物就无法生活。溶解氧耗尽后,水质就腐化,发黑变臭,恶化环境。这种由于废水中的有机物而引起的水体污染,称为需氧型污染,或有机污染。我国绝大多数水环境的污染属于这种污染类型。

2) 毒物型污染:废水中的有机毒物(如酚、农药等)、无机毒物(如各类重

金属)以及放射性物质等排放到水体后,会使水生生物受害中毒,并通过食物链危害人体健康。当饮用或接触被这类污染物污染的水时,能直接危害人体健康。这种因毒物排入而造成的水体污染,称为毒物型污染。

3) 富营养型污染:含氮和磷浓度较高的废水一旦排入水环境,就会大量滋长藻类及其他水生植物。当这些水生植物死亡时,就会使水中的需氧物猛增,危害水生生物的生长。长期的富营养化过程会使一个水体衰老化,由杂草丛生逐渐演变成沼泽。水环境的富营养型污染相对普遍,已成为当今世界普遍关注的环境问题之一。

4) 感官型污染:废水中的许多污染物能使人感到很不愉快,颜色、臭味、泡沫、浑浊就属于此类污染现象,它对旅游环境的影响十分严重。

5) 其他污染:浮油、酸碱、病原体、热水等污染物能引起各具特色的水体污染,造成不同的污染危害。

1.3.2 水污染控制的目的

控制废水水质有三个基本目的:

(1) 满足再生利用(循环再用或连续再用)的要求。

各种生产过程对用水水质都提出了各自的水质标准。凡再用于原生产工艺或另一生产工艺的废水,其水质必须符合相应的水质标准。当废水再用于多种用水目的时,应达到对水质要求较高的用水的水质标准。

(2) 满足资源回收的要求。

与上述过程相同,回收废水中的有价资源时,一般要求先实施适当的预处理,以利于回收工序的有效进行。

(3) 满足废水排放的要求。

为了保护水环境不受污染危害,排放的废水必须符合国家颁布的《污染物综合排放标准》(GB8978—1996)

1.3.3 废水处理基本方法

废水处理相当复杂,处理方法的选择,必须根据废水的水质和数量,排放到的接纳水体或水的用途来考虑。同时还要考虑废水处理过程中产生的污泥、残渣的处理利用和可能产生的二次污染问题,以及絮凝剂的回收利用等。常用的废水处理基本方法可以分为以下几种:

1. 物理法

废水处理方法的选择取决于废水中污染物的性质、组成、状态及对水质的要求。利用物理作用处理、分离和回收废水中的悬浮物和部分的胶体污染物。例如用沉淀法除去水中相对密度大于1的悬浮颗粒的同时回收这些颗粒物;浮选法

(或气浮法)可除去乳状油滴或相对密度近于1的悬浮物;过滤法可除去水中的悬浮颗粒;蒸发法用于浓缩废水中不挥发性的可溶性物质等。

2. 化学法

根据废水中污染物质的特性,利用化学化用、电化学作用等方法去除废水中污染物的过程。例如,化学沉淀法一般用于处理含金属离子、有毒物如氰化物等的工业废水;中和法用于中和酸性或碱性废水;萃取法利用可溶性废物在两相中溶解度不同的“分配”,回收酚类、重金属等;氧化还原法用来除去废水中还原性或氧化性污染物,杀灭天然水体中的病原菌等。

3. 生物法

利用微生物的生化作用处理废水中的有机物。例如,生物过滤法和活性污泥法用来处理生活污水或有机生产废水,使有机物转化降解成无机盐而得到净化。

1.4 纳米技术在水污染中的应用概述

纳米材料由于其独特的结构特征使得它们在机械性能、磁、光、热、电等方面与普通材料有很大的不同,具有辐射、吸收、催化、吸附等新的特性。纳米技术的发展开发出众多环境污染控制的高效功能材料,应用在大气、水体、土壤和其他环境治理和修复方面。其中在水污染控制中占重要的地位并且应用范围甚广,几乎遍及各种防治技术(图1-1),主要类别有吸附剂、光催化剂、过滤剂、氧化剂、还原剂、监测传感器等,品种繁多不胜枚举。

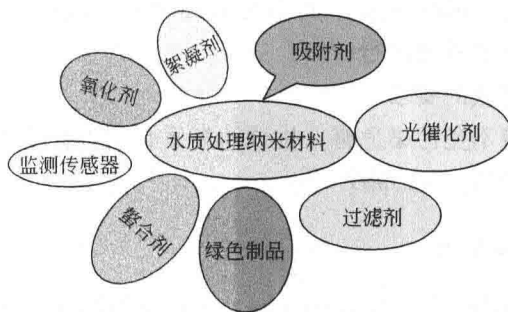


图 1-1 水污染控制中的纳米材料

纳米材料与纳米技术已经深入水污染控制的几乎所有方面,并且迅速扩大其影响,可以预期,以纳米材料和技术为主导的水质控制工艺将成为重要的发展方向,并可能改变工艺流程和相应设施,大大提高节能减排的效率和改善环境质量。

参考文献

- [1] 刘焕彬, 陈小泉. 纳米科学与技术导论 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 彭党聪. 水污染控制工程 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [3] 国家自然科学基金委员会化学科学部. 环境化学学科前沿与展望 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.

第二章 纳米吸附剂

2.1 概述

吸附是指固体物质表面富集周围液体或气体介质中分子或离子的过程，是自然界中普遍存在的一种现象，根据作用力的不同，通常包括物理吸附和化学吸附。吸附也是一种传质过程，具有大比表面积的多孔材料往往具有较强的吸附能力。吸附法是去除环境中污染物最为快速有效的方法之一，受到普遍关注，其中在高效吸附材料是核心。吸附材料可分为多孔吸附材料和无孔吸附材料，近年来纳米吸附材料受到广泛关注。

在吸附控制技术研究中，主要内容包括吸附剂制备、吸附剂性能表征、吸附特性和吸附机理研究以及脱附再生性能评价；在环境吸附过程（污染过程）研究中，主要研究吸附与脱附特性以及吸附机理^[1]。

2.1.1 吸附剂制备和评价方法

制备高效吸附剂是吸附控制技术研究的关键，也是吸附研究的热点。由于吸附介质（气相和液相）和吸附质的不同，对高效吸附剂的性质要求也不同。在气体吸附中，要求吸附剂有高比表面积和较小的孔径，而溶液中吸附污染物较为复杂，既要考虑多孔吸附剂的孔径大小和吸附质大小的关系，也要考虑吸附剂表面官能团和吸附质之间的作用力。从制备吸附剂的目的来看，通常可通过提高吸附剂的比表面积、提高吸附官能团的密度以及控制孔径大小来提高吸附剂的吸附性能。

吸附剂的种类繁多、性能各异，评价方法非常重要。通常对吸附剂的吸附量、吸附速率、选择性、再生性以及材料成本等指标进行评价。

1. 吸附量

最大吸附量是吸附剂吸附能力的重要指标之一，取决于材料的比表面积和表面官能团密度等因素。通过吸附等温线，可以测得或模拟出最大吸附量。但需要指出的是，不同吸附条件下的吸附量不具有可比性，因此在比较不同吸附剂的吸附量时一定要注意吸附条件（如溶液 pH、温度等），并且需要将最大吸附量的条件加以说明，如是试验得出的，还是模拟得出的。

2. 吸附速率

吸附速率也是评价吸附剂性能的重要指标之一。通常认为污染物在多孔材料上的吸附速率慢,在无孔的材料表面吸附速率快。污染物(吸附质)在多孔材料上的吸附通常分为四个步骤完成:①吸附质从液相主体向固体表面液膜的扩散,此过程称为外扩散;②吸附质通过固体表面液膜向固体外表面的扩散,称为膜扩散(film diffusion),液膜是固体表面的滞留边界层,其厚度和搅拌强度或流速有关;③吸附质在颗粒内部的扩散,污染物从吸附剂的外表面进入吸附剂的内部孔道,然后扩散到固体的内表面,由孔隙内溶液中的扩散(pore diffusion)和孔隙内表面的二维扩散(interior surface diffusion)两部分组成;④吸附质在吸附剂固体内表面上被吸附剂所吸附,称为表面吸附过程。内扩散通常是整个吸附过程的限速步骤,决定了吸附速率。

此外,一般认为物理吸附速率快、化学吸附速率慢,化学吸附的速率和吸附表面的官能团以及吸附机理都有密切关系。利用动力学模型(如拟二次动力学模型)模拟吸附动力学,可以得出吸附的初始速率,进而判断初始吸附速率的快慢。

3. 选择性

吸附剂的选择性在实际使用中非常关键。当环境介质中的目标吸附质浓度低时,高浓度的污染物往往会降低吸附剂的吸附能力。吸附剂的选择性取决于材料的特异基团和专一性位点。例如,吸附剂表面的巯基($-SH$)对汞有很强的专一吸附。环境污染分析和控制中非常需要高选择性的吸附剂,应用前景广泛。

4. 再生性

在污染控制中,吸附剂不仅需要有优异的吸附性能,而且要有良好的再生性能,可以重复使用。吸附剂再生是污染物的脱附过程,通常采用酸、碱、盐溶液和有机溶剂对吸附剂进行再生。吸附剂再生后进行吸附试验,可以评价吸附剂的重复吸附效果。如果吸附效果不断降低,多次吸附一再再生后吸附剂失效。

5. 材料成本

吸附剂的成本直接决定吸附剂的实际应用。改性提高了吸附剂的吸附效果,但同时也增加了吸附剂的制造成本。因此,在实际应用中要综合评价吸附剂的多种指标,选择性价比合适的吸附剂。

2.1.2 吸附剂的性能表征

吸附剂的物化性质与其吸附性能和机理关系密切,因此需要对吸附剂进行性能表征。吸附剂的物化性质包括颗粒大小、表面内部形貌特征、表面电性、材料的比表面积和孔分布、表面官能团种类及密度、材料组成及晶型等。

1. 吸附剂的形貌

吸附剂的形貌特征可以通过扫描电子显微镜 (SEM)、透射电子显微镜 (TEM) 和原子力显微镜 (AFM) 来直接观测。SEM 显现的是材料的二维表面形貌；TEM 观测的是材料内部或表面的结构；AFM 能够观测到材料的三维立体表面结构。

2. 表面官能团种类及密度

吸附剂表面的官能团种类可以通过傅里叶红外光谱 (FTIR)、拉曼光谱、X 射线光电子能谱 (XPS) 等手段来判断。表面官能团的定量分析可以通过滴定法进行，如含有多种官能团，每种官能团的定量分析比较困难，但可以通过酸碱滴定测定酸性和碱性基团的总密度，离子基团可以通过离子交换法测定基团密度。

3. 表面电荷及密度

吸附剂的电性是判断静电作用力是否参与吸附过程的直接依据。根据特定官能团的 pK_a 值可以从理论上计算出材料表面电性，但材料含有多种基团时难以判断。常用酸碱滴定或 Zeta 电位分析来判断表面电性和电荷密度，电荷为零的溶液 pH 称为等电点或零电点。酸碱滴定法能够测定吸附剂的零电点 (point of zero charge, PZC)，而 Zeta 电位分析仪可以测得吸附剂的等电点 (isoelectronic point, IEP)。多孔材料通常通过滴定法测定，而无孔的粉末材料采用 Zeta 电位分析仪测定。无孔材料的 IEP 接近 PZC，而多孔材料的 IEP 要小于 PZC。

4. 比表面积和孔分布

比表面积是多孔吸附材料的重要参数，多采用较为成熟的 BET 吸附法测定，单位是 m^2/g 。多孔吸附剂的孔大小和体积分布也非常重要，其决定吸附质能否进入吸附剂内部以及影响吸附速率。在吸附大分子污染物时，要综合考虑多孔吸附剂的比表面积和孔大小分布的关系，保证污染物能在材料内部扩散。测定吸附剂比表面积和孔分布的仪器主要由美国麦克 (Micromeritics) 和康塔 (Quantachrome) 公司生产。

5. 晶型

吸附剂是否含有晶体结构经常会影响吸附性能，常用 X 射线衍射仪 (XRD) 分析材料是否含有晶体和无定型结构。通过比较晶体标准图谱，可以判定材料含有晶体的种类。在无机吸附剂的合成和吸附剂的改性处理中经常使用。

2.1.3 吸附特性研究方法

评价吸附剂需要进行吸附和脱附特性研究。吸附剂在水溶液中的吸附特性研究包括吸附动力学、吸附等温线、溶液 pH 影响、竞争离子和离子强度的影响、温度影响等。