

Application of
General Adsorption Materials
in Water Treatment

常用吸附材料 在水处理中的应用

刘桂芳 主编 高远 梁涛 副主编



化学工业出版社

常用吸附材料 在水处理中的应用

刘桂芳 主编

高 远 梁 涛 副主编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书主要分两篇介绍了吸附现象及水处理常用吸附材料、吸附原理等内容,从学术研究和实际应用角度,对水处理过程中的常用吸附材料和新型吸附材料展开论述,主要包括材料的性质、制备、应用、再生等方面知识,并就这些材料常用的性质表征方法和分析原理方法进行归纳总结。

本书可为水处理研究工作者和环保工作者提供行之有效的材料选择、分析研究、生产应用等方面的知识。

图书在版编目(CIP)数据

常用吸附材料在水处理中的应用/刘桂芳主编. —北京: 化学工业出版社, 2016.1
ISBN 978-7-122-25625-6

I. ①常… II. ①刘… III. ①水处理-吸附法-研究
IV. ①TU991.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 264802 号

责任编辑: 邹 宁
责任校对: 吴 静

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司
装 订: 三河市宇新装订厂
710mm×1000mm 1/16 印张12¼ 字数279千字 2016年2月北京第1版第1次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 59.00 元

版权所有 违者必究



前言

国民经济与工业的迅猛发展,给环境带来了日益严重的污染,特别是水体污染,因此,对水体污染进行有效治理已经成为水资源可持续利用和国民经济可持续发展的重要战略目标。为适应不同水体污染情况,大量水处理技术被广泛使用,常用的处理方法包括混凝、沉淀、过滤、吸附、膜分离、离子交换、氧化还原等物化技术和一些生物技术。在这些处理技术中,吸附技术历史悠久,以其操作简单、高效、成本低廉、易于控制与管理等特点,已在水处理领域得到了大规模的应用,包括给水处理、污水处理、工业废水处理等。

水处理中常用的是固体吸附材料,主要基于物理吸附与化学吸附作用原理,使得水中污染物与材料表面发生作用,进而实现污染物有效分离及水质净化的目的。因此,吸附材料的选择是吸附技术在水处理应用中的重中之重,直接决定了水污染治理效果、技术运行成本和材料再生应用技术等,而对这些环节的准确把握势必要了解与掌握相关吸附作用原理以及材料的物化性质的表征分析。同时,了解与掌握以上知识才能促进吸附技术在水处理领域得到更为广泛的应用。

本书重点介绍水处理领域常用的吸附材料及其相关性能、特点和分类,并辅以相关吸附理论知识和吸附材料表征方法等内容。进一步结合近年来大量相关研究和应用成果,系统分析了水处理常用吸附材料的吸附对象、吸附效果及其发展应用前景,使其更具参考价值。

本书共分为上下两篇:上篇为吸附现象及理论,简要介绍了水处理领域相关的吸附原理及理论;下篇为水处理领域常用的吸附材料,系统介绍了活性炭、石墨烯、碳纳米管、活性碳纤维、沸石分子筛、活性氧化铝、有序介孔硅材料 MCM-41 等材料,以及这些材料的物化性质、制备方法、改性方法、吸附机理、应用情况等内容。

本书可为与水处理相关的工厂企业、设计单位、科研院所等提供参考,也可作为给水排水工程、环境工程的高等院校师生的学习参考资料和教材。

本书由刘桂芳主编,高远、梁涛副主编,闫红梅、李峰参加了编写工作。本书

由李旭春主审。其中，上篇由梁涛编写，下篇由刘桂芳、高远、闫红梅、李峰编写。整个书稿由高远进行了整理。

本书在编著过程中参考了大量的文献资料，在此向这些文献作者表示衷心感谢。限于作者水平有限，书中定有疏漏和不当之处，敬请读者不吝指教。

编者

目录

上篇 吸附现象及理论

第 1 章 吸附现象 2

- 1.1 吸附的定义 2
- 1.2 吸附的利用 3
- 1.3 吸附研究的发展 4

第 2 章 吸附理论 8

- 2.1 吸附作用力 8
 - 2.1.1 范德华力 8
 - 2.1.2 疏水作用力 10
 - 2.1.3 静电作用力 11
 - 2.1.4 氢键作用 13
 - 2.1.5 电子供体-受体作用 14
 - 2.1.6 π - π 作用 15
- 2.2 吸附平衡 16
 - 2.2.1 液相单组分吸附 16
 - 2.2.2 液相双组分吸附 17

2.3 吸附等温线及其测定方法 17

- 2.3.1 单组分溶质吸附等温线的类型及测定方法 17
- 2.3.2 多组分溶质吸附等温线的类型及推算方法 20
- 2.3.3 吸附式及其吸附理论 23

2.4 吸附热力学 36

- 2.4.1 Gibbs 吸附式 36
- 2.4.2 固体界面吸附过程标准热力学函数的计算 38
- 2.4.3 溶质分子结构与吸附标准自由能变化的关系 40

2.5 吸附动力学 42

- 2.5.1 吸附传质过程 42
- 2.5.2 颗粒内扩散方程 43
- 2.5.3 一级反应动力学模型 44
- 2.5.4 二级反应动力学模型 45

下篇 常用的吸附材料

第 3 章 活性炭 49

3.1 活性炭的种类 49

3.2 活性炭的性质 50

- 3.2.1 活性炭的物理性质 50
- 3.2.2 活性炭的化学性质 52

3.2.3	活性炭表面吸附机理	53
3.3	活性炭的制备	55
3.3.1	制备活性炭的原料	55
3.3.2	活性炭的制备	56
3.4	活性炭的改性	58
3.4.1	活性炭表面结构改性	58
3.4.2	活性炭表面化学性质 改性	58
3.5	活性炭的再生	61
3.5.1	传统再生方法	61
3.5.2	新兴的活性炭再生 技术	63
3.6	活性炭在水处理领域的 应用	64
3.6.1	活性炭在饮用水处理中 的应用	65
3.6.2	活性炭在污水处理中的 应用	66
3.6.3	活性炭在饮用水终端净水中 的应用	66

第4章 石墨烯 71

4.1	石墨烯和氧化石墨烯的结构与 性能	71
4.1.1	石墨烯的结构与性能	71
4.1.2	氧化石墨烯的结构与 性能	73
4.2	石墨烯的制备	74
4.2.1	剥离法	75
4.2.2	催化生长法	76
4.2.3	合成法	78
4.2.4	其他方法	79
4.3	石墨烯的功能化和自组装	79

4.3.1	功能化	79
4.3.2	自组装	80
4.4	石墨烯的应用	82
4.4.1	普通石墨烯	82
4.4.2	氧化石墨烯	83
4.4.3	功能化石墨烯	83
4.4.4	石墨烯复合材料	84

第5章 碳纳米管 88

5.1	碳纳米管的结构	88
5.1.1	单壁碳纳米管的结构	89
5.1.2	多壁碳纳米管的结构与 性能	91
5.2	碳纳米管的吸附性能	92
5.2.1	孔结构	92
5.2.2	表面特性	93
5.3	碳纳米管的制备方法	93
5.4	碳纳米管的纯化方法	95
5.4.1	物理法	95
5.4.2	化学法	96
5.4.3	综合法	97
5.5	碳纳米管的修饰	98
5.5.1	共价键修饰改性	98
5.5.2	非共价键修饰改性	99
5.6	碳纳米管对有机物的吸附	101
5.6.1	对有机物的吸附效果	101
5.6.2	吸附机理	102
5.6.3	吸附过程的影响	102
5.7	碳纳米管对重金属的吸附	105
5.7.1	对有机物的吸附效果	105
5.7.2	吸附机理	106
5.7.3	吸附性能的影响因素	106

第6章 活性炭纤维 110

6.1 碳纤维简介	111
6.2 活性炭纤维的分类	112
6.3 活性炭纤维的结构及性能 ...	113
6.3.1 孔结构	113
6.3.2 化学组成	114
6.3.3 吸附机理	115
6.3.4 吸附性能	116
6.4 活性炭纤维的制备	117
6.4.1 预处理	118
6.4.2 炭化	120
6.4.3 活化	120
6.5 几种常见活性炭纤维的 制备	122
6.6 活性炭纤维的改性	124
6.7 活性炭纤维在水处理领域的 应用	125
6.7.1 饮用水的处理	125
6.7.2 工业循环水的处理	126
6.7.3 废水的处理	126

第7章 沸石和分子筛 131

7.1 沸石分子筛的化学组成	131
7.2 沸石分子筛的分类与命名 ...	131
7.3 沸石分子筛的结构	132
7.3.1 分子筛的表征	132
7.3.2 分子筛的基本结构	132
7.3.3 分子筛的环与笼	133
7.3.4 天然沸石的结构	134
7.3.5 人造沸石-分子筛的 结构	136

7.4 沸石分子筛的性能	140
7.4.1 吸附性能	140
7.4.2 离子交换性能	142
7.4.3 催化性能	144
7.5 沸石分子筛的制备	145
7.5.1 水热合成及成型技术 ...	145
7.5.2 典型沸石的制备	148
7.6 沸石分子筛的改性	150
7.6.1 活化处理	151
7.6.2 表面改性	151
7.6.3 结构改性	152
7.7 沸石分子筛的再生	153
7.8 沸石分子筛在水处理领域的 应用	154
7.8.1 对含酚废水的处理	154
7.8.2 对含氟废水的处理	154
7.8.3 对重金属废水的处理 ...	155
7.8.4 对氨氮废水的处理	156

第8章 活性氧化铝 159

8.1 活性氧化铝的分类	159
8.2 活性氧化铝的性质	160
8.2.1 活性氧化铝的孔结构 ...	160
8.2.2 活性氧化铝的表面带电 性质	162
8.2.3 活性氧化铝的吸附 性质	164
8.3 活性氧化铝的制备	165
8.3.1 氢氧化铝简介	165
8.3.2 氢氧化铝的制备	166
8.3.3 氧化铝的制备	166
8.4 活性氧化铝的改性	168
8.4.1 稀土金属改性	168

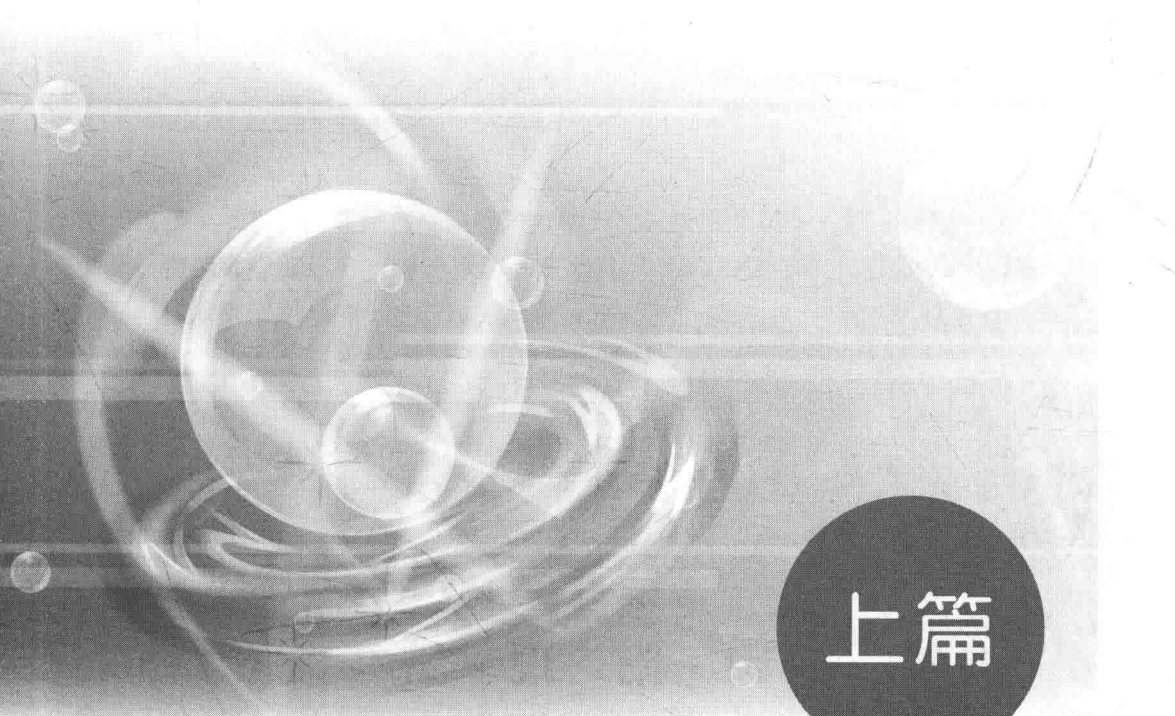
8.4.2	碱土金属改性	168
8.4.3	其他金属氧化物改性 ...	169
8.4.4	其他非金属元素改性 ...	169
8.5	活性氧化铝的再生	169
8.5.1	热处理	169
8.5.2	酸处理	171
8.6	活性氧化铝在水处理中的 应用	172
8.6.1	氟的去除	172
8.6.2	砷的去除	173
8.6.3	磷的去除	174

第9章 有序介孔材料 MCM-41

176

9.1	MCM 的简介	177
-----	---------------	-----

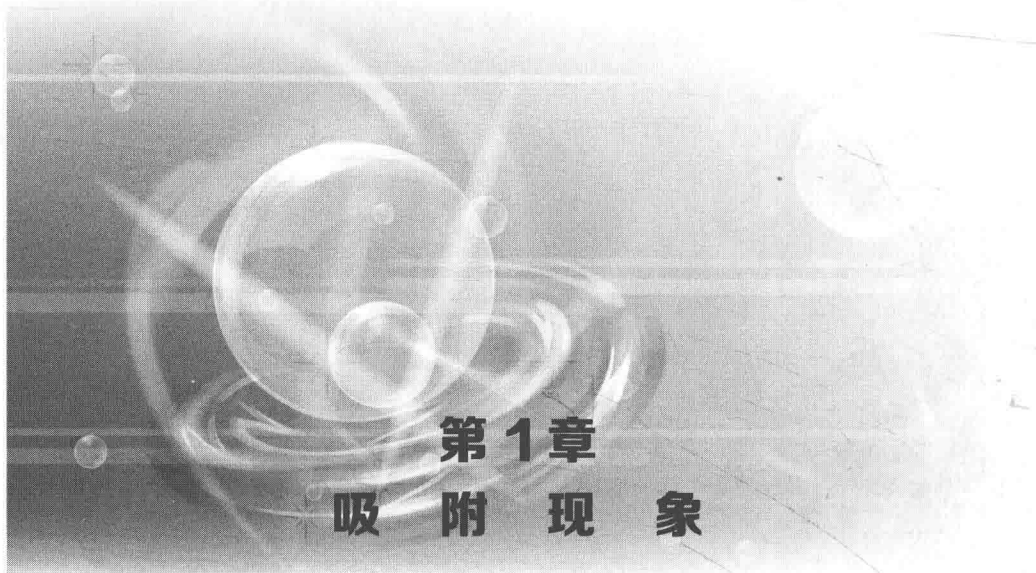
9.1.1	介孔材料的介绍	177
9.1.2	MCM-41 的结构及 特性	180
9.2	MCM-41 的制备	181
9.2.1	MCM-41 的合成机理 ...	181
9.2.2	MCM-41 的修饰	185
9.3	MCM-41 的吸附机理	187
9.3.1	分配作用	187
9.3.2	配位作用	187
9.3.3	氢键作用	188
9.4	MCM-41 在水处理中的 应用	188
9.4.1	去除有机物	189
9.4.2	去除无机阴离子	191
9.4.3	去除重金属	192



上篇

吸附现象及理论





第1章 吸 附 现 象

1.1 吸附的定义

吸附 (adsorption) 是指在固相-气相、固相-液相、固相-固相、液相-气相、液相-液相等体系中, 某个相的物质密度或溶于该相中的溶质浓度在界面上发生改变 (与本体相不同) 的现象。当一个组分或多个组分在界面层中富集 (即界面层中的浓度大于在体相中的浓度) 时称为正吸附; 反之, 称为负吸附。大多数有实际应用价值的吸附作用是正吸附, 因此也可将吸附定义为不相混溶的两相接触时, 在界面相中某组分的浓度大于其在体相中的浓度的富集现象。

被吸附的物质称为吸附质 (adsorbate), 具有吸附作用的物质称为吸附剂 (adsorbent)。吸附质一般是比较吸附剂小很多的粒子, 例如分子和离子, 但也有和吸附剂差不多大小的物质, 如高分子。国际纯粹和应用化学联合会 (IUPAC) 建议把处在本体中的吸附质 (即没有被吸附的吸附质) 称为 “adsorptive”。

原子或分子从一个相大体均匀地进入另一个相的内部 (扩散), 称为吸收 (adsorption)。吸附与吸收是不同的, 吸附是表 (界) 面现象, 吸收是组分从一相迁移至另一相, 引起体相成分与性质变化的体相行为。如: 当气体或蒸气与干净的固体接触时, 一部分气体被固体捕获, 若气体体积恒定, 则压力下降; 若压力恒定, 则气体体积减小。从气相中消失的气体分子或进入固体内部, 或附着于固体表面, 前者称为吸收 (absorption), 后者称为吸附。而当吸附与吸收同时进行, 称为吸着

(sorption)。

根据被吸附物与吸附剂之间吸附力的不同,吸附又可分为物理吸附和化学吸附两类。物理吸附也称为范德华吸附,它是由分子间的弥散作用及静电作用等引起的;而化学吸附则是由化学键作用力引起的。

对于物理吸附,吸附剂和吸附质之间通过分子间力(也称“范德华”力)相互吸引,形成吸附现象。物理吸附中吸附质分子和吸附剂表面分子之间的吸引机理与气体液化和蒸汽冷凝时的机理类似,吸附质在吸附剂表面形成单层或多层分子,吸附热比较低,接近其液体的汽化热或其气体的冷凝热,一般在 $41.868 \sim 62.802 \text{ kJ}$ 。通常,物理吸附具有吸附热小、速度快、无选择性、过程可逆放热以及吸附为单层/多层的特点,吸附过程受吸附质分子尺寸与吸附剂的孔结构控制(分子筛作用)。

化学吸附是指被吸附的分子和吸附剂表面的原子发生化学作用,在吸附质和吸附剂之间发生了电子转移、原子重排或化学键的破坏与生成等现象。因而,化学吸附的吸附热接近于化学反应的反应热,比物理吸附大得多,一般都在几十千焦每摩尔以上。因为在吸附过程需形成化学键,所以吸附剂对吸附质的选择性比较强。化学吸附容量的大小,随被吸附分子和吸附剂表面原子间形成吸附化学键力大小的不同而有差异。化学吸附需要一定的活化能,在相同的条件下,化学吸附(或解吸)速度都比物理吸附慢。事实上,物理吸附和化学吸附通常都不是孤立的,往往伴随发生,难以区分。通常焓变在 $40 \sim 120 \text{ kJ/mol}$ 之间时产生的是化学吸附,物理吸附焓变将小于这个范围。

1.2 吸附的利用

自然界充满了吸附现象。例如,地球自形成以来,虽然有大量的无机物胶体和有机物胶体从河川流进海洋,但由于这些胶体粒子在吸附离子后发生凝聚和沉淀,海洋才没有变成一个巨大的沼泽,而始终保持蔚蓝色。另一方面,随着人类活动的不断扩大和增强,这些堆积在河口和湖泊中的沉淀变成胶状污泥,散发出恶臭,成为一个严重的环境问题。

人类从石器时代就开始利用吸附现象,吸附技术的历史非常悠久。人们发现吸附现象和使用吸附剂的历史可以追溯到很早。在我国长沙马王堆一号汉墓中就发现使用了木炭作为吸湿剂和防腐剂的痕迹。这表明早在两千多年前我国人民已经知道应用吸附作用和使用吸附剂了。用木炭来净化水的历史也同样古老。据说在古埃及王国,使用最古老的吸附剂对棉、丝等动植物纤维进行染色、鞣革,用木炭、骨炭对酒、水和砂糖等饮料和食品进行脱色。吸附与人们的生活也有着不解之缘,人们

起床之后总不忘洗脸，用湿毛巾吸附脸上的尘埃、污物，使脸变清洁。

近几十年吸附分离技术迅速发展，已经应用到人类活动的许多领域。从轻工业到化学工业、钢铁工业；从食品工业到汽车、电子工业；从潜艇到宇宙飞船和某些新兴技术中无不展现出吸附分离的重要作用。

随着生产技术和科学实验的不断发展，吸附作用也得到了更广泛的应用。吸附已渗透到人们生活的各个角落，为现代社会的繁荣做出了许多贡献。下面列举几个例子。

(1) 活性炭是一种应用广泛的吸附剂，它是“憎水性的”。最早应用的例子是，1794年英国蔗糖工业中第一次利用木炭脱除食糖精浆颜色。活性炭吸附剂的蓬勃发展主要是在第一次世界大战时，用于除去空气中的化学物质。目前，活性炭纤维和离子交换纤维可制成纸、过滤芯等形式，用于汽车车厢、客厅等场所以及各种清洁室、精密仪器室的空气净化，去除异味、有害气体以及杂质微粒等，还可以除湿和防霉。活性炭纤维可制成防毒衣、面罩和口罩等器材。这对于防护人们免受有害气体的毒害。活性炭作为吸附剂在国防上也有重要意义。

(2) 人们利用吸附回收少量的稀有金属，对混合物进行分离、提纯，回收溶剂，处理污水，净化空气，以吸附色谱、制备色谱代替某些低温分馏等。在以后的研究中，人们得知如果没有气体与固体的热交换过程，地球上的生命将难以生存。

(3) 对吸附剂进行表面改性，控制吸附性能，做成吸附柱用于吸附分离DNA、微量气体和液体成分。各种气相、液相色谱被广泛应用于定性分析，是当今分析科学员普通的方法，也是重要的工业分离和精制技术。

(4) 现代吸附技术比较发达，例如分离空气中的氧气和氮气不是采用液化空气分别蒸馏，而是用人造沸石和活性炭作分子筛吸附剂，通过常温变压吸附法(Pressure Swing Adsorption, PSA)进行分离，这种方法装置简单，纯度达到99%以上。

如上所述，吸附是一种与生活密切相关的重要现象。为了开发新材料及其新用途，需要利用吸附量、热力学、光谱学和显微镜等各种测试技术认识固体表面与吸附的相互作用，加深对固体表面与吸附现象的综合理解，这也是提高产品附加值的关键。在催化领域中关于吸附的研究和应用，对工农业生产和国民经济具有特殊的意义。没有对吸附的深入研究，很难设想会有石油化工今日如此蓬勃的发展。可见吸附现象对我们日常生活、工农业生产和科学技术都有着重要的意义。

1.3 吸附研究的发展

吸附作用在生活与生产活动中应用的历史起源已不可考。例如，在远古时期

人们可能已知道草木灰、木炭可除去空气中的异味和湿气,这种应用延续至今。公元前5世纪(相当于我国春秋时代)希腊名医 Hippocrates 就知道用炭可除去腐败伤口的污秽气味。这些都是气体在固体表面被吸附的早期应用。我国考古工作者发现,在马王堆汉墓出土的帛画上有36种颜色,这实际上是织物对染料吸附的应用。

1773年 C. W. Sheele 对木炭吸附气体的现象进行了科学的观察。1777年 A. F. Fontana 报道了木炭脱除气体后能吸附一定量的其他气体。1785年俄国科学家 T. Lowitz 发现炭可脱除溶液中的有色物质。在其他一些人的工作中记载有用木炭净水、除湿等。

1814年瑞士学者 T. de Saussure 第一个系统地研究了多种气体在几种吸附剂上的吸着。他认为不同木炭吸着不同气体的体积不同,这意味着吸收气体的多少决定于固体的表面积。并且他首先指出吸着气体的过程伴随有热量的释出,即这一过程是放热过程。在此之后(1843年),Mitscherlich 注意到在吸着气体时木炭中孔的作用,并估计出木炭孔的平均直径。

1881年 Kayser 提出了吸附这一术语,指出吸附是气体在空白表面上的凝聚,它与吸收完全不同。

1909年 McBain 提出吸着这一术语,它包括吸附、毛细凝结和吸收。欧美在20世纪20年代、日本在20世纪30年代,吸附已开始成为一个独立的科学体系,出版了许多有关吸附的著作。1890年前后开始工业化生产活性炭。进入到20世纪,气体吸附研究越来越进步。在第一次世界大战的时候,活性炭被用于防毒面具。

在20世纪初,日本东京和京都两地的科学家开始积极研究胶体界面。40年代发现了人造沸石的制造方法。在第二次世界大战期间,吸附研究被迫停止。在20世纪50年代,随着世界经济的复兴,科学和技术都取得了飞跃发展,界面科学也开始成为一个完整的学科。

吸附方法应用于工业部门起始于18世纪末至19世纪初叶,最早应用于食品工业中净化糖汁、酿酒工业中除去酒精中的杂醇油,所应用的吸附剂多为木炭及骨炭。直至20世纪初,出现了用气体活化和化学活化法制备活性炭的专利,并建立了活性炭工厂。由此,吸附方法才用于气体分离和净化的工业操作。

所有吸附过程的基本原理是吸附剂从气体或溶液的多种组分的混合物中选择性地吸附一种或一些组分。选择吸附现象是色谱法的理论依据。色谱法最早是由俄国 M. Tswett 于1906年在进行叶绿素的化学研究时发现和命名的。色谱法现已成为一种对混合物进行分离和分析的基本物理化学方法,并在近百年来得到极大的发展。现在色谱法已成为独立的研究领域,而不再在吸附作用的一般性介绍中涉及了。

吸附作用在初级工业中的应用促进了基础研究的发展。以炭为主要吸附剂的各种实验现象和经验规律要求从理论上予以说明。吸附热力学、吸附动力学及多种吸附模型的理论成果在 19 世纪末至 20 世纪初相继发表。

美国物理学家和化学家 J. W. Gibbs 在 1873~1878 年期间对经典热力学规律进行了总结,并全面解决了热力学体系平衡问题,提出了 Gibbs 吸附公式。这一成果是吸附理论的基础,适用于解决一切界面吸附问题,特别是对处理气-液和液-液界面的吸附研究更为方便。

1911 年德国胶体化学家 R. A. Zsigmondy 为了解释孔性团体吸附等温线滞后现象,根据凹液面上的平衡蒸气压小于同温度下平液面上的饱和蒸气压提出了毛细凝结理论,该理论是微孔吸附剂吸附的理论依据。

1914 年匈牙利外科医生 M. Polanyi 提出了一种没有过多理论假设的吸附理论——吸附势理论 (adsorption Potential theory),该理论认为在固体表面有势能场,吸附质分子落入此势能场中即被吸附。这一理论较早地给出了吸附等温线的预示,但未能给出明确的吸附等温式。

1916 年美国物理化学家 I. Langmuir 提出了单层吸附理论,这一理论有明确的假设条件,得出了简明的吸附等温式,即 Langmuir 方程。单分子层吸附理论是后续发展的 BET 多层吸附理论的基础。在此之前,经验的 Freundlich 吸附等温式问世。

虽然固体自溶液中的吸附很早就有实际应用,并且有大量的吸附研究结果发表,但是由于溶液成分复杂,所以液相吸附的理论大多套用气体吸附的成果。

吸附理论和吸附技术的研究总是以吸附剂为基础,而各种类型吸附剂的研制受到工业发展和生产水平的制约。在 20 世纪以前以炭为主要的吸附剂,20 世纪前半叶主要以活性炭和硅胶为吸附剂。天然吸附剂(如天然沸石、某些黏土矿物质)因其低成本,在石油精制,食用油、酒和水的净化等工业部门也有广泛应用。

我国学者几十年来在吸附领域做过多方面的工作。早在 20 世纪 20 年代傅鹰就开始进行吸附研究。他的气液和固液界面吸附成果在当时处于世界先进水平。他发现了液相吸附也可以有多层吸附,在研究硅胶自非极性溶剂中吸附同系列有机物时,得到了与 Traube 规则相反的结果,即随有机物链长增加而吸附量减小;最早设计了利用润湿热测定固体粉末比表面积的方法;发展了测定孔性固体比表面的热力学方法;进行了较系统的液相吸附热力学研究,提出了利用吸附等温线起始段斜率计算吸附标准自由能变化的方法等。这些工作至今仍被一些著名的胶体与表面化学专著所引用。

在吸附作用的基础研究方面,我国学者在以下领域取得了重要成果,有些受到

国际同行的重视：表面活性剂在气液界面的吸附规律；表面活性剂在固液界面吸附的通用等温式；BET 混合气体吸附公式的导出；液相吸附的直线型等温式；活性炭对染料的吸附；液相吸附的计量置换模型；稀溶液吸附的热力学研究；后处理条件对吸附剂表面宏观性质的影响及固体的表面改性；分子筛的设计与合成；亚稳平衡态吸附理论及其应用；有序分子膜的研究等。



第2章 吸 附 理 论

2.1 吸附作用力

2.1.1 范德华力

2.1.1.1 London 色散力

任何一个分子，由于电子的不断运动和原子核的不断振动，常发生电子云和原子核之间的瞬时相对位移，从而产生瞬时偶极。分子靠瞬间偶极而相互吸引，这种力称为色散力，又称为伦敦力。

分子之间的色散力存在于任何分子之间，而且除了高度极性的分子，例如水之外，也是贡献最大的，因此有时可用色散力代表范德华引力。范德华引力只有在分子相距为 10^{-10} m 的数量级情况下才显著。

引起吸附的力中总包含有色散力。色散力是一种同时伴有近程排斥力的吸引力。此外，若固体或气体具有极性，还会有静电力（库仑力）。色散力这一名称的提出是由于其来源与光色散的起因有密切联系。London 首次描述了色散力的特征，认为它是由每一个原子内电子密度的迅速升降产生的，这样的原子诱导邻近原子产生电矩，从而导致两原子间的相互吸引。London 应用量子力学微扰理论推导出相距 r 的两孤立原子的势能表达式 $\epsilon_D(r)$ 。经后人的发展，此表达式写作