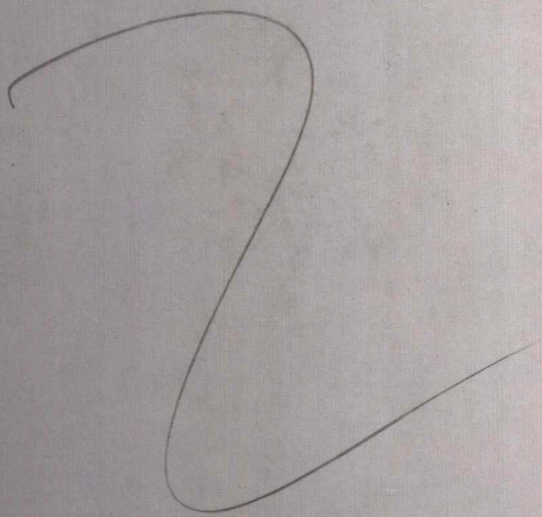




华夏英才基金学术文库

胡筱敏 编著

混凝理论与应用




科学出版社

www.sciencep.com

TU991.22/1

2007

 华夏英才基金学术文库

混凝理论与应用

胡筱敏 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是作者在多年从事教学、科研工作的基础上撰写而成的。主要内容包括固液分散体系及其基本性质,凝聚与絮凝的基本理论,凝聚剂与絮凝剂以及生物絮凝剂的介绍、研制及其作用机理,混凝效果影响因素及改善措施,混凝实验、工艺与设备,混凝技术在给水工程、城市污水处理工程、污水深度处理工程及几种典型工业废水处理工程中的应用等。

本书可供环境工程、矿物工程、化学工程等专业的本科生、研究生及从事水处理及固液分离研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

混凝理论与应用/胡筱敏编著. —北京:科学出版社,2007

(华夏英才基金学术文库)

ISBN 978-7-03-018626-3

I. 混… I. 胡… II. ①凝聚②絮凝 IV. 0648

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第022957号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:耿 耘

责任印制:吕春珉 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2007年3月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—2 500 字数:310 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<新欣>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

前 言

作者所学专业为矿物加工工程(选矿),1993年博士研究生毕业后一直从事环境工程(主要是水处理)的教学和科研工作。从1987年研究矿物的选择性分离开始,到1996年着手研究生物絮凝剂及有关生物絮凝剂在水处理中的应用,十多年来本人始终以“混凝理论与应用”作为主要的研究方向,并为本科生和硕士研究生开设这方面的课程。现在将本人在该领域所进行的研究工作经验及对混凝理论的认识、理解及总结奉献给广大读者,期望对混凝技术在各行业的实际生产中的合理应用及新型混凝剂的研制开发(例如生物絮凝剂等)有一定的启迪作用,并对混凝技术及有关的理论发展有一定的推动作用。

本书主要介绍以下内容:

1) 凝聚与絮凝的基本理论。其主要内容涉及:悬浮液的电学性质,例如颗粒表面荷电起因、界面双层结构和电动电位、电动现象和 ζ 电位的测定等;范德华引力作用、静电斥力作用、溶剂化力作用、疏水化力作用、空间位阻效应及高分子桥连作用等有关颗粒间的相互作用;DLVO理论、异相凝聚理论及凝聚动力学等凝聚基本理论以及絮凝剂在颗粒表面吸附、絮凝过程及其机理等。

2) 凝聚剂与絮凝剂。其主要讨论无机盐类,无机大分子及典型凝聚剂的制备、作用及其作用机理;絮凝剂分类,各类絮凝剂的优缺点及适应场合,絮凝剂的合成和天然絮凝剂的改性;生物絮凝剂的特点,生物絮凝剂的产生菌及其筛选与培养,生物絮凝剂的产生、提纯、培养条件与生物絮凝剂合成的关系,影响生物絮凝剂作用效果的因素及其作用机理,生物絮凝剂的应用与发展趋势等。

3) 混凝效果影响因素及改善措施。其核心内容有悬浮液性质与混凝效果的关系,pH对混凝效果的影响,水温对混凝效果的影响,水力条件对混凝效果的影响,絮凝剂性质与混凝效果的关系;调整pH,投加氧化剂,改变混凝剂的投加方式,混合用药,用接触絮凝等方法改善混凝效

果,有关电絮凝的原理及其使用场合与优缺点等。

4) 混凝器和絮凝构筑物。主要介绍:如何进行混凝试验以及量筒、烧杯、小径管、Couette 装置等实验室用混凝器;机械搅拌絮凝池、水力搅拌絮凝池、接触絮凝池(悬浮澄清池、微絮凝过滤池)等实际应用的混凝设备和设施的特点。

5) 混凝技术在给水工程、城市污水处理工程、污泥处理、污水深度处理及典型工业废水处理中的应用。

在此,作者对华夏英才基金管理委员会表示衷心的感谢。

由于时间仓促及作者水平所限,书中不足之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

目 录

前言

第一章 固液分散体系及其基本性质	1
1.1 固液分散体系	1
1.2 固液分散体系的基本性质	2
1.2.1 液相的基本性质	2
1.2.2 固相的基本性质	5
1.2.3 固液分散体系的基本性质	17
第二章 凝聚与絮凝的基本理论	25
2.1 颗粒间的相互作用	25
2.1.1 颗粒间的范德华引力	25
2.1.2 颗粒间的双电层静电斥力	28
2.1.3 颗粒间的溶剂化力	31
2.1.4 颗粒间的疏水化力	31
2.1.5 空间位阻作用	32
2.1.6 高分子桥联作用	33
2.2 凝聚理论	33
2.2.1 DLVO 理论	33
2.2.2 异相凝聚理论	39
2.2.3 DLVO 理论的扩展	40
2.2.4 凝聚动力学	41
2.3 絮凝理论	45
2.3.1 絮凝剂在颗粒表面上的吸附机理	45
2.3.2 絮凝过程及机理	47
2.3.3 高分子空间稳定作用	48
2.3.4 粗分散体系的稳定性	50
第三章 凝聚剂与絮凝剂	52
3.1 无机电解质凝聚剂	52
3.1.1 概述	52
3.1.2 铝盐	53

3.1.3	铁盐	60
3.2	无机聚合电解质凝聚剂	63
3.2.1	铝系聚合电解质	63
3.2.2	铁系聚合电解质	67
3.2.3	复合聚合电解质	70
3.3	有机高分子絮凝剂	73
3.3.1	合成有机高分子絮凝剂	73
3.3.2	天然有机高分子絮凝剂	92
3.4	生物絮凝剂	102
3.4.1	生物絮凝剂的概况	102
3.4.2	生物絮凝剂的制备、加工	115
3.4.3	培养条件对生物絮凝剂合成的影响	124
3.4.4	影响生物絮凝剂絮凝效果的因素及其絮凝机理	132
3.4.5	生物絮凝剂的应用和发展趋势	138
第四章	混凝效果影响因素及改善措施	141
4.1	混凝效果影响因素	141
4.1.1	悬浮液性质对混凝的影响	141
4.1.2	悬浮液 pH 的影响	142
4.1.3	共存盐类及杂质的影响	144
4.1.4	悬浮液温度的影响	144
4.1.5	水力条件的影响	145
4.1.6	混凝剂的性质	146
4.1.7	混凝剂使用方法	151
4.2	混凝效果的改善	153
4.2.1	调整 pH	153
4.2.2	投加氧化剂	154
4.2.3	混合用药	155
4.2.4	混凝剂投加方式	162
4.2.5	接触絮凝方法	163
4.2.6	活性泥渣重复使用	164
4.3	电絮凝	164
4.3.1	电絮凝技术的基本原理	164
4.3.2	电絮凝方法的优缺点	165
4.3.3	电絮凝装置	166
4.3.4	电絮凝装置运行的主要控制参数	167

第五章 混凝实验、工艺与设备	168
5.1 混凝实验	168
5.1.1 实验室用混凝器	168
5.1.2 混凝动力学实验	169
5.1.3 混凝沉降实验	171
5.1.4 混凝过滤实验	175
5.2 混凝工艺与设备	181
5.2.1 混凝剂的配置和投加	181
5.2.2 混合设施	185
5.2.3 絮凝设施	187
第六章 混凝技术在水处理工程中的应用	194
6.1 混凝技术在给水工程中的应用	194
6.1.1 给水处理方法概述	194
6.1.2 混凝技术在给水处理工艺中的地位	197
6.2 混凝技术在城市污水处理工程中的应用	199
6.2.1 城市污水处理方法概述	199
6.2.2 在初级沉淀中的应用	202
6.2.3 在二次沉淀池中的应用	202
6.2.4 在滤池中的应用	203
6.2.5 在污泥处理中的应用	203
6.2.6 在污水深度处理(或三级处理)中的应用	206
6.3 混凝技术在工业废水处理工程中的应用	208
6.3.1 在钢铁工业废水处理工程中的应用	208
6.3.2 在煤炭工业废水处理工程中的应用	214
6.3.3 在石油化工废水处理工程中的应用	219
6.3.4 在制浆造纸废水处理工程中的应用	222
6.3.5 在印染废水处理工程中的应用	226
6.3.6 在食品工业废水处理工程中的应用	234
参考文献	241

第一章 固液分散体系及其基本性质

1.1 固液分散体系

所谓分散体系,是指两种或两种以上物质混合在一起组成的体系,其中被分散的物质称为分散相,将分散相分散的物质(亦即在分散相周围连续的物质)称分散介质。

无论是日常生活还是工业生产,我们所接触到的构成固液分散体系的液相,绝大多数都是水。因此本章所讨论的固液分散体系,都是以水为液相的分散体系。

水,在绝大多数的情况下,并非是纯净的,尤其是参与了日常生活和工农业生产等过程后,总难免要与其他物质混合在一起。也就是说,我们面临的所要处理的水都是以混合体系存在的。水中的杂质按其性质可分为无机物、有机物两类;按其尺寸大小及其与水混合的关系可分为悬浮物、胶体物和溶解物三类,相应的其与水组成的混合体系称为悬浮液、胶体和真溶液。

(1) 悬浮液

固体颗粒直径大于 10^{-4} mm 的水固分散体系,因为分散相颗粒较粗,故又称其为粗分散系。它包括悬浊液、乳浊液,例如浑浊的泥水、豆浆、牛奶、含微生物的混合液等。悬浮液属非均相热力学不稳定体系,浑浊、易发生沉降,肉眼即可分辨固相颗粒,固相颗粒不能透过半透膜和滤纸,扩散慢或不扩散。

(2) 胶体溶液

固体颗粒直径在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ mm 之间的水固分散体系,也可称为溶胶或溶态分散体系。对于线性高分子而言,不论其绝对尺寸,只要含有 $10^3 \sim 10^9$ 个原子的分子都将其划为胶体颗粒(胶粒)。常见的胶体溶液有墨水、氢氧化铁溶胶、聚乙醇水溶液、腐殖质含量较高的湖泊水等。胶体溶液大多数属非均相热力学不稳定体系,但有些高分子胶体溶液又是均相热力学稳定体系。一般情况下,胶体溶液在光照射下呈浑浊状,胶体粒子不能透过半透膜,但可透过滤纸,扩散慢。

(3) 真溶液

颗粒直径小于 10^{-6} mm,分散相以离子、原子或小分子完全溶解于液(水)相中,故可称为离子、分子分散体系或高分散系,例如食盐水溶液、蔗糖水溶液等。真溶液属均相热力学稳定体系,水溶液透明,分散相能透过半透膜,扩散快。

混凝处理的对象,即为胶体溶液和悬浮液。混凝处理的目的在于使胶体粒子和悬浮液中的微细颗粒聚集成较大的颗粒,有利于与液体(水)分离。真溶液中的离子

和分子也可以通过化学沉淀后,进行混凝处理。

1.2 固液分散体系的基本性质

显然,固液分散体系的性质主要取决于组成分散体系的固体与液体的性质。所以,在讨论固液分散体系的基本性质之前,有必要先讨论一下与此有关的固体和液体的性质。

1.2.1 液相的基本性质

1. 液相水的结构

水分子由 2 个氢原子和 1 个氧原子组成。根据水的现代理论,在水分子中的 3 个原子构成一个等腰三角形。2 个氢原子核位于三角形的底边,3 个核被 10 个电子所围绕。水分子的电子云分布如图 1.1 所示,是不规则的四面体形式,其中氧原子在中心,两个氢原子则位于四面体一个晶面上的两个对角处。氧原子的八个电子中有两个配置在原子核附近,另两个和氢原子相连,而两对不可分的电子偶极则在氢原子电子云相反的方向形成支链。显而易见,在水分子中正负电荷的中心是不重合的,因此水分子是极性分子,正是这种分子极性使得水具有一系列独特的性质。

现代结构化学的研究表明,在水分子的结构中两个氢—氧键的夹角为 105° (图 1.2),键长为 0.098nm 。水分子的极性较大,偶极矩为 1.85D 。

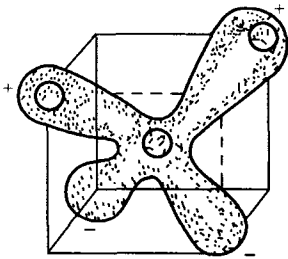


图 1.1 水分子的电子云

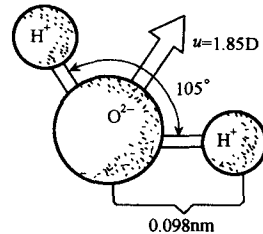


图 1.2 水分子的结构参数

从图中水分子的电子云分布可见,氢原子在给出自己唯一的电子与氧原子形成共价键后,原子核几乎“裸露”出来,这使它很容易吸引其他强负电性元素(如 O、N、F、Cl、S 等)的电子云而形成氢键。氢键的键长约为 0.176nm ,比通常的共价键长得多,比范德华键又小得多;氢键的键能则随负电性元素而异,如氢与氧形成的氢键键能为 18.83kJ/mol ,氢与氟形成的氢键键能则为 28.03kJ/mol 。

作为强偶极分子,水分子间同时还具有分子作用能。水的分子缔合能约为 $4\sim 8.5\text{kJ/mol}$,远较氢键缔合能弱。在水的分子作用能中,定向效应(永久偶极-永久

偶极)占 84.8%;诱导效应(永久偶极-诱导偶极)占 4.5%;色散效应(瞬间偶极-瞬间偶极)占 10.5%。可见,对于水分子而言,色散效应和诱导效应不占主要地位,分子作用的主要成分是定向效应。

由上面分析可见,水分子间的主要作用是氢键结合,其次是偶极分子结合。液态水分子间的缔合势能 E_w 由氢键作用能 E_{h_0} 及分子作用能 E_{v_0} 组成

$$E_w = E_{h_0} + E_{v_0}$$

式中: E_w, E_{h_0}, E_{v_0} 的单位均为 kJ/mol。

由于水分子具有四极结构(图 1.2),每个分子都有可能与邻近的四个水分子通过氢键键合形成四面体笼架结构,如图 1.3 所示。固相水-水的结构就是此种四面体笼架在三维空间的充分发展。

与负电性元素形成氢键的能力是水分子极性的重要体现之一,它一方面影响到液态水的结构,另一方面影响到水与固体物料的作用方式。根据近代化学的研究结果,水分子之间由于氢键而发生强烈的缔合作用,以至于在液态水中除了单个的水分子外,还存在所谓的“瞬时缔合体”(图 1.4),这些缔合体随着温度的升高会逐渐消失。

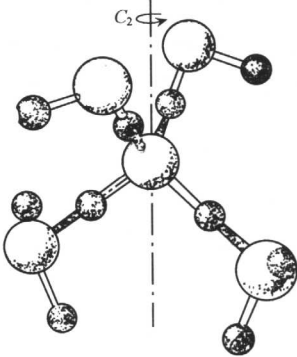


图 1.3 水分子通过氢键结合形成的四面体结构

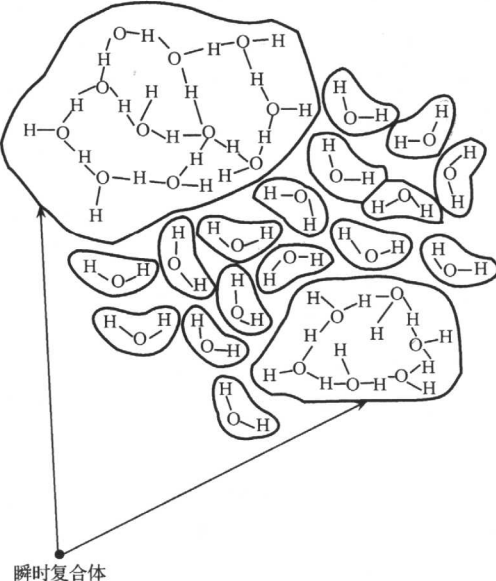


图 1.4 液态水中的瞬时缔合体

2. 水的黏性

黏性是流体反抗变形的一种性质,这种性质只有当流体在外力作用下发生变形,即流体质点间发生相对运动时才显现出来。从本质上来说,黏性反映的是流体分子间的相互作用。研究流体黏性的学科称为流变学。根据流变学的研究,流体所受的剪切力 τ (即垂直于受力方向的流体单位截面上所受的作用力,这种作用力使流体质点间发生剪切变形)与流体的变形率 γ (即单位时间内流体所发生的变形)之间存在相应的数学关系,这种关系在流变学中称为本构方程,其形式因流体而异。对水来说,本构方程的形式如下:

$$\tau = \mu\dot{\gamma} \quad (1.1)$$

该式称为牛顿定律,符合该式的流体叫做牛顿流体,水就是一种最常见的牛顿流体。式(1.1)中的线性比例系数 μ 称为动力黏度,其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。在实际工作中,有时候会用到运动黏度的概念。运动黏度 ν 定义为动力黏度 μ 与流体密度 ρ 的比值

$$\nu = \mu/\rho \quad (1.2)$$

运动黏度的单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。从动力黏度及运动黏度的单位不难看出它们名称的由来。

习惯上,人们把动力黏度简称为流体的黏度。水的黏度是温度的函数,在 20°C 时为 $0.001\text{Pa} \cdot \text{s}$;温度每增高 1°C ,水的黏度大约降低 2% 。如果我们联想到前一小节所讨论的水分子的缔合问题,则不难解释这一现象与液态水中的水分子缔合体随温度升高而逐渐消失有关。在实际的固液分离过程中,温度变化对液体黏性的影响从而导致对分离效率的影响是显而易见的。例如,浓缩机的溢流在炎热的夏季要比在寒冷的冬天清澈得多;在过滤器加入蒸汽加热技术可明显降低滤饼水分等。不过,在一般情况下,固液系统的温度在分离过程中不会发生大幅度的变化,因而介质的黏度实际上可视为常量。至于借提高固液体系的温度降低介质黏度从而提高分离效率的方法,由于经济上的原因通常并不能被广泛采用。

在厘米·克·秒(CGS)单位制中,动力黏度的单位为 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,亦叫泊(P),运动黏度的单位是 $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,其与国际单位制的换算关系为

$$1\text{P}(\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) = 0.1\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

3. 水的表面张力

表面张力,或表面自由能,是描述物质表面性质的一个重要参数,其定义为物质增加单位表面时外界所做的功。由于物质表面分子与内部分子相比,其化学键总处于不平衡状态,从而表面分子比内部分子具有更高的能量,这部分高出的能量就是表面自由能(或表面张力)。

在除了汞以外的所有液体中,水具有最高的表面张力,这显然与水分子的强极

性有关。像大多数液体一样,水的表面张力随温度的升高而下降,表 1.1 所列即为水的表面张力随温度的变化情况。

表 1.1 不同温度时水的表面张力

温度/°C	表面张力/(N/m)
20	0.07288
25	0.07214
30	0.07140

水的表面张力对固液分离过程有重要影响。例如在固体物料的孔隙内往往含有所谓的孔隙水,水在孔隙内深入的程度以及孔隙水的含量与水的表面张力直接相关(这方面的讨论详见本节关于水的赋存状态部分);再如水在固体表面的附着(湿润或形成水化层)也在很大程度上受到表面张力的影响。一般来说,液体介质的表面张力越大,固液分离越是困难。因此,降低水的表面张力就成为提高固液分离效率的有效途径之一。

从表 1.1 的数据来看,水的表面张力虽然随温度的升高而下降,但变化的速度很小,因此借提高温度而降低水的表面张力在实用上并没有多大意义;实际工作中向固液体系添加表面活性物质是降低水的表面张力的行之有效的手段,这方面的内容作者曾在相关著作中有过详细讨论。

1.2.2 固相的基本性质

1. 颗粒粒度

(1) 颗粒粒度的表示方法

颗粒粒度是物料粒子大小的度量,通常用“直径”一词来表示。测定方法不同,计算直径的公式不同,因而对同一颗粒所得的直径数值也就不同。只有对标准的球体,不同方法测出的颗粒直径才是一致的。表 1.2 列出了几种颗粒粒度的表示方法,它们各自适用于不同场合,对于滤饼过滤而言,采用表面粒度、体积粒度和比表面积粒度较为合理。

(2) 混合粒群的粒度分布

通常的固液分散体系多呈分散性,即固体颗粒的粒度不是单一的,而是符合一定的分布规律。所谓的单分散体系(即所有颗粒具有同一粒度)只是在理论研究中有所应用,实际过滤操作的过程中不会出现。因此,研究粒群的粒度分布具有更大的实际意义。

表示粒群粒度的方法大致有三种:一是特征量法,如平均粒度、-200 目含量百分数等,这种表示方法虽然方便,但不能反映粒度的实际分布;二是表格法,即用列表的方式表示不同粒级的含量,可较全面地反映粒度分布特点;三是公式法,该方法用适当的数学公式全面、准确地描述粒群的粒度分布。实际工作中表格法用得

较多,特征量法多是从表格中的数据获得平均粒度及-200目含量百分数等,公式法则从表格数据拟合出相应的数学公式以描述同类物料的粒度分布。

表 1.2 颗粒粒度的表示方法

名称	符号	定义	备注
筛分粒度	x_n	能够通过颗粒的最小方孔宽度	
表面粒度	x_s	与颗粒具有相同表面积的球体直径	$\sim 1.28x_n$
体积粒度	x_v	与颗粒具有相同体积的球体直径	$\sim 1.10x_n$
比表面积粒度	x_{sp}	与颗粒具有相同比表面积的球体直径	$\sim 0.81x_n$
投影粒度	x_p	在垂直于稳定平面方向上与颗粒具有相同投影面积的球体直径	$\sim 1.14x_n$
自由沉降粒度	x_f	在同一流体中与颗粒具有相同沉降速度的球体直径	
斯托克斯(Stokes)粒度	x_{st}	雷诺数 $Re < 0.2$ 时的自由沉降粒度	

注:表中的粒度(除投影粒度外),可称为当量球体直径;投影粒度则为当量圆直径;另有所谓的统计学直径,即用显微镜在一定方向上测得的粒度。

粒群粒度分布密度函数 $f(x)$ 满足归一化条件,即

$$\int_0^{\infty} f(x) dx = 1 \quad (1.3)$$

而累积粒度分布函数 $F(x)$ 定义为

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad (1.4)$$

常用的粒度分布函数 $F(x)$ 的解析表达式列于表 1.3。需要指出的是,所有这些函数虽然都能较满意地表征相应粒群的粒度分布,但它们仍属于经验公式,因为

表 1.3 几种常见的粒度分布函数

分布名称	分布函数的形式	参数说明
正态分布	$\frac{dF(x)}{dx} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}$	\bar{x} ——平均粒度 σ ——标准差
对数正态分布	$\frac{dF(x)}{d(\ln x)} = \frac{1}{\ln\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \frac{-(\ln x - \ln \bar{x})^2}{2\ln^2\sigma}$	
R-R 分布	$F(x) = \exp \left[- \left(\frac{x}{x_r} \right)^n \right]$	x_r ——与颗粒粒度范围有关的常数 n ——反映物料特性的常数
哈里斯(Harris)三参数分布 ^①	$F(x) = \left[1 - \left(\frac{x}{x_0} \right)^s \right]^r$	x_0 ——最大颗粒粒度 s ——与物料中细颗粒有关的常数 r ——与物料中粗颗粒有关的常数

① 哈里斯三参数分布式的原始形式为 $F(x) = 1 - [1 - (x/x_0)^s]^r$, 其中 $F(x)$ 为筛上物累积百分数,而本书定义的 $F(x)$ 却为筛下物累积百分数,故取表中所示的形式。

它们与产生颗粒的过程几乎没有任何理论上的联系。物料的粒度分布对过滤过程有很大的影响,一般来说,混合粒群中的细粒级含量越多,过滤越困难。

2. 颗粒形状

颗粒形状是颗粒几何特性的另一个主要方面,表示颗粒形状定量参数主要有三种:球形系数、体积形状系数和面积形状系数,现分别简述之。

球形系数,即颗粒接近球形粒度的参数,其定义为

$$\psi = S_{b,v}/S_{g,v} \tag{1.5}$$

式中: $S_{b,v}$ ——与颗粒具有相同体积的球体的表面积;

$S_{g,v}$ ——实际颗粒的表面积。

由于实际颗粒的真实表面积难以准确测定,故上述定义不便应用,常用下面的公式定义球形系数:

$$\psi = \frac{d_p}{d_e} \tag{1.6}$$

式中: d_p ——投影直径,即显微镜下与颗粒面积相等的圆的直径;

d_e ——颗粒投影面积的最小外接圆的直径,可以近似地用恰好能让颗粒通过的圆筛孔的直径来表示。

同一物料,粗粒级的球形系数与细粒级的不同,一般来说,物料越细,球形系数越大。

体积形状系数(a_v)和面积形状系数(a_s)的定义为

$$a_v = \frac{V}{d_p^3} \tag{1.7}$$

$$a_s = \frac{S}{d_p^2} \tag{1.8}$$

式中: V ——颗粒的平均体积;

S ——颗粒的平均表面积。

此外,也有用比表面积形状系数,即面积形状系数之比来描述颗粒形状特征的。表 1.4 为若干不同形状颗粒的各种形状系数。

表 1.4 颗粒形状的定量描述

颗粒形状	球形系数	面积形状系数	体积形状系数
球体	1	3.1416	0.5236
类球体(水磨蚀的砂粒、熔融的烟尘、雾化金属粉末等)	0.817	2.7~3.4	0.32~0.41
多角状颗粒(煤粒、石灰石粉粒、石英砂等)	0.655	2.5~3.2	0.2~0.28
片状颗粒(石墨粉、滑石粉、石膏粉等)	0.534	2.0~2.8	0.12~0.16
薄片状颗粒(云母等)	0.216	1.6~1.7	0.01~0.03

近年来,一种可描述颗粒轮廓及表面特征的新的数学方法正引起人们的注意,这就是风靡非线性科学领域的分形(或分数维)理论。分形理论是数学理论与现代计算机技术高度结合的产物,它对于描述非线性、不规则的自然现象特别有用,对颗粒形状的描述只是其应用之一。尽管迄今为止人们对什么是分形尚未给出公认的定义,但对分形的直观理解却并不困难。我们知道,在拓扑几何学中,点、直线、平面、立方体的维数分别为 0、1、2 和 3,那么对于在复杂性上介于点与直线之间的间断点、介于直线与平面之间的曲折线(如实际颗粒的投影轮廓线)或者介于平面与立体之间的凹凸不平的曲面(乳石及颗粒的表面)来说,用数值介于 0~1、1~2 或者 2~3 之间的分数维对其分别加以描述则并不使人们感到过于意外。显然,颗粒轮廓或表面的分数维越大,颗粒的形状就越复杂。国际著名应用分形学者凯伊(H. Kaye)是对颗粒形状进行分形描述的主要开拓者之一,在其专著《分形漫步》一书中,用相当篇幅论述了这一问题。图 1.5 所示为凯伊及另一学者对几种不同物料颗粒形状的分形维的测定结果。从该图不难发现,具有相同沉降粒度(斯托克斯粒度)的颗粒,在形状上差异很大,而分数维可对这些差异予以有效表述。除描述颗粒形状外,分形理论在滤饼、絮团的形成及结构方面也得到了应用,并已展示出相当乐观的前景。

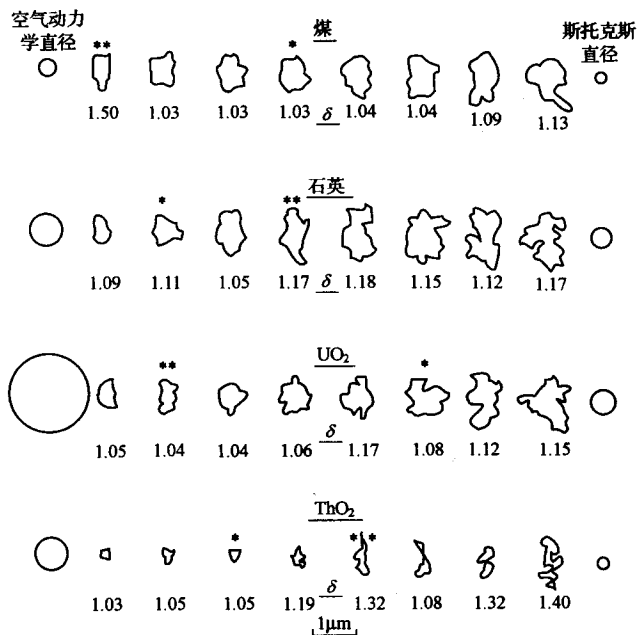


图 1.5 颗粒形状的分形描述

3. 颗粒表面性质

(1) 颗粒表面的润湿性

润湿是固、液、气三相共存的一种状态。按照热力学定义,固体与液体接触后体系(固体和液体)的自由能 G 降低即为润湿,自由能降低的多少称为润湿度(或润湿性),以 W_{SL} 表示。润湿可分为三类:沾湿、浸湿和铺展。

1) 沾湿,是指液体与固体接触,以固—液界面取代液—气界面和固—气界面的过程,如图 1.6 所示。

设接触面积为单位值,固体柱与液体柱从分离状态变为黏着状态引起的体系自由能的变化为 ΔG ,则

$$\Delta G = \gamma_{SL} - \gamma_{SG} - \gamma_{LG} \quad (1.9)$$

式中: γ_{SL} ——固—液界面自由能, J/m^2 ;

γ_{SG} ——固—气界面自由能, J/m^2 ;

γ_{LG} ——液—气界面自由能, J/m^2 。

若过程中单位面积所做的功为 W_{SL}^A ,则

$$W_{SL}^A = -\Delta G = \gamma_{SG} + \gamma_{LG} - \gamma_{SL} \quad (1.10)$$

显然, W_{SL}^A 值越大,则固—液界面结合越牢,故 W_{SL}^A 是固—液界面结合能力及两相分子间相互作用力大小的表征。在恒温、恒压条件下, $W_{SL}^A \geq 0$ 为沾湿过程发生的条件。

2) 浸湿,是指固体浸入液体中的过程,即固—液界面取代固—气界面,而液体表面无任何变化的过程,如图 1.7 所示。

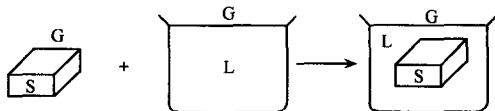


图 1.7 浸湿过程示意图

设浸湿面积为单位值,浸湿过程的自由能变化为 ΔG ,则

$$\Delta G = \gamma_{SL} - \gamma_{SG} \quad (1.11)$$

式中符号意义同前。

设浸湿过程中单位面积所做的功为 W_{SL}^I ,也称作浸湿功,则

$$W_{SL}^I = -\Delta G = \gamma_{SG} - \gamma_{SL} \quad (1.12)$$

$W_{SL}^I \geq 0$ 是恒温恒压下浸湿过程发生的条件。

3) 铺展。是指以固—液界面取代固—气界面的同时,液体表面也同时扩展的过程,如图 1.8 所示。设铺展面积为单位值,铺展过程的自由能变化为 ΔG ,则

$$\Delta G = \gamma_{SL} + \gamma_{LG} - \gamma_{SG} = -S \quad (1.13)$$