

物理化学丛书

颗粒粒度 与比表面 测量原理

童祐嵩 编著

KELILIDU
YU
BIBIAOMIAN
CELIANGYUANLI

上海科学技术文献出版社

SHANGHAI KEXUE JISHU WENXIAN CHUBANSHE

物理化学丛书

颗粒粒度与比表面测量原理

童 祐 嵩 编著

上海科学技术文献出版社

物理化学丛书

主 编 胡 英

编委会成员 (按姓氏笔划排列)

刘国杰 许海涵 吕瑞东 张挺芳
胡 英 章燕豪 童祐嵩

责任编辑 陆 琦

物 理 化 学 丛 书

颗粒粒度与比表面测量原理

童祐嵩 编著

*

上海科学技术文献出版社出版发行
(上海市武康路2号)

经 售 处 经 销

昆山亭林印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/32 印张 12 字数 290,000

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数: 1—2,000

ISBN 7-80513-298-4/Z·78

定价: 9.70 元

《科技新书目》182-244

序

颗粒的粒度与比表面的测量是颗粒学最基本的、最重要的测量。

本书是在作者为粒度、比表面测试人员举办的两次学习班以及为研究生讲授这一课程的讲义基础上，加以修改和扩充写出的。

粒度与比表面的测量涉及物理化学的、流体力学的和物理的等等原理，其方法的种类非常之多。在本书第一章中，对曾经试用的、现在广泛使用的以及正在研究发展的种种方法，从原理上作了系统分类及简单阐述，目的是使读者获得比较全面的了解。

第二章对粒度分布的数据处理、颗粒形状、各种平均径以及与比表面的关系进行介绍；第三章对颗粒分散的物理化学原理作了系统阐述。这两章是所有粒度测量的基础知识。

以后各章则专门介绍测量粒度和比表面的一些常用方法，即筛分析、显微镜法、光散射法、消光法、X光小角散射法、全息照相法、电传感法、重力沉降法、离心沉降法、气体透过法和气体吸附法。其中插入两章分别对光散射的基本规律，沉降法的原理即主要是 Stokes 阻力公式的推导和应用条件作系统阐述。

最后一章是讨论粒度与比表面常用测量方法的比较和选取，希望对测量人员以及应用粒度数据的技术人员在比较不同测量方法的结果和选用方法时有所帮助。

本书在内容的取舍和安排上力求做到系统性和原理性，同

41107

时对具体的测量方法和仪器类型也作介绍，并且在书末附有一各种物质粉末用的液体介质和分散剂表，俾能对从事测量和仪器研制的科技人员在实用上有所帮助。此外，书末附有一些习题，供读者演算或推导，这将有助于对原理和计算的掌握；同时也为大学生、研究生的有关课程用作教学参考书提供方便。

在本书的写作过程中，上海机械学院顾冠亮副教授对光散射的规律、光散射法和消光法这两章的初稿，中国纺织大学杨定超老师对全息照相一章的初稿分别作了审阅；同时本书的编写，又得到上海市颗粒学会同仁的关心和支持，谨向他们表示衷心谢忱。

由于粒度和比表面的测量涉及面很广，限于作者的学识和水平，书中疏漏和错误之处在所难免，敬请读者给予指正。

童枯嵩 一九八八、三

丛 书 前 言

物理化学由化学热力学、化学动力学、化学统计力学以及量子化学与结构化学所组成,是大学化学、化工、材料……等许多专业的基础理论课程。在物理化学教学中,学生常常反映它概念抽象难以理解,公式条件苛刻,解题难于着手并且容易出错,也有些学生希望对某些内容有更多的了解,但是目前除了教材外,很难找到适合他们阅读并能引起他们兴趣的参考书。另一方面,物理化学在国民经济各部门和科学技术的各领域中有广泛的应用,诸如工程开发和设计中用到的能量衡算、有效能衡算、相平衡、化学平衡和动力学计算等;材料、能源、生化、环境等领域所涉及的催化剂、表面活性剂、絮凝剂、光电化学过程、生物热力学、生物催化、缓蚀与防腐等;各种新技术、新工艺和新方法,如颗粒技术、膜分离、泡沫分离、相转移催化、双水相萃取、超临界萃取、气相沉积等;各种新的测试技术如磁共振、激光拉曼、光电子能谱、动态光散射等;乃至基础数据的查阅、经验估算、计算机应用等,无不与物理化学密切相关。以上这些方面虽然也有一些专著,但是缺乏适合广大工程技术和科研人员需要的、能简明阐述原理、反映近代进展开拓应用思路又不过分专深的参考资料。有鉴于此,我们应上海科学技术文献出版社之邀请,成立了一个编委会,组织出版这套物理化学丛书。每本的篇幅在十五万字左右,它们或为学生和青年教师深入理解物理化学基本概念并在教材基础上进一步拓宽和加深物理化学知识提供材料;或为工程技术和科研人员所关心的问题提供服务;或为大学毕

业以后继续教育之用。总之,希望能真正解决几个问题,对读者有所裨益,对实现四化有所促进。

由于编委们的阅历和水平有限,在组织编写上会存在这样那样的问题,甚至有错误不当之处,望读者予以指正。要是读者看了这些书后,感到确实有所收获,能够补充教材和专著之不足,编委们的愿望就算实现了。

编 委

一九八七年七月

符 号 表

- A Hamakar 常数
- a 颗粒投影像面积; 颗粒迎光截面积; 颗粒表面间距
- a_m 分子平均面积
- B 校正系数
- b 颗粒投影像宽度
- C 颗粒浓度(单位体积中的颗粒重量)
- c 光速
- D 球直径; 颗粒粒度
- D_{cr} 临界直径
- D' 扩散系数
- d 管的内径; 小孔内径
- E 光能量; 光通量
- E_1 第一层吸附热
- E_l 液化热
- e 电子电荷
- F 力; 沉降阻力
- f 反射系数
- f_N 某粒度级分的个数分数
- f_w 某粒度级分的重量分数
- G 自由能; 质量流量; 消光度(光密度)
- g 重力加速度; 能级简并度; 粒度分布的偏度
- h 颗粒厚度; Planck 常数; 测量区所在位置的深度(自液面算起)
- I 光的强度; 透过样品的光强

- I_0 入射光强; 透过空白的光强
 I_e 电子 Thomson 散射因子
 i_1, i_2 散射强度函数
 J Bessel 函数
 K 消光系数
 K_s 散射系数
 K_a 吸收系数
 k Boltzman 常数; Kozeny 常数; 校正系数
 L Avogadro 常数; 颗粒投影像周长; 颗粒中心与器壁的距离; 气体透过法床层厚度
 l 颗粒投影像长度; 光径长度; 孔隙实际长度
 M 摩尔质量
 m 颗粒质量; 扁平度; 复数折射率; 水力学半径
 N 体系中颗粒数; 在某能级的粒子数
 n 伸长度; 实数折射率; 单位体积中的颗粒数; 颗粒中电子数与同体积介质中电子数之差
 P 光的偏振度; 致密度; 沉积物重量分数
 p 压力
 p_0 饱和蒸气压
 Q 消光截面; 体积流量
 Q_s 散射截面
 Q_a 吸收截面
 R 气体常数; 颗粒半径; 离心管或盘的底的旋转半径; 大于一定粒度的累积重量百分数
 R_G 回转半径
 r 矢径; 由观测点至颗粒中心的距离; 测量区位置的旋转半径(离心半径)

- S 颗粒群表面积;多孔床层表面积;相界面积, 铺展系数
- S_1, S_2 散射振幅函数
- S_v 体积比表面
- S_w 重量比表面
- s 颗粒表面积;液面的旋转半径(离心半径)
- T 绝对温度
- t 时间;沉降时间;吸附层厚度
- t_m 单分子层平均厚度
- u 流体线速度;重力沉降速度
- u_o 离心沉降速度
- V 颗粒群体积;气体吸附量(标准状况体积)
- V_m 吸附单层容量
- v 颗粒体积
- v_m 分子体积
- $\bar{v}$ 气体分子热运动平均速度
- w 重量
- w_o 粘附功
- w_i 浸湿功
- w_s 铺展功
- X 颗粒截面圆的直径
- x 分子间距;颗粒所在位置的旋转半径;相对压力
- y 布朗运动位移
- z 离子价数;滑动因子
- α 形状系数;粒度分布的相对标准偏差;颗粒尺寸参数
($\alpha = \pi D / \lambda$)
- α_s 投影面积或迎光截面积形状系数
- α_s 表面积形状系数

- α_v 体积形状系数
- α_{sv} 表面积体积形状系数
- $\dot{\gamma}$ 切变速率
- δ 分辨距离
- ϵ 介电常数; X 光小角散射角; 能级能量; Polanyi 吸附势
- ζ 动电位
- η 粘度
- η_a 表观粘度
- η_d 微分粘度
- θ 角; 润湿角; 光散射角; X 光小角散射角之半; 孔隙度; 吸附覆盖度(吸附层数)
- κ 扩散层厚度的倒数
- λ 波长; 分子平均自由程
- μ 对 X 光的质量吸收系数
- ν 频率
- ξ 滑动系数
- Π 连乘号
- ρ 悬浮液密度; 电阻率
- ρ_s 固体密度
- ρ_f 流体密度
- Σ 连加号
- σ 粒度分布标准偏差; 界面张力; 液体表面张力; 电导率; 分子碰撞截面
- σ_g 粒度分布几何标准偏差
- σ_{lg} 液体表面张力; 液气界面张力
- σ_{sg} 固气界面张力

•••••

- σ_{sl} 固液界面张力
 τ 切变应力；浊度
 τ_b 屈服点(屈服切变应力)
 ϕ 小于某粒度的累积分数或累积百分数；作用位能；体积分数；颗粒形象函数
 ϕ_A 吸引位能
 ϕ_R 排斥位能
 ψ_o 表面电位
 ψ_K Krumbein 形状因子
 ψ_w Wadell 形状因子
 ω 角速度

绪 言

一个相以细颗粒状态分布在另一相中就构成了分散体系。前者称为分散相，后者称为分散介质。分散体系有固体分散在液体中的悬浮液和溶胶(sol)，有液体分散在另一种不相溶液体中的乳状液，有固体或液体分散在气体中的气悬浮体和气溶胶(aerosol)，有气体分散在液体中的泡沫以及气体分散在固体中的泡沫材料等等。凡分散相颗粒非常细，约在 $1\sim 100\text{nm}$ ($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)范围的分散体系称胶体分散体系，如溶胶和气溶胶。但气溶胶这个名称一般也用来包括比胶体分散体系较粗的气悬浮体。

固体颗粒的松散堆集体通常称为粉末或粉体。

分散体系与粉末在自然界，例如大气、江河湖海和地层表面，以及在生产过程中作为原料、中间物或产品是普遍存在的。

在生产中以粉末为原料或中间物的，例如有玻璃、陶瓷、耐火材料、粉末冶金、磁性材料、电子材料、催化剂、轻工、药物等生产部门。以粉末或分散体系形式作为产品的例如有水泥、燃料、磨料、涂料、染料、食品、化妆品以及各种金属粉末、化学药品、化工产品和轻工产品等。

分散体系和粉末中颗粒的粒度与比表面（单位体积或单位质量分散相所具有的表面积）决定着分散体系和粉末的性质，包括其在诸如气象、水文、地理等自然现象中，工艺过程中，以及应用中的行为，因此是十分重要的。对于多孔体如活性炭、分子筛、催化剂、过滤材料和中空纤维等，比表面也是非常重要的性质。

下面举一些分散相的粒度或比表面起重要作用的例子。

在气象的研究和控制方面,有云、雾或雨中的水滴。

在海洋和江河湖泊等水域中的固体颗粒,其沉积底层中的泥砂颗粒。甚至在海洋中摄影的条件也与海水中所含微粒的浓度和粒度有关。

在涉及多相流的动力工程、燃烧、喷涂、萃取、造粒、颗粒输送等技术中,体系所含的液滴或固体颗粒。

流态化是一种固体微粒因流体(通常是气体)通过而转变成类似流体状态的操作。它在一些颗粒物质的处理,例如混合、干燥和加热,气固相催化反应以及矿石焙烧等许多方面有着广泛的应用。颗粒的粒度是流态化技术中的一个极其重要的性质。

超细颗粒非均相炸药中的颗粒。

选矿中的磁选和浮选。

一切以粉末为原料经过压制或粉浆浇注等成型方法、再经烧结制成产品的工艺,例如粉末冶金和硅酸盐工艺。一切含弥散固态第二相的固体材料。

混凝土的凝结时间和机械性能与其原料水泥的粒度有密切关系。水泥越细,凝结时间越短,机械性能越好。但若太细,短时间内放热太多,收缩剧烈,易产生裂纹。

各种涂料中的颜料颗粒,其粒度以及形状对于涂料的着色力、遮盖力、成膜能力、稳定性等性能影响很大。大多数涂料中的颗粒都须小于 $2\sim 3\mu\text{m}$ 。

牙膏、墨汁、录音带(其硬磁层含有针状的 Fe_3O_4 或 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 等磁粉)、照相材料等轻工产品的性能都与粒度有密切关系。照相材料的感光乳胶层含有卤化银颗粒,其粒度一般是 $0.02\sim 2\mu\text{m}$,粒度越细,解象力越高。对于半导体元件、光学仪器、全息照相等不可缺少的超微粒干板,其乳剂中的卤化银的平均粒度

在 $0.02\sim 0.1\mu\text{m}$ 范围。

甚至面粉的粒度对于其性能、蛋白质与淀粉含量之比也有关系。曾有研究指出，细颗粒面粉的这个比值较高。可以将面粉用空气淘析方法分成粒度范围不同的几部分，用以配制所需蛋白质淀粉含量比的面粉，制造规定要求的食品。

许多药剂是乳状液形式，其中的粒度对性能很有关系。某些药物所含的颗粒，其粒度影响着在人体中溶解吸收的速度，因此对服药的时间间隔有关。有不少药物如青霉素粉的粒度有着严格的规定。

固体农药、液体农药的喷施，就最佳功效来说，对于固体颗粒的大小或喷洒液滴的大小也有一定的要求。

许多工业和科学研究中使用的洁净液体(水或试剂)或洁净室空气中，都规定了所含颗粒的大小以及浓度(单位体积中颗粒数)的上限。例如我国《空气洁净技术措施》制定的三级洁净度(相当于美国联邦标准的 100 级标准)，规定了粒度在 $5\mu\text{m}$ 以上的尘粒不允许存在， $0.5\mu\text{m}$ 以上的尘粒在每升空气中不得超过三个。须知在一般比较清洁的户外空气中，每升所含大于 $0.5\mu\text{m}$ 的尘粒数竟仍有数十万个。许多精密高级产品都需要一定级别的洁净度环境。例如随着电子工业的迅速发展，大规模集成电路的集成度要求也日益提高，其制造工艺对于洁净室和洁净水中的颗粒粒度与浓度提出了十分严格的要求，若不满足，会引起很高的废品率。

大气或工业废气中的烟、尘和各种酸雾都属于气溶胶状态，天然水或工业废水中的颗粒则是悬浮液或溶胶状态。这些颗粒的去除是环境治理的重要课题。就大气粉尘污染来说，人体通过鼻毛的阻留作用和气管粘液的粘着作用能将大部分 $5\mu\text{m}$ 以上的尘粒滤去。极小的颗粒可以通过呼吸作用排出体外。 $0.2\sim$

2 μm 的颗粒则留在肺部,引起种种尘肺疾病。其中含游离 SiO_2 10% 以上的粉尘引起硅肺病,对人特别有害。

由上述种种可见,分散体系和粉末所涉及的自然领域、国民经济和科学研究的领域非常广泛。因此近年来已经兴起了一门称为颗粒学的新学科。颗粒学可以说是研究颗粒的形成和制备、性质和行为、以及其各种工程技术的一门横断学科。这是因为颗粒学的研究对象是一种其三维的每一尺度都在一定的细小范围(由nm级直至例如 cm 级),其邻近相是另一种相的物质层次。颗粒学涉及到许许多多不同的领域。

因为粒度和比表面是表征颗粒体系的几何性质,并且决定着颗粒体系的各种应用性质和行为,因此粒度和比表面的测量是颗粒学测量中最基本的、同时也是最普遍的测量。它在许多有关部门的日常测试中和科学研究中,占有重要的地位。

目 录

符号表.....	1
绪言.....	1
第一章 粒度和比表面测量方法的分类与简述.....	1
参考文献	15
第二章 粒度颗粒形状与比表面.....	17
§2.1 颗粒的粒度	17
§2.2 颗粒的形状	20
§2.3 颗粒群粒度分布的图形表示和函数表示	31
§2.4 颗粒群的各种平均径	43
§2.5 比表面与粒度分布	46
参考文献	48
第三章 粉末分散原理.....	49
§3.1 粉末中颗粒间的附着力	49
§3.2 界面自由能	52
§3.3 表面活性剂	53
§3.4 润湿	56
§3.5 团粒中颗粒的分离	62
§3.6 溶胶或悬浮液分散状态的稳定化	64
§3.7 分散效果的检查	68
参考文献	72
第四章 筛分析.....	74
§4.1 筛网材料与筛的制法	74
§4.2 筛分析用的标准筛系列	76
§4.3 筛子的校准	78
§4.4 筛分析的操作与结果表示	78

• f •