



普通高等教育“十一五”规划教材
21世纪材料科学与工程丛书

粉体科学与工程基础

叶 菁 编著



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

• 21 世纪材料科学与工程丛书 •

Fundamentals of Powder Science and Technology

粉体科学与工程基础

叶 菁 编著

科 学 出 版 社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书以材料类专业的本科生和研究生为对象,系统地介绍了粉体科学与工程的基础知识和基本理论,包括颗粒的几何特性与表征,密集态粉体的堆积结构和力学与流变特性的分析,离散态颗粒在流体中的运动规律和沉降速度计算,并对粉体的一些特殊物理现象和表面物理化学性质及机械力化学效应进行了机理性分析,使学生能根据材料的性能和设计要求,从粉体科学与技术的角度,对颗粒的性状进行表征与控制,对粉体的行为进行规律性分析,为进一步学习“粉体过程工程”、“粉体表面改性”及“超微粉体与制备”等课程内容奠定必要的基础。

本书亦可作为其他与粉体科学技术相关专业的本科生或研究生教材使用,还可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粉体科学与工程基础/叶菁编著. —北京:科学出版社,2009
普通高等教育“十一五”规划教材. 21 世纪材料科学与工程丛书
ISBN 978-7-03-025112-1

I. 粉… II. 叶 III. 粉末技术—高等学校—教材 IV. TB44
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 131685 号

责任编辑:王雨舸 曾 莉/责任校对:董艳辉
责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

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>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 8 月第一次印刷 印张:11 1/2

印数:1—4 000 字数:219 000

定价:20.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



前 言

作为一门新兴的综合性学科,粉体科学与工程在诸多科学研究和工程技术领域的重要性越来越显现,这也促使我国近十年来在粉体科学与工程研究、开发和应用方面的快速发展,使现代粉体加工业充满活力。与此对应,粉体科学与工程逐渐成为一个完整学科体系的轮廓也越来越清晰,不少关于粉体科学与工程方面的著作、手册及教材应运而生,令人欣喜。

粉体科学与工程和材料科学与工程的发展密切相关。作者从事材料类专业的粉体科学与工程教学已有二十多年,其中,针对材料科学与工程类专业本科生教学要求,在合理构建粉体科学与工程学科知识方面作过一些探讨。实践表明,材料类专业本科生应较为系统地掌握“粉体科学与工程基础”理论与知识,在此基础上,可进一步掌握“粉体过程工程”、“粉体表面改性”、“超微粉体与制备”及“粉体物性与工艺实验”等知识和实验能力。从而使学生能根据材料的性能要求,从粉体科学的角度,对原材料的粉体颗粒几何和界面特性进行精确表征和设计,并从粉体过程工程的角度,正确掌握和合理运用实现颗粒几何和界面特性设计要求的工艺及装备。

本书定位于“粉体科学与工程基础”,作为 40~50 学时的教材使用。其内容的编著与现有的同类书籍有所不同,特点在于以学生易于理解和掌握的形式,着重介绍粉体科学与工程的基础理论与知识,细化普适性原理,淡化非共性细节,并力图避免过多引用论文图表和实验关系式等使学生感觉枯燥和不易掌握的非基础性内容,舍弃了一些偏重技术应用性的介绍。在“导论”中,对粉体的一些重要概念进行了归类 and 关联分析,并从粉体集合状态的角度,提出了“颗粒密集态和颗粒离散态”的概念和定义,并以此为基础对粉体科学与工程涉及的各种颗粒现象进行了系统的概括,更明晰地揭示了粉体性状和行为的内在联系与规律。书中力求为一些重要的概念赋予更为严谨的定义。在粉体的流动性、颗粒尺寸与能量的分布状态、颗粒的光吸收机理、粉体在液体中的凝聚与分散等方面给出了一些新的解释及分析和探讨。书中各章设置了一些总结和导读性内容,并给出了一些思考题,便于教学中对所学内容的理解和掌握,也便于读者自学。

本书是作者集多年粉体科学与工程课程教学经验,并在多个版本教案的基础上凝练而成,内容融会贯通,便于学生系统知识的构建与进一步拓展。

限于作者水平,虽力求审慎,但疏漏和不足在所难免,恳请师生和读者批评指正。

本书的撰写内容征求了我的同事李洪斌老师的建议,在出版过程中得到了领导、专家和家人的支持,在此一并表示衷心的感谢。

叶 菁

2009 年 5 月



目 录

第 1 章 导论	1
1.1 关于颗粒的集合状态	1
1.2 关于粉体尺寸的划分	3
1.3 关于表面效应和量子尺寸效应	4
1.4 关于本书的内容	5
思考题.....	6
第 2 章 颗粒的几何特性与表征	7
2.1 颗粒的大小与分布	7
2.1.1 粒径和粒度	7
2.1.2 粒度分布.....	11
2.2 颗粒的形状.....	22
2.2.1 形状系数.....	22
2.2.2 形状指数.....	23
2.2.3 颗粒形状的数学分析法	24
2.3 粉体比表面积.....	31
2.3.1 颗粒的表面性状	31
2.3.2 粉体比表面积	32
2.3.3 粉体比表面积计算	32
思考题	35
第 3 章 颗粒的堆积结构与致密堆积	36
3.1 颗粒堆积结构的基本参数.....	36
3.2 颗粒的堆积结构.....	38
3.2.1 等径球形颗粒的规则堆积.....	38
3.2.2 等径球形颗粒的随机堆积.....	39
3.2.3 异径球形颗粒的堆积	39
3.3 实际颗粒的堆积.....	40
3.3.1 非连续尺寸粒径的颗粒堆积	40
3.3.2 连续尺寸粒径的颗粒堆积.....	41
3.4 颗粒致密堆积理论与经验.....	41

3.4.1	Horsfield 致密堆积理论	41
3.4.2	Fuller 致密堆积曲线	42
3.4.3	Alfred 致密堆积方程	43
3.4.4	隔级致密堆积理论	43
3.4.5	致密堆积经验	44
思考题		44
第4章 粉体力学与流变特性		45
4.1	颗粒接触点上的作用力与粉体层应力	45
4.1.1	颗粒间的内聚力	46
4.1.2	固体表面的摩擦力	47
4.1.3	粉体层极限应力状态	48
4.1.4	粉体层应力的莫尔圆分析法	49
4.2	粉体的摩擦角特性	53
4.2.1	内摩擦角	53
4.2.2	休止角	58
4.2.3	壁面摩擦角与滑动摩擦角	59
4.2.4	运动摩擦角	60
4.3	粉体的流变特性	60
4.3.1	粉体的屈服轨迹	61
4.3.2	粉体的有效屈服轨迹与有效内摩擦角	61
4.3.3	粉体的开放屈服强度	62
4.3.4	粉体的流动函数	62
4.4	粉体层的压力分布	63
4.4.1	圆筒容器粉体层压力分布	63
4.4.2	倒锥形料斗的粉体层压力分布	64
4.5	粉体的压缩	66
4.5.1	压缩机理	66
4.5.2	压缩应力分布	67
4.5.3	压缩率与压缩应力之间的变化关系	68
思考题		68
第5章 颗粒流体力学		69
5.1	颗粒在流体中的沉降运动	70
5.1.1	颗粒在流体中的运动方程	70
5.1.2	颗粒的运动阻力系数	72
5.1.3	颗粒沉降速度计算	74

5.1.4 颗粒沉降速度的修正	75
5.2 流体在颗粒固定床层中的透过流动	77
5.2.1 固定床及流动特性	78
5.2.2 透过流动的压降计算	79
5.3 颗粒在流体中的悬浮运动	81
5.3.1 流化床基本性质	81
5.3.2 流化床主要参数计算	85
思考题	86
第6章 粉体的物理特性	88
6.1 粉体的热学性质	88
6.1.1 颗粒的能量及热力学关系	88
6.1.2 颗粒的熔点和溶解度	91
6.1.3 颗粒的热容	93
6.1.4 粉体的传热特性	94
6.2 粉体的电学性质	99
6.2.1 颗粒的荷电现象与荷电量	99
6.2.2 颗粒荷电量的测量	102
6.2.3 粉体的电导性	102
6.2.4 粉体的介电常数	104
6.3 粉体的光学性质	106
6.3.1 光传播的基本属性	106
6.3.2 颗粒分散体系中的光散射	107
6.3.3 粉体层表面光的反射	110
6.3.4 颗粒的光吸收	111
6.3.5 光在颗粒分散体系中的衰减	114
6.4 粉体的磁学性质	115
6.4.1 物质的磁性	115
6.4.2 颗粒的磁性	117
思考题	120
第7章 粉体的表面物理化学性质	121
7.1 表面现象与表面能	121
7.1.1 表面现象	121
7.1.2 表面能	122
7.1.3 固体表面能的测量	122
7.1.4 颗粒表面活性	124

7.2 粉体表面的吸附特性	125
7.2.1 固体表面吸附现象	125
7.2.2 颗粒对气体的吸附	125
7.2.3 颗粒在溶液中的吸附	129
7.3 粉体表面的润湿性	135
7.3.1 固体表面的润湿与润湿性判别	135
7.3.2 固体表面的亲水性	137
7.3.3 颗粒的润湿性	137
7.3.4 粉体表面的亲水性	140
7.3.5 粉体润湿性的测量	141
7.4 粉体的凝聚与分散	144
7.4.1 粉体凝聚的类型	144
7.4.2 粉体在空气中的凝聚与分散	145
7.4.3 粉体在液体中的凝聚与分散	149
思考题	156
第8章 粉体的机械力化学效应	157
8.1 机械力化学过程的分类	158
8.1.1 按机械力作用形式分类	158
8.1.2 按活化状态分类	159
8.1.3 按转化方向和结果分类	161
8.2 粉碎过程诱发的机械力化学效应	161
8.2.1 粉碎平衡	162
8.2.2 粉碎诱发的颗粒晶体结构变化	163
8.2.3 粉碎激发的粉体其他理化性能变化	168
思考题	172
参考文献	173

导 论

所谓粉体,即固体颗粒的集合体。或者说,粉体是由数量极多、尺寸微小、比表面积巨大的固体颗粒集合而成。

除非在真空中,否则粉体必处于某种介质中,这种介质是气体或液体,极少数情况下是等离子体。因此,对于粉体性状及行为的研究,需要不同程度地考虑固体颗粒与流体介质之间的相互作用。所谓不同程度,这取决于我们对问题的研究是站在偏重于固体属性的角度,还是站在偏重于流体属性的角度,以便能更接近实际地揭示粉体的性质和规律。为此,我们将粉体在流体介质中的集合状态归于不同的形式进行分类处理。

“粉体科学与工程”是以固体颗粒为研究对象,对其几何结构、力学性质和物理特性与粉体表面物理化学性质,以及粉体过程工程中的工艺与设备问题,进行系统研究的综合性工程学科。若将研究对象从固体颗粒扩展到液滴和气泡,则有“颗粒学”。若从技术的角度突出工程与应用,则相应有“粉体技术”和“颗粒技术”。

1.1 关于颗粒的集合状态

在粉体科学与工程中,颗粒的集合状态分为两类:颗粒密集态和颗粒离散态。颗粒密集态是指:粉体在流体介质中以颗粒之间相互接触的方式形成聚积集

合体。在颗粒密集态中,通常颗粒是主相,颗粒通过至少一个,直至有限个几何点与其他颗粒相接触,颗粒自身的重力或兼有施加的外力,经由这些接触点在颗粒之间平衡和传递。由于颗粒间的接触限于有限个几何点,而达不到颗粒全表面接触,因此,密集态颗粒间存在着空隙结构。

对颗粒密集态,我们着重关注的是颗粒与颗粒之间的相互作用和空隙对密集态粉体性能的影响,以及将密集态粉体视为一种准连续结构所表现的某些似固体属性。在本书中,颗粒密集态主要涉及:颗粒堆积结构中的空隙率和致密堆积;粉体力学中的摩擦角和应力分布及流变性能;颗粒流体力学中的流体在颗粒固定床的透过流动;粉体物理特性中的颗粒层传热、电导、介电性和磁性,粉体层表面的光反射和光吸收;粉体表面物理化学中的粉体层润湿及颗粒在空气中的凝聚与分散等内容。

在粉体科学与工程中,颗粒密集态的常见形式有:颗粒堆积体、颗粒填充体、粉体压缩体(或压制体)、颗粒沉积体和颗粒浓缩体等。颗粒密集态粉体在广义上又称为粉体层(或颗粒层)。根据分散体系的概念,则可以将颗粒密集态视为一种紧密型颗粒分散体系(或连续型颗粒分散体系)。

颗粒离散态是指:粉体在流体介质中以颗粒互不接触的分散方式形成分散集合体。在颗粒离散态中,通常流体是主相,颗粒在流体介质中被流体全表面包围,颗粒间不发生稳态接触,颗粒自身的重力由运动流体的黏性力和惯性力,或由于超细颗粒热运动形成的扩散作用,或颗粒静电作用及溶剂化膜作用等达到平衡,使颗粒在流体中形成悬浮或沉降状态。因为颗粒间的距离通常远大于颗粒尺寸,所以,颗粒离散态通常是以颗粒浓度取代空隙率来表征颗粒与流体间的相互影响作用。

对颗粒离散态,我们着重关注的是颗粒与流体之间的相互作用和浓度对离散态粉体性能的影响,以及将离散态粉体视为伪流体时所表现的某些似流体属性。在本书中,颗粒离散态主要涉及:颗粒流体力学中的颗粒沉降运动和颗粒悬浮运动;粉体物理特性中的颗粒离散态传热、电导和介电性,光在颗粒分散体中的散射和光吸收;粉体表面物理化学中的吸附、润湿及颗粒在液体中的凝聚与分散等内容。

在粉体科学与工程中,颗粒离散态的常见形式有悬浮体、气溶胶和水溶胶等。根据分散体系的概念,则可以将颗粒离散态视为一种离散型颗粒分散体系。

所谓颗粒分散体系是指:一种或一种以上的物相,以颗粒形式离散分布在某种连续相中构成的多相体系。在颗粒分散体系中,连续相称为分散介质,而离散分布的颗粒称为分散相。分散相和连续相可以是固体、液体或气体。因此,颗粒分散体系共有:气-气、气-液、气-固、液-气、液-液、液-固、固-气、固-液和固-固 9 种形式。若进一步将分散体系的概念扩展到两种连续相互相穿透而形成的混合体,称之为紧密型颗粒分散体系或连续型颗粒分散体系。与之对应,在连续相中,颗粒彼此互

不接触而呈离散分布的体系称为离散型颗粒分散体系。

在粉体科学与工程中,颗粒在流体介质中的分布形式通常是:颗粒为分散相,气体或液体为连续相。因此,粉体的颗粒密集态和颗粒离散态分别涉及的是:前者,固-气及固-液分散体系;后者,气-固和液-固分散体系。可见,粉体涉及的颗粒分散体系有4种形式。

基于颗粒间是否相互接触所划分的粉体在流体介质中的集合状态——颗粒密集态和颗粒离散态具有相对性,两者之间可相互转化:当粉体中的流体介质增加到足以使颗粒间互不接触时,颗粒密集态就转化为颗粒离散态,如颗粒流态化、颗粒浸渍润湿和搅拌稀释等。当粉体中的流体介质减少到足以使颗粒间相互接触时,颗粒离散态就转化为颗粒密集态,如颗粒沉积、浓缩和颗粒大范围的凝聚等。

虽然,颗粒密集态和颗粒离散态是密切相关的,但根据两者的特性,区别也是明显的。尤其从研究对象的处理方式上看,颗粒聚积态与颗粒分散态的一个重要区别是:颗粒聚积态是将所有颗粒(颗粒群)同时作为整体对象进行粉体性状和行为的研究,而颗粒分散态则是将每一个颗粒(单颗粒)分别作为单一对象进行粉体性状和行为的研究。

在本书中,涉及颗粒密集态和颗粒离散态的相关内容时,基于习惯和形象的考虑,可能仍使用诸如颗粒堆积体、颗粒填充体、粉体层及悬浮体、分散体或分散体系等概念。

1.2 关于粉体尺寸的划分

粉体尺寸的划分也具有相对性。

通常,“粉体”的颗粒尺寸在数百微米以下,直至纳米尺度。而“粉粒体”的颗粒尺寸在数毫米至数微米范围内,“粒体”的尺寸则在数十毫米至数毫米范围内。

本书中涉及块体、颗粒、超细颗粒和超微颗粒等概念,用以区别固体尺寸大小的差异或颗粒粗、细程度的不同,其中:

(1) 块体,意指宏观尺寸意义上的固体,或半径为无穷大的颗粒。通常表示固体的尺寸远远大于粉体颗粒的尺寸;

(2) 颗粒,泛指尺寸在数百微米以下,直至纳米尺度的颗粒;

(3) 超细颗粒,是指尺寸在 $10\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒;

(4) 超微颗粒,是指尺寸在 $1\ \mu\text{m}$ 以下的颗粒;

(5) 纳米颗粒,是指尺寸在 $100\ \text{nm}$ 至 $0.1\ \text{nm}$ 范围内的颗粒。

但在某些情况下,颗粒与超微颗粒的划分与颗粒所涉及的性质及应用有关。例如,当考虑颗粒的分子热运动时,尺寸小于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒已明显进入分子热运动

范畴,因而 $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒被认为是超微颗粒;当考虑分散体系颗粒的稳定性时, $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下的颗粒也被认为是超微颗粒;当考虑颗粒光散射与吸收现象的差异时,颗粒尺寸与入射光波的波长相当或小于波长时,被认为是超微颗粒;当考虑颗粒的表面效应和小体积效应时,则两种效应中的一种或两种都出现时,颗粒所具有的相应尺寸被认为是超微颗粒的尺寸。

此外,颗粒与超细颗粒的划分还与粉体所涉及的应用行业和研究领域有关。有些行业中,尺寸在数十微米以下,即被视为超细颗粒;而有些领域中,尺寸在数微米以下,仍被作为粗颗粒加以控制。

其实,除非颗粒的性质和应用涉及表面效应或量子尺寸效应,否则,粉体尺寸的划分或颗粒粗、细的称谓无关紧要。

1.3 关于表面效应和量子尺寸效应

超微粉体的表面效应是指:随着尺寸的减小,表面原子数量占颗粒总原子数量的比例增加,而表面原子因一侧失去最近邻原子的成键力,引起表面原子的扰动,使得表面原子和近表面原子距离较体内原子大,并产生“再构”现象。这种再构会改变表面及近表面区结构的对称性,并影响表面所有对结构敏感的性质,如原子振动和化学、光学及电子学等行为。同时,随着尺寸的减小,颗粒比表面积和表面能增加,使得颗粒表面活性大大提高,由此产生所谓超微粉体的表面效应。

超微粉体的量子尺寸效应(小体积效应)是指:当颗粒尺寸减小到某一值时,金属费米(Fermi)能级附近,相邻的电子能级由准连续态变为离散态的现象。

根据固体的能带理论,电子在晶体中的能量状态服从费米-狄拉克(Dirac)统计分布,即在热平衡条件下,电子占据在能量为 E 的电子态上的概率 f 为

$$f(E, T) = \left[\exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) + 1 \right]^{-1} \quad (1-1)$$

式中, E_F 表示费米能,绝对零度时, $E_F^0 = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{3n}{8\pi} \right)^{\frac{2}{3}}$, 其中, n 表示电子密度, m 表示电子质量, h 表示普朗克常量, k 表示玻耳兹曼常量, T 表示绝对温度。

当假设自由电子局限在边长为 L 的立方体内时,则电子能级为

$$\epsilon_n = \frac{\pi^2 h^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2)}{2mL^2} \quad (1-2)$$

式中, n_x, n_y, n_z 为一组量子数,其取值范围为 $0 \leq (n_x, n_y, n_z) \leq N$, N 为自由电子总数; ϵ_n 表示相应于第 n 个量子态的能量本征值。则费米能级附近,相邻能级的能量差为

$$\Delta\epsilon = \frac{\pi^2 h^2}{2mL^2} \quad (1-3)$$

式(1-3)表明,当颗粒尺寸减小时 $\Delta\epsilon$ 变大,准连续的能带变为分立的能级。由于 $\Delta\epsilon$ 是常量,故分裂能级的间距相等。

久保(Kubo)对金属颗粒的量子尺寸效应作了进一步的研究,并考虑实际颗粒的不规则性,认为电子能级分布服从一定的统计规律,并提出了分裂能级的平均间距 δ 与颗粒所含的自由电子总数 N 成反比的关系:

$$\delta = \frac{4}{3} \frac{E_F}{N} \quad (1-4)$$

由此可见,对宏观或块体金属,电子总数 N 很大, δ 很小,电子能级可视为连续的。当金属颗粒尺寸减小时,电子总数 N 减少, δ 随之增大,即电子能级成为离散型。这就是著名的久保效应。

1.4 关于本书的内容

本书内容针对材料类专业的本科生设定,使他们通过本书的学习,能够系统地掌握粉体科学与工程的基础知识和基本理论,从而能根据材料的性能和设计要求,从粉体科学的角度,对颗粒的性状进行表征与控制,对粉体的行为进行规律分析,并为进一步学习“粉体过程工程”、“粉体表面改性”及“超微粉体与制备”等课程内容奠定必要的基础。

本书在粉体科学与工程基础方面涉及的主要内容和解决的问题如下:

(1) 颗粒的几何特性与表征:给出不规则颗粒尺寸的度量方法,尺寸不同且相对数量不等的颗粒群平均尺寸与粒度分布的表征方法,以及颗粒形状的表征和表面状态的量化方法。

(2) 颗粒的堆积结构和致密堆积:分析密集态粉体颗粒的堆积结构和变化规律,给出实现颗粒致密堆积的理论及方法。

(3) 粉体力学与流变特性:分析密集态粉体颗粒接触点上的作用力,给出粉体层应力分析方法和密集态粉体摩擦角的概念,并与粉体层应力进行关联分析,提出密集态粉体流变性能的判定方法和粉体层压力分布计算方法,分析粉体压缩时的应力与压缩率之间的关系。

(4) 颗粒流体力学:分析离散态颗粒在流体中的沉降运动规律,给出各种流态下的颗粒沉降速度计算方法和实际颗粒的沉降速度修正方法,分析了流体通过颗粒固定床的运动规律和流速与压降之间关系的计算方法,分析颗粒在流体中的悬浮运动规律,给出流化床主要参数的计算方法。

(5) 粉体的物理特性:针对颗粒在热、电、光和磁学方面的一些特殊物理现象,分析颗粒尺寸与能量分布状态的变化规律及颗粒熔点、溶解度、热容和粉体的传热

特性;分析颗粒的荷电、电导与介电特性;分析离散态颗粒的光散射规律和光吸收机理,以及密集态粉体的光反射规律;分析颗粒尺寸和集合状态对磁性的影响规律。

(6) 粉体的表面物理化学性质:分析颗粒表面性状与表面能的影响关系,分析颗粒表面吸附、粉体润湿和亲水性与疏水性等现象和规律;分析离散态颗粒在空气和液体中的凝聚机理,提出相应的分散调控措施。

(7) 粉体的机械力化学效应:对机械力化学过程的多种形式进行概括和分类,着重分析粉碎过程诱发的各种机械力化学效应,包括粉碎平衡现象、粉碎诱发的颗粒晶体结构变化和粉碎激发的粉体其他理化性质变化。

思 考 题

1. 颗粒密集态和颗粒离散态的特点是什么? 两者的联系与区别是什么?
2. 什么是超微粉体的表面效应和量子尺寸效应?

颗粒的几何特性 与表征

颗粒的几何特性与表征是粉体科学与工程最基本的内容。凡涉及粉体的理论研究和工程应用,均离不开对颗粒几何特性的表征,否则,关于粉体的一切都无从谈起。故可认为,颗粒几何特性的表征值,是粉体的“本征”参数。

我们知道,球体或正立方体的尺寸可以仅用一个参数来完整地描述,但实际颗粒的形状通常并非如此。由此引出一个问题:对于形状不规则的颗粒,如何度量其尺寸?

不仅如此,相关的问题还有:对尺寸不同且相对数量不等的颗粒群,如何从整体上度量其特征平均尺寸?颗粒不规则的程度如何量化?形状和尺寸对颗粒表面状态的影响又如何量化?等等,这些正是本章所需要解决的问题。

2.1 颗粒的大小与分布

颗粒几何特性主要包括颗粒大小(尺寸)、形状、比表面积和孔径等,其中,尺寸的大小是颗粒最重要的几何特征参数。

表征颗粒尺寸的主要参数有:粒径,粒度及粒度分布值。

2.1.1 粒径和粒度

粒径是指:以单个颗粒为对象,表征单颗粒几何尺寸的大小。

粒度是指：以颗粒群为对象，表征所有颗粒在总体上几何尺寸大小的概念。

1. 单颗粒的粒径

实际颗粒大多并非球形。因此，为了解决单个颗粒（即在颗粒群中分别逐一取颗粒时）因形状不规则带来的尺寸度量问题，有必要约定某些度量方式，来获得统一规则下的单颗粒尺寸大小。常用的单颗粒粒径度量方式主要有：轴径、球当量径、圆当量径和定向径。

1) 轴径

轴径是指：以颗粒某些特征线段，通过某种平均方式，来表征单颗粒的尺寸大小。

通常，以颗粒处于最稳定状态下的外截长方体的长(l)、宽(b)、高(h)作为颗粒的特征线段，获得三轴平均径，如图 2-1 所示；也可以长(l)和宽(b)作为颗粒的特征线段获得二轴平均径。

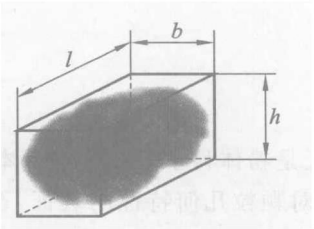


图 2-1 最稳定状态下颗粒的外截长方体轴径的平均算式如表 2-1 所示。

表 2-1 单颗粒的轴径平均算式

名 称	符 号	算 式
三轴算术平均径	d_c	$d_c = \frac{l+b+h}{3}$
三轴几何平均径	d_z	$d_z = \sqrt[3]{lbh}$
三轴调和平均径	d_x	$d_x = \frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}$
二轴算术平均径	d_b	$d_b = \frac{l+b}{2}$
二轴几何平均径	d_y	$d_y = \sqrt{lb}$

2) 球当量径

球当量径是指：用与颗粒具有相同特征参量的球体直径来表征单颗粒的尺寸大小。

这些特征参量可以是体积、面积、比表面积、运动阻力、沉降速度等。几种主要的单颗粒球当量径如表 2-2 所示。

表 2-2 单颗粒的球当量径

名 称	符 号	算 式	物理意义或定义
等体积球当量径(体积直径)	d_v	$d_v = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$	与颗粒具有相同体积的球体直径
等面积球当量径(面积直径)	d_s	$d_s = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$	与颗粒具有相同表面积的球体直径
等比表面积球当量径 (比表面积径)	d_{sv}	$d_{sv} = \frac{d_v^3}{d_s^2}$	与颗粒具有相同比表面积的球体直径
阻力当量径(阻力直径) ($Re < 0.5$)	d_d	$F_R = C \rho v^2 d_d^2$	在黏度相同的流体中,与颗粒速度相同且 具有相同运动阻力的球体直径
Stokes 当量径(Stokes 直径)	d_{st}	$d_{st} = \sqrt{\frac{18\eta v}{g(\rho_p - \rho)}}$	在同一流体中的层流区内($Re < 0.5$),与 颗粒具有相同沉降速度的球体直径

注: V 为颗粒体积; S 为颗粒表面积; F_R 为颗粒在流体中的沉降阻力; C 为颗粒运动阻力系数; ρ 为流体密度; v 为颗粒运动速度; η 为流体动力黏度; ρ_p 为颗粒密度。

3) 圆当量径

圆当量径是指:用与颗粒具有相同投影特征参量的圆的直径来表征单颗粒的尺寸大小。这些投影特征参量包括面积、周长等。几种主要的单颗粒圆当量径如表 2-3 所示。

表 2-3 单颗粒的圆当量径

名 称	符 号	算 式	物理意义或定义
投影面积直径	d_a	$d_a = \sqrt{\frac{4A}{\pi}}$	与颗粒在稳定位置的投影面积相等的圆直径
随机定向投影面积直径	d_p	$d_p = \sqrt{\frac{4A_i}{\pi}}$	与颗粒在任意位置的投影面积相等的圆直径
投影周长直径	d_x	$d_x = \frac{L}{\pi}$	与颗粒在稳定位置的投影外形周长相等的圆直径

注: A 为颗粒在稳定位置的投影面积; A_i 为颗粒在任意位置的投影面积; L 为颗粒在稳定位置的投影外形周长。

4) 定向径

定向径是指:在以光镜(或电镜)进行颗粒形貌图像的粒度分析中,对所统计的颗粒尺寸度量,均与某一方向平行,且以某种规定的方式获取每个颗粒的线性尺寸,作为单颗粒的粒径,如图 2-2 所示。几种主要的单颗粒定向径如表 2-4 所示。