



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

粉体工程学

许珂敬 编著

中国石油大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

粉体工程学

许珂敬 编著



中国石油大学出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。粉体工程学是集材料、化工、冶金和矿业等专业于一体的综合性学科,又是近代高新技术、新材料的发展的产物。为满足高校大中专、研究生和企事业专业技术人员等学习和参考的需要,特编著此书。全书共分七章,前四章是关于传统粉体的表征及制备,第五章是关于超细粉体的基本原理及制备,第六章是关于粉体的分级与分离,最后一章是关于纳米粉体的基本原理、制备及其应用。本书将传统粉体、超细粉体和纳米粉体的原理、制备及应用融为一体,便于全面地掌握粉体的系统知识。

图书在版编目(CIP)数据

粉体工程学/许珂敬编著. —东营:中国石油大学出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-5636-3133-9

I. ①粉… II. ①许… III. ①粉末技术—高等学校—教材 IV. ①TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 088022 号

书 名: 粉体工程学
编 著: 许珂敬

责任编辑: 刘玉兰(电话 0532—86981535)

出版者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: eyi0213@163.com

印刷者: 山东省东营市新华印刷厂

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0546 8392062)

开 本: 185×260 印张: 17 字数: 434 千字

版 次: 2010 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 34.80 元

P R E F A C E

粉体工程学

前 言

随着高科技日新月异的发展,粉体、超细粉体和纳米粉体学是近年来备受关注的一个新的学科领域。它涉及凝聚态物理、化学、材料、生物等许多领域的知识,因而被称为交叉学科。近年来,对超细粉体和纳米粉体的研究已成为科学界的热点,人们迫切需要比较系统地介绍包括传统粉体、超细粉体和纳米粉体的教材或参考书。为此,在总结十几年来国内外有关粉体的制备研究成果的基础上,我们进行了系统的归纳,撰写了《粉体工程学》一书。

本书在阐述传统粉体的基本理论、制备及应用的基础上,将超细粉体的理论和粉碎设备作了重点介绍,特别是对超微粉体即纳米粉体($<100\text{ nm}$)的奇特性能、制备方法及其应用作了较详细的阐述。为便于学习,本书的每一章节中均留有思考题,以便于巩固和掌握知识。

本书共分七章,前四章属于传统粉体,由山东理工大学的杨新春教授编写;后三章为超细粉体和纳米粉体,由山东理工大学的许珂敬教授编写,全书由许珂敬统筹、修改和校对。

本书在编写过程中,得到了张宗新教授和任京成教授的帮助和指导;王伟和西金涛等在插图制作中做了很多工作。在本书出版之际,谨向他们表示衷心的感谢。

此外,本书还参考了大量的文献资料,在此也向这些文献的作者们表示谢意。由于编者水平所限,书中难免存在不当之处,恳切希望读者批评指正。

编 者

2010年7月

CONTENTS

粉体工程学

目 录

绪 论	1
第一章 粉体的表征与测量	3
1.1 单个颗粒的表征	3
1.1.1 粒度及其表示方法	3
1.1.2 颗粒的形状	3
1.2 粒度分布	5
1.2.1 颗粒群粒度的表示方法	5
1.2.2 频率分布和累积分布	6
1.2.3 粒度特性曲线和粒度特性方程	7
1.2.4 粒度分析方法	8
1.3 颗粒粒度的测量	8
1.3.1 筛分分析	9
1.3.2 显微镜法	11
1.3.3 光散射法和消光法	11
1.3.4 电传感法	13
1.3.5 气体吸附法	13
1.3.6 测量方法的选择	14
思考题一	14
第二章 粉体的聚集特性	15
2.1 颗粒层的填充性能	15
2.1.1 填充指标	15
2.1.2 均一球形颗粒群的填充与堆积	16
2.1.3 非均一球形颗粒的填充与堆积	20
2.2 粉体中颗粒间的附着力	23
2.2.1 分子间范德华引力导致的颗粒间引力	23
2.2.2 颗粒所带异号静电荷引起的引力	24
2.2.3 附着水分的毛细管力	24
2.2.4 磁性力	24

2.2.5 颗粒表面不平滑引起的机械咬合力	24
2.3 湿颗粒群特性	24
2.3.1 填充层内的静态液相	24
2.3.2 液体架桥	25
2.3.3 颗粒间持液量	26
2.3.4 抽吸势	27
2.3.5 液体在粉体层毛细管中的上升高度	29
思考题二	32
第三章 粉体力学	33
3.1 粉体的摩擦特性	33
3.1.1 内摩擦角	33
3.1.2 安息角	38
3.1.3 壁摩擦角和滑动摩擦角	38
3.1.4 运动摩擦角	38
3.2 粉体压力计算	39
3.2.1 詹森(Janssen)公式	39
3.2.2 料斗的压力分布	40
3.3 粉体贮仓的容量计算	41
思考题三	43
第四章 粉碎过程及设备	44
4.1 粉碎的基本概念	44
4.1.1 粉碎的定义	44
4.1.2 粉碎比	44
4.1.3 粉碎级数	44
4.1.4 粉碎产品的粒度特性	45
4.1.5 破碎的基本方式	45
4.1.6 粉碎模型	46
4.1.7 常用的粉碎流程基本形式	47
4.2 被粉碎物料的性质	47
4.3 粉碎的基本理论	49
4.3.1 面积假说	49
4.3.2 体积假说	50
4.3.3 裂缝假说	51
4.3.4 粉碎理论的评述	52
4.4 粉碎机械	52
4.4.1 颚式破碎机(pliers)	52
4.4.2 圆锥式破碎机	60
4.4.3 辊式破碎机	64
4.4.4 冲击式破碎机	67

4.5 粉磨机械.....	79
4.5.1 球磨机.....	79
4.5.2 棒磨机.....	99
4.5.3 砾磨机.....	100
思考题四.....	100
第五章 超细粉碎	101
5.1 超细粉碎过程的物理化学现象.....	101
5.1.1 物料的化学结构与粉碎性能的关系.....	101
5.1.2 粉碎过程的机械化学反应.....	102
5.1.3 物理化学环境对粉碎过程的作用.....	104
5.1.4 粉碎助剂的应用.....	105
5.2 超细粉碎机及超细分级机.....	108
5.2.1 气流粉碎机.....	111
5.2.2 机械式超细粉碎机.....	136
5.2.3 深冷粉碎技术.....	152
5.2.4 超细分级机.....	154
5.2.5 超细粉碎实践.....	160
思考题五.....	170
第六章 分级与分离	171
6.1 概 述.....	171
6.2 分级及分离理论.....	171
6.2.1 分离效率.....	171
6.2.2 分离(级)精度.....	173
6.3 分 级.....	173
6.3.1 筛分.....	173
6.3.2 干式分级.....	175
6.3.3 湿式分级.....	178
6.4 分 离.....	180
6.4.1 固气分离.....	180
6.4.2 按颗粒物性分离.....	184
6.4.3 固液分离.....	188
思考题六.....	197
第七章 纳米粉体	198
7.1 纳米粉体的基础理论.....	198
7.1.1 纳米颗粒的基本概念.....	198
7.1.2 纳米粉体的基本性能.....	199
7.1.3 纳米粉体的物理性能.....	204
7.1.4 纳米粉体化学.....	211
7.2 纳米粉体的制备.....	219

7.2.1 物理制备工艺	219
7.2.2 化学制备工艺	225
7.3 纳米微粒尺寸的评估	237
7.3.1 透射电镜观察法(TEM 观察法)	238
7.3.2 X射线衍射线宽法(谢乐公式)	238
7.3.3 比表面积法	239
7.3.4 X射线小角散射法(Small Angle X-ray Scattering, SAXS)	241
7.3.5 喇曼(Raman)散射法	242
7.4 超细粉末的应用	242
7.4.1 电子材料	242
7.4.2 磁性材料	246
7.4.3 光学材料	248
7.4.4 高强度、高韧性材料中的应用	250
7.4.5 传感器材料	255
7.4.6 在生物和医学上的应用	256
7.4.7 催化材料	258
思考题七	260
参考文献	261

绪 论

一、粉体工程研究的意义和内容

粉体广泛地存在于自然界中,人们对粉体的认识和利用也在不断地扩大。科学飞速发展至近代,几乎所有的工业部门均涉及粉体处理过程。粉体学已经发展成一门跨学科、跨行业的综合性技术学科,其应用遍及材料、冶金、化学工程、矿业、机械、建筑、食品、医药、能源、电子及环境工程等诸多领域。因而研究粉体的目的在于:

(1) 满足提高工业产品质量的需要。粉体的颗粒大小和粒度分布对产品质量影响非常大,如陶瓷粉料的粒度大小和分布直接影响着陶瓷坯体的成型、烧结温度的高低以及产品的孔隙率、密度和强度等;水泥中粗细颗粒的比例、颗粒形状对产品性能有极大的影响;颜料颗粒的大小对被涂敷物体表面的遮盖力影响极大;矿山资源日益贫乏,需要矿粒分离得越来越细;粉体的表面改性如白云母经氧化钛、氧化铬、氧化铁等金属氧化物进行表面改性后,用于化妆品、塑料、橡胶、涂料等,可以大大提高产品的价值。同时随着高技术陶瓷、化工、电子、生物材料及国防、尖端技术发展,对粉体的细度、纯度、活性等要求越来越高,这就需要更高效、更经济的机械及方法的研究。

(2) 节能降耗。传统的粉碎和粉磨作业的能耗占企业总耗电量的 50% 以上,而其中常用的粉磨设备即球磨机的有效能量利用率还不到 5%,其余 95% 以上的能量被浪费掉,因此,研究和设计高效低能量消耗的粉磨机械尤其重要。

(3) 新材料的研究与开发的需要。随着对超硬、超强、超导、超纯、超塑等新材料的需求量越来越大,使材料的性能达到极端参数的状态,具有独特的性能,这往往需要改变材料原有的属性。有时只有使粉体颗粒粒度细化至纳米级后再进行组合才能生产出具有不同性能的新型材料。因而纳米粉体、纳米纤维、纳米晶须以及纳米管的研制和生产是必要的。

粉体物料由无数个颗粒构成,而颗粒是组成物料的最小单元。颗粒的大小、分布、结构形态和表面形态等是影响其他性能的主要因素。工程上将在常态下以较细粉粒状态存在的物料称为粉体物料,简称粉体。构成粉体颗粒的大小,小至只能用电子显微镜才可以看得清的几纳米,大到用肉眼可以看到的数百微米至几十毫米,因而可以将粉体按照粒度大小分为粗粒($10^3 \sim 10^6 \mu\text{m}$)、细粒($10^1 \sim 10^3 \mu\text{m}$)、超细粒($10^{-3} \sim 10^1 \mu\text{m}$)、纳米颗粒(1~100 nm)。而不同粒度的粉体具有不同的性能。因而构成粉体工程学的内容之一是粉体的性能和表征。不同粒度的粉体的制备所采用的有效方法也不同,粗粒粉体一般采用传统的粉碎机来制备,细粒采用粉磨机粉磨而成,超细粒采用超细粉碎机粉碎或粉磨而成,而纳米粉体则采用物理合成(构筑)法和化学合成法。因而构成粉体工程学的内容之二是粉体的制备。为满足不同粒度使用范围的要求,需要对所制得的粉体进行分级,因而构成粉体工程学的内容之三是粉体的分级。

二、粉体工程学的建立和发展

粉体工程学亦称颗粒学,是一门新兴的综合性技术学科。由于其跨学科的交叉性,它既与若干基础学科相毗邻,又与工程应用联系广泛,所以国外从 20 世纪 30 年代开始便逐渐开展

“颗粒学”的研究。最先从事这一研究的是美国学者 J. M. Dallavalle, 在 1943 年, 他出版了世界上第一部颗粒学专著《Micromeritics》。其后, 德国学者 I. R. Meldau 编写了《Handbook of Powder S&T》(1960 年)。随后 Dallavalle 的学生 Orr 又出版了《Particulate Technology》一书(1966 年)。日本学者久保、水渡、中川、早川合编了《粉体理论与应用》(1979 年), 三轮茂雄编著了《粉体工学通论》(1981 年)等。这些论著无疑对于粉体工程的发展起到了很大的推动作用。20 世纪 80 年代以来, 随着世界范围内高新技术的突飞猛进, 新型材料层出不穷, 使得在颗粒学中超细颗粒成为最引人注目的研究课题。材料科学与工程领域高新技术的研发大大推动了颗粒学的发展, 丰富了颗粒学的内容。有关颗粒学中许多课题的研究日益表明, 它已成为新兴产业和高新技术发展的关键。

在国内的 20 世纪六七十年代, 粉体工程这一名词并未出现, 只是出现如破碎、粉碎, 或者破碎与磨矿等词语, 各工业部门的划分一般是以产品的类别为基础的, 各行业只能独立处理各自遇到的粉体技术问题, 如硅酸盐工业部门有陶瓷机械和粉碎机械、水泥机械; 矿业工业部门有破碎与磨矿。由于缺乏交流, 大家认识不到各行业之间在粉体技术方面的共性, 因而在某种程度上阻碍了学科的发展。随着学科的发展, 特别是在边缘学科迅猛发展的促进下, 大家对粉体的认识也得到了升华, 将粉体看成是物质的一种特殊形式, 把各行业在粉体研究中的共性聚合在一起作为一门单独的学科来进行研究, 以指导各行业的产品开发和促进技术的进步, 一门新的学科即粉体工程学就由此诞生了。

若按粉体制备的颗粒粒度大小来划分粉体工程的发展, 可以将国内的粉体工程发展阶段分为: 20 世纪 70 年代前只是传统粉体的破碎与粉磨, 粉碎机械主要是颚式破碎机、旋回破碎机、圆锥破碎机等, 产品粒度为 3~100 mm, 粉磨的产品粒度为 5~60 μm 。80 年代出现了超细粉碎机, 如胶体磨、搅拌磨和气流磨等, 可以将产品粒度降低到 0.5~5 μm 。到 90 年代, 随着高新材料的发展, 要求粉体的形态、粒度、纯度及其相关成分可控, 采用超细粉碎机是达不到这一要求的, 只有采用物理构筑法和化学合成法。物理构筑法与粉碎法相反, 其是通过各元素的原子、分子的聚集和结合来进行纳米颗粒的制备。化学合成法主要是利用液体和气体物系来制备纳米粒子, 最小反应单元是原子、分子。由于这些原子、分子在物系中可以自由地移动, 所以反应的生成物不妨碍反应的继续进行。对于液体、气体物系来说, 微粒是经过原子、分子的聚集操作来制备的, 因而可以控制微粒的粒径、粒形以及粒度分布。

第一章 | 粉体的表征与测量

Chapter One

➔ 1.1 单个颗粒的表征

1.1.1 粒度及其表示方法

颗粒的粒度或粒径即颗粒的大小,用其在空间中所占据的线性尺寸表示。球形颗粒的粒度用直径(particle diameter)表示;非球形颗粒的粒度可用球体、立方体或长方体的代表尺寸表示。其中,用球体的直径表示不规则颗粒的粒度应用得最为普遍,称为当量直径(equivalent diameter)。

常用的当量直径有等体积当量直径和等表面积当量直径。

等体积当量直径(equivalent volume diameter):与颗粒体积相等的球的直径,记为 D_V ,颗粒的体积 $V = \frac{\pi}{6} D_V^3$ 。

等表面积当量直径(equivalent surface diameter):与颗粒等表面积球的直径,记为 D_S ,而颗粒的表面积为 $S = \pi D_S^2$ 。

此外,球的当量直径还有等比表面积当量直径(equivalent specific surface diameter)和等沉降速度当量直径(setting velocity diameter)。

对于外形不规则的颗粒,其粒度还可以用三维尺寸(长 a 、宽 b 、高 c)的算术平均值 $d = \frac{a+b+c}{3}$ 或几何平均值 $d = \sqrt[3]{abc}$ 表示。

对于同一个颗粒,由于采用的表征方法不同,得到的颗粒的粒度也不同。所以,将两个颗粒进行比较的时候要注意,只有相同的表征方法得到的数值才有可比性。另外,还要注意应用的方便性,一般来说,对于粗颗粒的测量采用三维尺寸表征比较方便,而对于细颗粒采用球的当量直径表征更加精确。

1.1.2 颗粒的形状

颗粒的形状与物料的性质之间存在着密切的关系,它对颗粒的许多性质产生影响。例如,粉体的比表面积、流动性、填充性、表面现象、形状的分选操作、化学活性、粉体层对流体运动阻力以及颗粒在流体中的运动阻力等。因此,我们不仅要关注颗粒的粒度,还要关注颗粒的形状。工程上,根据不同的使用目的,对颗粒形状有不同的要求。例如,用作砂轮的研磨料,一方面要求有好的填充结构,另一方面还要求颗粒的形状有棱角;混凝土集料则要求强度高和紧密的填充结构,故碎石以正多面体为理想形状;在选矿工艺中,可以利用不同的矿石在形状上的差异,进行辅助分选,以增加其可选性。

以往对于实际颗粒形状所采用的一些定性的描述,如纤维状、针状、多面体状等,已远不能满足材料科学和工程的发展对颗粒形状定量表征的要求,为此,人们常常采用某个量的数值来表征颗粒的形状,这些量统称为形状因子。

形状因子:能在一定程度上表征颗粒形状对于标准形状(大多取球形)的偏离程度的一种无量纲量,其数值与颗粒形状有关。

常用的形状因子有形状系数和形状指数。

1. 形状系数

(1) 表面积形状系数 φ_s :与某种粒度 d (体积当量直径或其他粒度)相联系的表面积形状系数。 $\varphi_s = \frac{S}{d^2}$, φ_s 与 π 的差别表征颗粒形状对于球形的偏离。对于球体, $\varphi_s = \pi$; 对于立方体, $\varphi_s = 6$ 。

(2) 体积形状系数 φ_v :与某种粒度相联系的体积形状系数。 $\varphi_v = \frac{V}{d^3}$, φ_v 与 $\frac{\pi}{6}$ 的差别表征颗粒形状对于球形的偏离。对于球形, $\varphi_v = \frac{\pi}{6}$; 对于立方体, $\varphi_v = 1$ 。

(3) 比表面积形状系数 φ :表面积形状系数与体积形状系数之比,即 $\varphi = \frac{\varphi_s}{\varphi_v}$,称为比表面积形状系数, φ 与 6 的差别表征颗粒形状对于球形的偏离。对于球体, $\varphi = 6$ 。

几种几何体的形状系数见表 1-1。

表 1-1 几种几何体的形状系数

颗粒形状	φ_s	φ_v	φ
球形 $l=b=h=d$	π	$\pi/6$	6
圆锥形 $l=b=h=d$	0.81π	$\pi/12$	9.7
圆板形 $l=b, h=d$	$3\pi/2$	$\pi/4$	6
$l=b, h=0.5d$	π	$\pi/8$	8
$l=b, h=0.2d$	$7\pi/10$	$\pi/20$	14
$l=b, h=0.1d$	$3\pi/5$	$\pi/40$	24
立方体 $l=b=h$	6	1	6
方柱体 $l=b$			
$h=b$	6	1	6
$h=0.5b$	4	0.5	8
$h=0.2b$	2.8	0.2	14
$h=0.1b$	2.4	0.1	24

2. 形状指数

形状指数与形状系数不同,它与具体物理量无关,对颗粒外形本身,用各种数学式进行表述。

(1) Wadell 球形度 Φ_w :

$$\Phi_w = \frac{\text{与颗粒等体积的球的表面积}}{\text{颗粒的表面积}} = \left(\frac{d_v}{d_s}\right)^2 \quad (1-1)$$

(2) Krumbein 球形度 Φ_k :

$$\Phi_k = \left(\frac{h}{b}\right)\left(\frac{h}{l}\right)^2 \quad (1-2)$$

式中, l 表示长度; b 表示宽度; h 表示高度。

(3) 扁平度 m 和伸长度 n :

$$\text{扁平度 } m = \text{短径/厚度} = b/h; \quad (1-3)$$

$$\text{伸长度 } n = \text{长径/短径} = l/b. \quad (1-4)$$

➔ 1.2 粒度分布

颗粒系统的粒径相等时(如标准粒度),可用单一的粒径表示其大小。这类颗粒称为单粒度体系(monodisperse)。实际上颗粒大都由粒度不等的颗粒组成,这类颗粒称为多粒度体系(polydisperse)。粒径分布(particle diameter distribution),又称粒度分布,是指用简单的表格、绘图和函数形式表示颗粒群粒径的分布状态。

1.2.1 颗粒群粒度的表示方法

粒级:用某种方法(如筛分)将粒度范围的物料分成若干个粒度范围窄的级别,这些级别均称为粒级。各粒级均以其上限粒度(d_1)及下限粒度(d_2)表示,如 $d_1 \sim d_2$ 或 $d_2 - d_1$ 或 $-d_2 + d_1$ 。

粒度组成:上述各粒度按粗细不同的顺序,并指明各粒级占物料总量的质量百分比,称为粒度组成。它描述物料的粒度群的粒度分布情况,见表 1-2。

表 1-2 物料粒度组成

粒级 /mm	质量 /kg	产率		
		各粒级/%	筛上累计/%	筛下累计/%
12~16	22.5	15	15	100
8~12	30.0	20	35	85
4~8	45.0	30	65	65
2~4	22.5	15	80	35
0~2	30.0	20	100	20
合计	150.0	100		

平均粒度:描述物料群的粒度称为平均粒度。对于粒度范围比较窄的物料群(如 $d_1/d_2 < \sqrt{2}$),其平均粒度 $d = (d_1 + d_2)/2$;对于粒度范围较宽的物料群,通常有数个粒级,要用统计学求平均值的方法计算其加权算术平均粒度 d_s ,或加权几何平均粒度 d_j ,或加权平均粒度 d_i :

$$d_s = \frac{\gamma_1 d_1 + \gamma_2 d_2 + \dots + \gamma_n d_n}{\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n} = \frac{\sum \gamma_i d_i}{\sum \gamma_i}, \quad (1-5)$$

$$d_j = (d_1^{\gamma_1} \times d_2^{\gamma_2} \times \dots \times d_n^{\gamma_n})^{\frac{1}{\sum \gamma_i}}, \quad (1-6)$$

$$d_i = \frac{\sum \gamma_i}{\sum (\gamma_i / d_i)}, \quad (1-7)$$

式中, γ_i 是平均粒度为 d_i 的粒级占物料总量的质量百分比。

对同一物料群采用不同的计算方法所得的平均粒度是不同的,一般有 $d_s > d_j > d_i$ 。往往有这种情况,两批散物料的平均粒度相等,但它们各相同粒级的质量百分含量却完全不同。为

了更全面地说明散物料的粒度特性,又引入偏差系数 K 来描述散物料中各粒级的不均匀情况, $K = \delta/d$ 。

式中, δ 为标准差,其值为:

$$\delta = \sqrt{\sum (d_i - d)^2 \cdot \gamma_i / \sum \gamma_i} \quad (1-8)$$

其他符号含义同前。通常认为 $K < 40\%$ 是均匀, $K = 40\% \sim 60\%$ 是较均匀, $K > 60\%$ 是不均匀。

综合利用粒度组成、平均粒度、标准差及偏差表述四种指标,就可以比较全面地描述物料的粒度特性。

1.2.2 频率分布和累积分布

颗粒粒径分布常表示成频率分布和累积分布的形式。频率分布表示各个粒径相对应的颗粒百分含量(微分型);累积分布表示小于(或大于)某粒径的颗粒占全部颗粒的百分含量与该粒径的关系(积分型)。大于某粒径的累积称为正累积,小于某粒径的累积称为负累积。百分含量的基准可用颗粒个数、体积或质量为基准,此外还有以长度和面积为基准的。

表 1-3 分别列出用表格形式表示的颗粒频率分布和累积分布,每种分布都采用了两种基准,即个数基准和质量基准。

表 1-3 颗粒的频率分布和累积分布

粒径/ μm	频率分布/%		累积分布/%			
	质量分数	个数百分数	质量分数		个数百分数	
			大于该粒径范围	小于该粒径范围	大于该粒径范围	小于该粒径范围
<20	6.5	19.5	100.0	6.5	100.0	19.5
20~25	15.8	25.6	93.5	22.3	80.5	45.1
25~30	23.2	24.1	77.7	45.5	54.9	69.2
30~35	23.9	17.2	54.5	69.4	30.8	86.4
35~40	14.3	7.6	30.6	83.7	13.6	94.0
40~45	8.8	3.6	16.3	92.5	6.0	97.6
>45	7.5	2.4	7.5	100.0	2.4	100.0

颗粒粒度的频率分布和累积分布也常表示成图形形式,称为粒度特性曲线,如图 1-1 所示。用图形形式表示粒度分布比较直观。

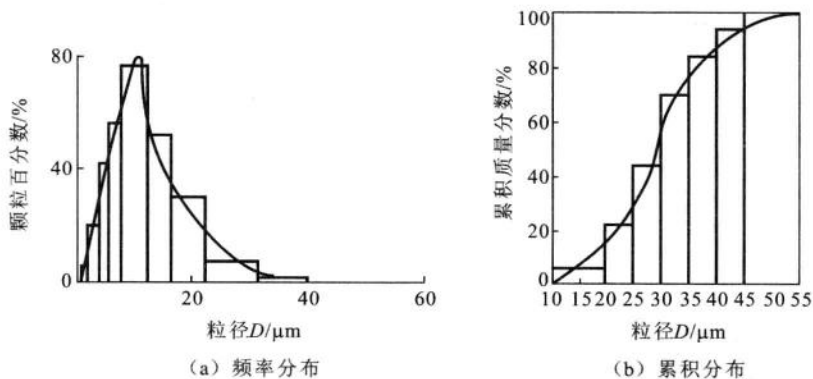


图 1-1 粒度特性曲线

1.2.3 粒度特性曲线和粒度特性方程

粒度特性曲线是以散物料粒度组成为依据绘制的,曲线的横坐标表示粒度,纵坐标表示产率。若纵坐标为粒级产率,则称为部分粒度特性曲线;若纵坐标为累积产率,则称为累积粒度特性曲线,如图 1-2 和图 1-3 所示。

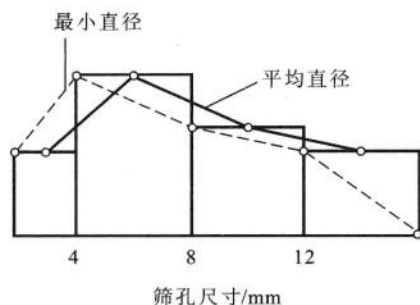


图 1-2 部分粒度特性曲线和柱状图

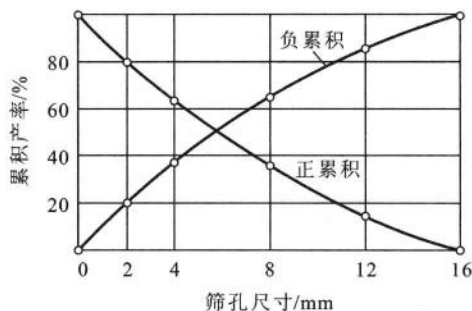


图 1-3 累积粒度特性曲线

累积粒度特性曲线具有如下特点:

- (1) 正负累积特性曲线是互相对称的,若绘制在一张图纸上,它们必交于产率为 50% 的点上。
- (2) 正累积粒度特性曲线必交于纵坐标上产率为 100% 的点;负累积粒度特性曲线必交于纵坐标上产率为 0 的点(坐标原点)。

累积粒度特性曲线有如下用途:

- (1) 可确定任何指定粒度的相应累计产率;或由指定的累计产率查得相应的粒度。
- (2) 可求出任意粒级的产率。
- (3) 由曲线的形状可大致判断物料的粒度组成情况。对于正累积的粒度特性曲线,若曲线呈凹形,表明物料中的细粒级含量多;若曲线呈凸形,说明粗粒级含量多;若曲线近似直线,则表示粗细粒度分布均匀。

对于粒度范围很宽的物料,在绘制其粒度特性曲线时,既要考虑到横轴的比例,又要兼顾到越是接近原点,横坐标的分布点就越密集的特点。为此,必须把曲线绘制在很大的图纸上,为了解决这一问题,可将曲线绘制在半对数或全对数坐标系中。

所谓半对数坐标系,是指把代表粒度的横坐标值取对数。全对数坐标系是把横、纵坐标值均取对数。

粒度特性方程式是研究表述物料群粒度特性的另一种方法,它是由筛分试验得到的数据,经数学方法推理得到的经验公式。

- (1) 高登—安德烈耶夫—舒曼公式:

$$Y = 100 \left(\frac{X}{X_{\max}} \right)^K, \quad (1-9)$$

式中, Y 为负累计产率; X 为与产率对应的物料粒度; X_{\max} 为最大物料粒度,对于一定的物料, X_{\max} 是常数; K 为与物料性质有关的常数,对于一定的物料, K 是常数(一般破碎产物的 K 值常介于 0.7~1.0 之间)。

- (2) 罗逊—拉姆勒公式:

$$R = 100e^{-kx^n} \quad (1-10)$$

式中, R 为正累计产率; X 为与产率 R 对应的物料粒度; b 为与物料粒度大小有关的参数, 对于一定的物料, b 是常数; n 为与物料性质有关的参数, 对于一定的物料, n 是常数; e 为自然对数的底, $e=2.718\ 28$ 。

1.2.4 粒度分析方法

粒度分析是一种技术操作, 它的任务是测定碎散物料的粒度特性。粒度分析的方法有多种, 常用的有以下三种。

(1) 筛分分析法: 此法是利用筛孔大小不同的一系列筛子对散物料筛分, n 层筛子可把物料分成 $(n+1)$ 个粒级, 各粒级的上、下限粒度通常就取相应筛子的筛孔尺寸。筛分分析法广泛应用于测定 $0.04\sim 100\ \text{mm}$ 散物料的粒度组成。筛分分析法的特点是设备简单, 易于操作, 但筛分结果受颗粒形状和筛分时间的影响较大。

(2) 水力沉降分析法: 此法是利用水力分析装置, 根据不同粒度的颗粒在水介质中沉降速度不同而分成若干粒级。该法适用于测定 $1\sim 75\ \mu\text{m}$ 细颗粒物料的粒度组成, 其特点是不像筛分分析法那样严格按颗粒的几何尺寸分级, 而是按沉降速度分级。因水力沉降过程受颗粒密度和形状的影响, 密度大的小颗粒与密度小的大颗粒可能进入同一粒级。

(3) 显微镜分析法: 此法是利用显微镜观察细颗粒的大小和形状, 适用于 $0.1\sim 50\ \mu\text{m}$ 的物料, 可检查分级产品或校正水力沉降分析结果, 也可以研究物料的结构, 其主要特点是直观。

1.3 颗粒粒度的测量

颗粒粒度和形状能显著地影响粉体及其产品的性质和用途。因此, 对粒度和形状的测量日益受到人们的重视。随着纳米材料的发展, 人们对粒度测量提出了更高的要求。

20 世纪以来, 已经发展了多种粒度测量的方法, 这些方法在实践中不断得到改进和完善。表 1-4 列出了测量颗粒粒度的主要方法。

表 1-4 常用粒度测量方法

方 法	大致粒度范围 $/\mu\text{m}$	测量依据的性质或效率	粒度的表示
筛分分析 (微目筛)	>40 $(5\sim 40)$	筛 孔	d
光学显微镜 电子显微镜 全息照相	$0.25\sim 250$ $0.001\sim 5$ $2\sim 500$	通常是颗粒投影像的某种尺寸或某种相当尺寸	d_a 、 d_F 、 d_M 等
激光: 光散射、消光 X 光小角散射	$0.002\sim 2\ 000$ $0.005\sim 0.1$	颗粒对光的散射或消光颗粒对 X 光的散射	同效应的球直径
重力沉降 离心沉降	$2\sim 100$ $0.01\sim 10$	沉降效应: 沉积量, 悬浮液的浓度、密度或消光等随时间或位置的变化	同沉降速度的球直径, 在层流区即 d_{s1}
电传感法	$0.4\sim 800$	颗粒在小孔电阻传感区引起的电阻变化	体积直径 d_v , 但常为同效应的球直径
气体透过滤 常压粘滞流 常压滑动流 气体吸附	$2\sim 50$ $0.05\sim 2$ <10	床层中颗粒对气流的阻力气体分子在颗粒表面的吸附	$d_{sv} = \frac{6}{S_V}$

1.3.1 筛分分析

1. 筛分工具

标准筛：标准筛是一套筛孔尺寸大小有一定比例的、筛孔边长及筛丝直径均按有关标准制造的筛子。使用时将各个筛子按筛孔大小从上至下的顺序叠放，上层筛孔大，下层筛孔小。各筛子所处的层位称为筛序。每两个相邻筛子筛孔尺寸的比值称为筛比。有的标准筛确定一系列筛子中的某个筛子作为基准筛，简称基筛。标准筛都有筛底和筛盖，分别用来收集筛下产品和防止物料溅失。

表 1-5 常见标准筛制

泰勒筛		国际筛	上海筛		苏联筛		英国筛		德国筛	
网目 (孔/英寸)	孔径 /mm	孔径 /mm	网目 (孔/英寸)	孔径 /mm	筛孔尺寸 /mm	筛丝直径 /mm	网目 (孔/英寸)	孔径 /mm	网目 (孔/英寸)	孔径 /mm
2.5	7.925	8								
3	6.68	6.3								
3.5	5.691									
4	4.699	5	4	5						
5	3.962	4	5	4			5	3.34		
6	3.327	3.35	6	3.52			6	2.81		
7	2.794	2.8					7	2.41		
8	2.262	2.36	8	2.616	2.5	0.5	8	2.05		
9	1.981	2			2.0	0.5				
10	1.651	1.6	10	1.98	1.6	0.45	10	1.67	4	1.5
12	1.397	1.4	12	1.66	1.25	0.40	12	1.40	5	1.2
14	1.168	1.18	14	1.43	1.00	0.35	14	1.20	6	1.02
16	0.991	1	16	1.27	0.900	0.35	16	1.00		
20	0.833	0.8	20	0.995	0.800	0.30	18	0.85		
24	0.701	0.71	24	0.823	0.700	0.30	22	0.70	8	0.75
28	0.589	0.6	28	0.674	0.630	0.25	25	0.60	10	0.6
32	0.495	0.5	32	0.56	0.560	0.23	30	0.50	11	0.54
35	0.417	0.4	34	0.533	0.500	0.22	36	0.42	12	0.49
42	0.351	0.355	42	0.452	0.450	0.18	44	0.35	14	0.43
48	0.295	0.30	48	0.376	0.355	0.15	52	0.30	16	0.385
60	0.246	0.25	60	0.295	0.250	0.13	60	0.252	20	0.30
65	0.208	0.20	70	0.251	0.200	0.13	72	0.211	24	0.25
80	0.175	0.18	80	0.20	0.180	0.13	85	0.177	30	0.20
100	0.147	0.15	110	0.139	0.140	0.09	100	0.152	40	0.15
115	0.124	0.125	120	0.13	0.125	0.09	120	0.125	50	0.12
150	0.104	0.1	160	0.097	0.100	0.07	150	0.105	60	0.10
170	0.083	0.09	180	0.09	0.090	0.07	170	0.088	70	0.088
200	0.074	0.075	200	0.077	0.071	0.055	200	0.075	80	0.075
230	0.062	0.063	230	0.065	0.063	0.045	240	0.065	100	0.06
270	0.053	0.05	280	0.056	0.056	0.04				
325	0.043	0.04	320	0.05	0.040	0.03	300	0.053		
400	0.038									