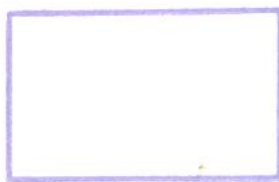
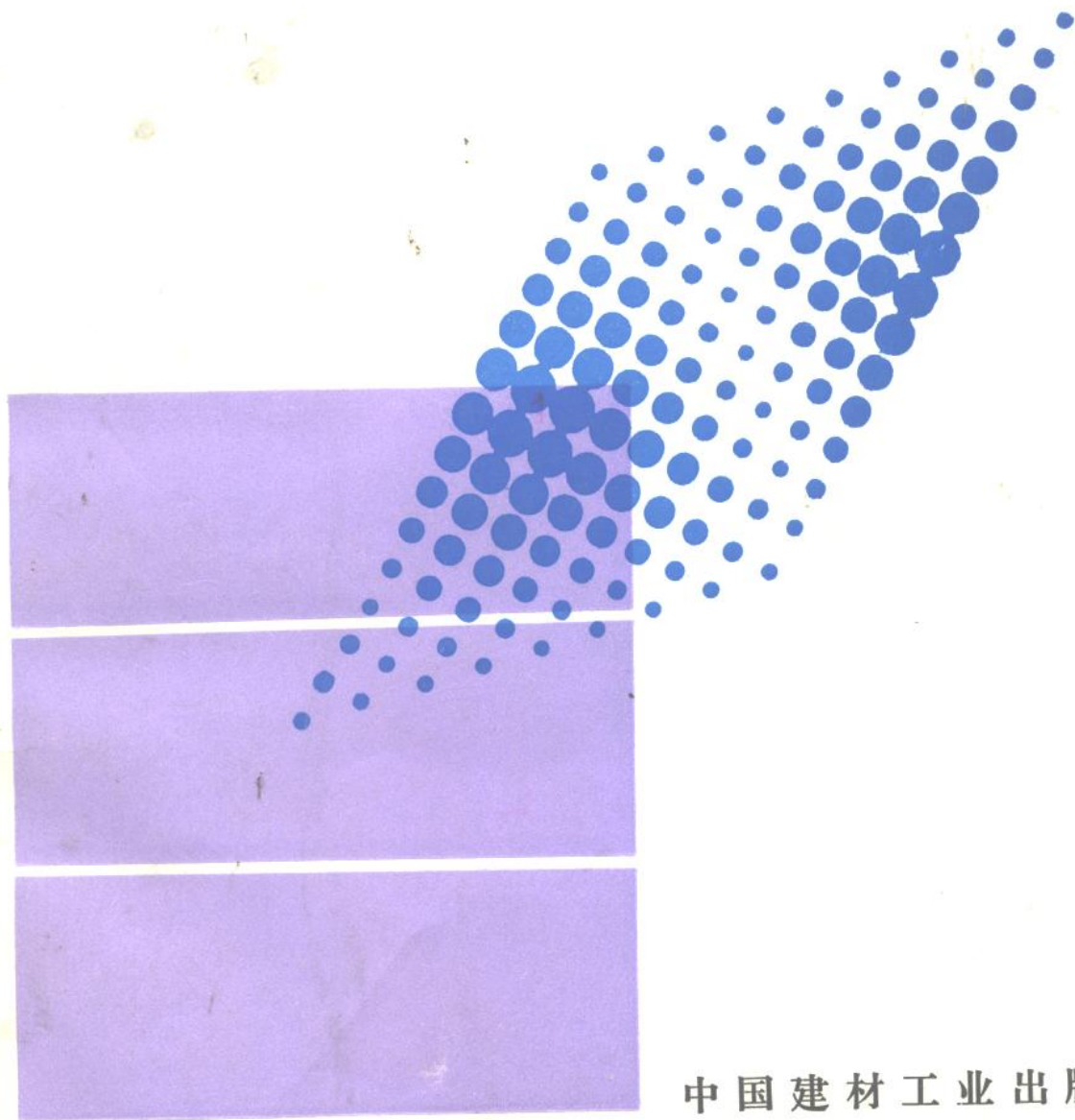


# 粉体工程



张少明 翟旭东 刘亚云 编著



中国建材工业出版社

71.307  
551  
C12

# 粉 体 工 程

张少明 翟旭东 刘亚云

2007/15

中国建材工业出版社

(京)新登字 177 号

## 内容提要

《粉体工程》是以粉体物料为对象,研究其性质,加工处理技术的一门工程科学,全书共分八章。主要内容包括粉粒体的基本性质、粉碎过程的基本理论和设备、分离的基本理论及单元操作、分级原理及设备、均化机理和装置、储存装置及仓内物料流动理论、粉体的输送以及粒化等。

该书可供从事冶金、矿山、化工、食品、医药、建材、轻工、生物工程、耐火材料等行业的生产、设计研究工程技术人员参考,亦可作为本科生、研究生的教材和参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

粉体工程/张少明等编著.-北京:中国建材工业出版社,1994.8

ISBN 7-80090-317-6

I. 粉… II. 张… III. ①粒状物料②粉末技术 IV. TB44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (94) 第 10123 号

### 粉体工程

张少明 翟旭东 刘亚云

\*

中国建材工业出版社出版

(北京百万庄国家建材局内 邮政编码:100831)

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京 魏易印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:430千字

1994年8月第1版 1994年8月第1次印刷

印数:1-1000册

定价:22.00元

## 序 言

粉本工程是一门新兴的跨行业的学科。它是以颗粒和粉状物料为对象,研究其性质及加工、处理技术的一门学科。许多工业部门如冶金、水泥、陶瓷、化工、石油、食品、医药、涂料、轻工、航空航天、生物工程等生产过程都直接或间接地运用这一学科知识。大量的工业产品或中间产品都是粉粒状。如航空航天火箭燃料、塑料、橡胶的填料、无机膜材料、造纸的填料、涂料染料、颜料、粉末冶金用金属粉、化妆品、医药用粉、水泥、瓷釉粉等等。

粉体工程学的新理论、新技术,将使很多工业发生根本性的变化,如流体和颗粒组成的两相流的运动规律是当今采用最广泛的化学反应器——流化床的理论基础,并应用于输送、气固分离、热交换、气力均化等。

微细颗粒及超细颗粒的光、电、磁、热等特性发生了奇特的变化。人们正逐步利用这些特点来服务于人类。如医药中的颗粒微细化使疗效大大提高,涂料、染料中微细而均匀的颗粒,使色泽艳丽,陶瓷的超细。

微粉可明显改善烧成性能和质量,火箭的固体燃料超细化可以提高火箭的推力,微细和超微细颗粒正越来越广泛地用来制造无机膜,催化剂的超细化可以大大提高反应速率,电子行业中用超细微粉作为线路布线和墨水材料可提高布线精度。

有害的粉尘,危害人类的健康,污染生活和工作环境。人们为了防止公害,必须对气固分离技术进行研究。

总之,粉体工程科学正处在一个蓬勃发展的新时期。为了我国科学技术的发展,促进粉体工程的理论和应用研究,我们编写《粉体工程》一书,以供广大科技人员参考。本书在正式出版前,已作为本科生教材,这次出版又作了较大的修改和补充。

参加本书编写的有张少明(编第二章、第三章、第四章、第七章和第八章),刘亚云(编写第一章和第六章),瞿旭东(编写第五章)。

本书出版,得到了王开国、周林生、高志刚、王华业、陆庆权等同志的大力支持。

由于编著者水平有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

张少明 刘亚云 瞿旭东

# 目 录

§ 1 粉体的基本性质	(1)
§ 1-1 粒 径	(1)
§ 1-1-1 单个颗粒的单一粒径	(1)
§ 1-1-2 颗粒群的平均径	(1)
§ 1-2 粒度分布	(4)
§ 1-2-1 粒度分布的表示方式	(5)
§ 1-2-2 粒度分布的表达形式	(6)
§ 1-3 颗粒形状	(10)
§ 1-3-1 形状指数	(11)
§ 1-3-2 形状系数	(12)
§ 1-3-3 粗糙度系数	(14)
§ 1-4 颗粒群的堆积性质	(14)
§ 1-4-1 空隙率	(14)
§ 1-4-2 容积密度	(17)
§ 1-5 粉体的摩擦性质	(17)
§ 1-5-1 休止角	(17)
§ 1-5-2 内摩擦角	(19)
§ 1-5-3 壁摩擦角与滑动角	(20)
§ 2 粉 碎	(22)
§ 2-1 概 述	(22)
§ 2-1-1 定义与意义	(22)
§ 2-1-2 方法与分类	(22)
§ 2-1-3 粉碎比	(23)
§ 2-2 粉碎理论概述	(24)
§ 2-2-1 裂缝与断裂的基本理论	(24)
§ 2-2-2 粉碎功定律	(25)
§ 2-2-3 物料停留时间的分布	(26)
§ 2-2-4 粉磨过程的速度分布	(26)
§ 2-2-5 粉碎力	(29)
§ 2-2-6 选择和断裂两函数的概念	(31)
§ 2-3 破碎设备	(33)
§ 2-3-1 鄂式破碎机	(33)
§ 2-3-2 圆锥破碎机	(41)
§ 2-3-3 辊式破碎机	(46)

§ 2-3-4	锤式破碎机	(50)
§ 2-3-5	反击式破碎机	(52)
§ 2-3-6	轮碾机	(55)
§ 2-3-7	笼式粉碎机	(57)
§ 2-4	球磨机	(58)
§ 2-4-1	球磨机的工作原理、特点及类型	(58)
§ 2-4-2	球磨机的构造概述	(60)
§ 2-4-3	研磨体运动分析	(62)
§ 2-4-4	球磨机主要参数的确定	(66)
§ 2-5	其他型式的磨机	(72)
§ 2-5-1	无介质磨	(72)
§ 2-5-2	辊式磨	(73)
§ 2-5-3	康比丹磨	(74)
§ 2-5-4	辊压磨	(75)
§ 2-6	超细粉磨设备	(75)
§ 2-6-1	冲击式超细粉碎设备	(76)
§ 2-6-2	振动磨	(78)
§ 2-6-3	搅拌磨	(79)
§ 3	分 离	(80)
§ 3-1	概 述	(80)
§ 3-2	分离效率	(80)
§ 3-2-1	总分离效率	(80)
§ 3-2-2	分级分离效率	(81)
§ 3-2-3	分级分离效率与总分离效率的关系	(82)
§ 3-3	气固系统的分离	(83)
§ 3-3-1	分离过程	(84)
§ 3-3-2	分离器内各区域的划分	(84)
§ 3-4	重力分离器	(85)
§ 3-4-1	重力沉降原理与沉降速度	(85)
§ 3-4-2	阻力系数	(86)
§ 3-4-3	沉降速度的计算	(88)
§ 3-4-4	沉降速度的讨论	(90)
§ 3-4-5	重力分离器(降尘室)	(94)
§ 3-5	离心式分离器	(95)
§ 3-5-1	概 述	(95)
§ 3-5-2	离心分离器的特点及类型	(95)
§ 3-5-3	旋风分离器的工作原理及流场分析	(96)
§ 3-5-4	旋风分离器捕集分离的临界粒径——捕集分离机理	(99)
§ 3-5-5	含尘气流的压力损失	(103)
§ 3-5-6	旋风分离器的分离效率	(105)

§ 3-5-7	旋风分离器的选型计算 .....	(108)
§ 3-5-8	旋风分离器的优选与评价 .....	(108)
§ 3-6	过滤式分离器 .....	(108)
§ 3-6-1	颗粒层除尘器 .....	(108)
§ 3-6-2	袋式除尘器 .....	(111)
§ 3-7	电除尘器 .....	(119)
§ 3-7-1	概 述 .....	(119)
§ 3-7-2	电除尘器的工作原理、构造及类型 .....	(120)
§ 3-7-3	主要参数的计算与选型 .....	(124)
§ 3-7-4	影响除尘效率的因素 .....	(127)
§ 3-7-5	新型电除尘器 .....	(130)
§ 3-8	液固系统的分离 .....	(131)
§ 3-8-1	凝聚原理及应用 .....	(131)
§ 3-8-2	液固分离的类型及原理 .....	(133)
§ 3-9	磁性分离 .....	(140)
§ 3-9-1	磁性分离原理 .....	(140)
§ 3-9-2	干式磁性分离设备 .....	(141)
§ 3-9-3	湿式磁性分离设备 .....	(142)
§ 4	分 级 .....	(144)
§ 4-1	概 述 .....	(144)
§ 4-1-1	定义与意义 .....	(144)
§ 4-1-2	分级效率 .....	(144)
§ 4-2	固体颗粒的机械分级 .....	(145)
§ 4-2-1	概 述 .....	(145)
§ 4-2-2	筛分机理 .....	(146)
§ 4-2-3	筛分设备 .....	(148)
§ 4-3	颗粒流体系统分级设备 .....	(149)
§ 4-3-1	重力式分级机 .....	(149)
§ 4-3-2	粗分级机 .....	(149)
§ 4-3-3	离心式分级机 .....	(150)
§ 4-3-4	旋风式分级机 .....	(153)
§ 4-3-5	湿式分级设备——弧形筛 .....	(154)
§ 4-3-6	其他新型分级机 .....	(155)
§ 4-4	超细粉分级设备 .....	(157)
§ 4-4-1	干法超细粉分级 .....	(157)
§ 4-4-2	湿法超细粉分级 .....	(160)
§ 5	均 化 .....	(162)
§ 5-1	概 述 .....	(162)
§ 5-2	均化的原理 .....	(162)
§ 5-2-1	均化过程机理 .....	(162)

§ 5-2-2	均化过程 .....	(163)
§ 5-2-3	影响均化的因素 .....	(163)
§ 5-3	评价均化效果的理论 .....	(164)
§ 5-3-1	样品的合格率 .....	(164)
§ 5-3-2	标准偏差的含义及应用 .....	(165)
§ 5-3-3	均化程度 .....	(166)
§ 5-4	粉体均化设备 .....	(167)
§ 5-4-1	机械均化设备 .....	(167)
§ 5-4-2	气力均化设备 .....	(173)
§ 5-5	塑性体捏和设备 .....	(175)
§ 5-5-1	真空练泥机的构造和工作原理 .....	(175)
§ 5-5-2	泥料在真空练泥机内的运动 .....	(176)
§ 5-5-3	真空练泥机的主要工作参数 .....	(177)
§ 6	贮存 .....	(180)
§ 6-1	物料贮存的分类与作用 .....	(180)
§ 6-1-1	物料贮存的分类 .....	(180)
§ 6-1-2	物料贮存的作用 .....	(180)
§ 6-2	粉体层静力学基本知识 .....	(181)
§ 6-2-1	应力和应力平衡 .....	(181)
§ 6-2-2	极限应力状态 .....	(185)
§ 6-2-3	粉体压力和压力分布 .....	(188)
§ 6-3	仓内粉体的重力流动 .....	(190)
§ 6-3-1	孔口流出 .....	(190)
§ 6-3-2	仓内粉体重力流动状态和型式 .....	(191)
§ 6-3-3	仓内粉体的重力流动性 .....	(192)
§ 6-3-4	仓内粉体的流动条件 .....	(196)
§ 6-4	整体流料仓的设计计算 .....	(197)
§ 6-4-1	料仓容量 .....	(197)
§ 6-4-2	料斗锥面倾角与锥面夹角 .....	(198)
§ 6-4-3	料仓卸料口径 .....	(198)
§ 6-5	偏析及其防止措施 .....	(198)
§ 6-5-1	粒度偏析类型与机理 .....	(199)
§ 6-5-2	偏析防止措施 .....	(200)
§ 6-6	粉体拱及其防止措施 .....	(201)
§ 6-6-1	粉体静态拱的类型 .....	(201)
§ 6-6-2	结拱防止措施 .....	(201)
§ 6-7	料位测定及类型 .....	(205)
§ 6-7-1	电容式料位计 .....	(205)
§ 6-7-2	回转翼轮式料位计 .....	(205)
§ 6-7-3	重锤式料位计 .....	(206)



§ 6-7-4	γ 射线料位计 .....	(206)
§ 6-7-5	重量料位计 .....	(207)
§ 7	输送与加料 .....	(208)
§ 7-1	气力输送系统理装置的类型 .....	(208)
§ 7-1-1	空气输送斜槽 .....	(209)
§ 7-1-2	螺旋式气力输送泵 .....	(212)
§ 7-1-3	仓式气力输送泵 .....	(213)
§ 7-1-4	气力提升泵 .....	(215)
§ 7-1-5	喷射泵 .....	(217)
§ 7-1-6	柱塞式气力输送装置 .....	(217)
§ 7-2	气力输送系统的设计计算 .....	(219)
§ 7-2-1	空气消耗量的确定 .....	(219)
§ 7-2-2	输送管道直径的确定 .....	(220)
§ 7-2-3	总压力损失计算 .....	(220)
§ 7-2-4	长距离气力输送 .....	(224)
§ 7-3	连续式气力输送 .....	(225)
§ 7-3-1	带式输送机 .....	(225)
§ 7-3-2	螺旋输送机 .....	(235)
§ 7-3-3	埋刮板输送机 .....	(238)
§ 7-3-4	斗式提升机 .....	(240)
§ 7-3-5	振动输送机 .....	(245)
§ 7-4	间歇式输送机械 .....	(246)
§ 7-5	供料机械 .....	(246)
§ 7-5-1	概 述 .....	(246)
§ 7-5-2	带式供料机 .....	(247)
§ 7-5-3	板式供料机 .....	(247)
§ 7-5-4	螺旋式供料机 .....	(247)
§ 7-5-5	摇摆式供料机 .....	(247)
§ 7-5-6	叶轮供料机 .....	(248)
§ 7-5-7	电磁振动供料机 .....	(249)
§ 8	粒 化 .....	(256)
§ 8-1	粒化过程 .....	(256)
§ 8-1-1	球粒形成 .....	(256)
§ 8-1-2	球粒长大 .....	(256)
§ 8-1-3	球粒紧密 .....	(257)
§ 8-2	水分的形态与作用 .....	(257)
§ 8-2-1	吸附水 .....	(257)
§ 8-2-2	薄膜水 .....	(258)
§ 8-2-3	毛细管水 .....	(258)
§ 8-2-4	重力水 .....	(259)

§ 8-2-5 粒化指数 .....	(259)
§ 8-3 链接机理 .....	(260)
§ 8-3-1 粉粒间的链接作用 .....	(260)
§ 8-3-2 链接的强度理论 .....	(261)
§ 8-4 粉料特性和粘结剂对粒化的影响 .....	(264)
§ 8-4-1 粉料的表面性质和粒度分布 .....	(264)
§ 8-4-2 粘结剂 .....	(264)
§ 8-5 粒化方法及设备 .....	(265)
§ 8-5-1 圆盘粒化机 .....	(265)
§ 8-5-2 其他造粒方法 .....	(267)

## § 1 粉体的基本性质

粉体是粉体工程学研究的基本对象。工业生产单元操作过程中所处理的物料,因其物质种类千差万别,粒子的形成方式不同,所以其各种性质也不相同。而这些性质与有关的单元操作过程密切相关,直接影响这些过程的正常进行,且直接影响原料、半成品及成品的质量。因此,在研究粉体工程学所涉及的各个单元操作过程前,必须对粉体的基本性质有所了解。

粉体的基本性质通常分成三个方面,即:(1)粉体的几何形态性质。包括粉体粒子的大小、粒度分布、粒子形状以及堆积状态等。(2)粉体的力学性质。力学性质又分为静力学性质和动力学性质。包括粉体的摩擦角、粉体压力、流动性以及在流体中的运动性质等。(3)粉体的其他物理化学性质。包括粉体的电、磁、光、声、热学性质,以及粘附性、吸附性、凝聚性、湿润性、爆炸性等。本章仅就本书所涉及的各有关单元操作过程,介绍主要的共性的粉体基本性质,其他的粉体性质,将结合具体的单元操作过程分别加以介绍。

### § 1-1 粒 径

粒径是用来表示粉体颗粒尺寸大小的几何参数,它是粉体诸性质中最重要和最基本的。粒径又称粒度。粒径的定义和表示方法由于颗粒的形状、大小和组成的不同而不同,同时,又与颗粒的形成过程、测试方法和工业用途有密切联系。通常将粒径分为单个颗粒的单一粒径和颗粒群体的平均粒径。

#### § 1-1-1 单个颗粒的单一粒径

对于单一的球形颗粒,其直径即为粒径。但对于大多数情况中的非球形单颗粒,可由该颗粒不同方向上的不同尺寸按照一定的计算方法加以平均,得到单颗粒的平均直径,或是以在同一物理现象中与之有相同效果的球形颗粒直径来表示,即等效粒径,或叫当量径。

当对一个颗粒作三维测量时,设有一最小体积的直方体(其三维尺寸如图 1-1 所示)恰好包围住颗粒,则根据这个外接直方体的尺寸,单颗粒的平均粒径的各种计算方法列于表 1-1 中。表中还同时列出了几种常用的等效粒径计算公式。

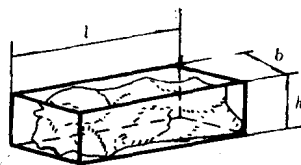


图 1-1 颗粒的外接直方体

#### § 1-1-2 颗粒群的平均径

实际生产过程中所处理的粉体是由许多粒径大小不一的颗粒组成的分散系统。若已知粒径为  $d$  的颗粒个数为  $n$ ,或质量比率为  $W$ ,则颗粒群的平均粒径按个数基准和质量基准的计算公式列于表 1-2 中。

表 1-1 单一粒径的计算方法

名 称	计算公式	名 称	计算公式
长 轴 径	$l$	表面积平均径	$(2lb+2bh+2hl)/6$
短 轴 径	$b$	体面积平均径	$3bh/(lb+bh+hl)$
二轴算术平均径	$(l+b)/2$	等体积立方体当量径	$V^{1/3}$
三轴算术平均径	$(l+b+h)/3$	等体积球体当量径	$(6V/\pi)^{1/3}$
二轴几何平均径	$(lb)^{1/2}$	投影圆当量径	$(4A/\pi)^{0.5}$
三轴几何平均径	$(lbh)^{1/3}$	等表面积球当量径	$(s/\pi)^{0.5}$
二轴调和平均径	$2/[(1/l)+(1/b)]$	等沉降速度球当量径 (斯托克斯粒径)	$[18\mu u_0/(\rho_p-\rho)g]$
三轴调和平均径	$3/(1/l)+(1/b)+(1/h)$		

注:  $V$ —颗粒体积;  $A$ —颗粒投影面积;  $S$ —颗粒表面积;  $\mu$ —流体粘度;  $u_0$ —颗粒沉降速度;  $\rho_p$ —颗粒密度;  $\rho$ —流体密度;  $g$ —重力加速度。

表 1-2 平均粒径的计算方法

名 称		计 算 公 式	
		个 数 基 准	质 量 基 准
加 权 径	个数(算术)平均粒径 $d_1(da)$	$\frac{\sum(nd)}{\sum n}$	$\frac{\sum(W/d^2)}{\sum(W/d^3)}$
	长度平均径 $d_2$	$\frac{\sum(nd^2)}{\sum(nd)}$	$\frac{\sum(W/d)}{\sum(W/d^2)}$
	面积平均径 $d_3$	$\frac{\sum(nd^3)}{\sum(nd^2)}$	$\frac{\sum W}{\sum(W/d)}$
	体积(质量)平均径 $d_4(dm)$	$\frac{\sum(nd^4)}{\sum(nd^3)}$	$\frac{\sum(Wd)}{\sum W}$
平均表面积径 $d_s$		$\frac{\sum(nd^2)}{\sum(n)}$	$\frac{\sum(W/d)}{\sum(W/d^3)}$
平均体积径 $d_v$		$\frac{\sum(nd^3)}{\sum n}$	$\frac{\sum W}{\sum(W/d^3)}$
几何平均径 $d_g$		$\frac{\sum(n \ln d)}{\sum n}$	$\frac{\sum[(W/d^3) \ln d]}{\sum(W/d^3)}$
调和平均径 $d_h$		$\frac{\sum n}{\sum(n/d)}$	$\frac{\sum(W/d^3)}{\sum(W/d^4)}$
比表面积径 $d_s$		$\phi/S_v$	$\phi/\rho_p S_m$
中位径 $d_{50}$		粒度分布的累积值为 50% 时的粒径	
多数径 $d_{mod}$		粒度分布中含量最高的粒径	

注:  $d_s$  物理意义见“颗粒形状”一节;  $d_{50}$ ,  $d_{mod}$  物理意义见“粒度分布”一节。

若颗粒较粗的话(一般1~20mm),则平均粒径 $d$ 可按下式计算,由:

$$m = n \times \frac{\pi}{6} \times (d)^3 \times \rho_p$$

由

$$d = \sqrt[3]{\frac{6m}{n\pi\rho_p}} = 1.24 \sqrt[3]{\frac{m}{n\rho_p}} \quad (1-1)$$

式中 $m$ 为颗粒群总质量; $n$ 为颗粒数,一般 $n \geq 200$ 粒; $\rho_p$ 为颗粒密度。

上表中个数基准和质量基准的平均粒径换算公式为

$$\left\{ \frac{\sum (nd^q)}{\sum (nd^r)} \right\}^{\frac{1}{r-q}} = \left\{ \frac{\sum (wd^{q-3})}{\sum (wd^{r-3})} \right\}^{\frac{1}{r-q}} \quad (1-2)$$

应当指出的是:上述单一粒径和平均粒径的计算是为着不同的实际单元操作过程或某一粉体研究需要服务的,譬如一些平均粒径所适用的有关物理化学过程见表1-3。

表 1-3 不同物理化学过程所采用的平均粒径

符 号	平均粒径名称	适用的机械、物理、化学过程
$d_3$	算术平均径	蒸发、各种尺寸的比较(筛分析)
$d_{vs}$	体面积平均径	传质、反应、粒子充填层的流体阻力
$d_m$	质量平均径	气力输送、质量效率、燃烧、物料平衡
$d_s$	平均面积径	吸收、粉磨
$d_D$	平均体积径	光的散射、喷射的质量分布比较、破碎
$d_s$	比表面积径	蒸发、分子扩散
$d_{50}$	中位径	分离、分级装置性能表示
$d_u$	Stokes 粒径	气力输送、沉降分析

由于日常生活和生产过程所见到的颗粒状物质的粒度范围相差很大(图1-2),需要采用不同的粒度测定方法(表1-4),所得原始数据也不相同,用这些原始数据计算平均粒径必然会得出不同结果,即使同一原始数据,若采用不同的计算方法,所得结果也会相去甚远。因此,在进行平均粒径的具体计算时,首先要根据具体的生产单元操作过程和粒度范围、粒度应用目的等选择颗粒在过程中最有代表性的粒度测定方法和计算方法,否则会得出不正确的或是完全错误的结果。例如:对于分离操作系统的颗粒,最好选用重力沉降或离心沉降方法测定颗粒的斯托克斯(Stokes)粒径,即等沉降速度球当量径。



粒子占颗粒群总量的百分数。显然,若颗粒群总量分别用个数和质量表示的话,则粒度分布相应有个数基准和质量基准两种。同一种颗粒群,不同基准的粒度分布差别甚大。工业上一般采用质量基准。

### § 1-2-1 粒度分布的表示方式

按照粒度分布与粒度  $d$  的函数关系,通常将粒度分布分成频率与累积分布两种,后者又有筛上与筛下两种累积分布,即:

$$\text{频率分布} \quad f = f_1(d) \quad (1-3)$$

$$\text{筛上累积分布} \quad R = f_2(d) \quad (1-4)$$

$$\text{筛下累积分布} \quad D = f_3(d) \quad (1-5)$$

下面分别叙述之。

1. 频率分布,设粒级范围为  $\Delta d$ (平均粒径为  $d_i$  可近似由算术平均径求得)内的颗粒质量占颗粒群总质量  $W$  的百分数为  $\Delta W_i$ ,则  $(W_i/W)/\Delta d$  为频率  $f(\%/ \Delta d)$ 。表 1-5 为一频率分布示例。通常取各粒级的  $\Delta d$  相等。频率分布能比较直观地表示颗粒的组成特性。但若改变  $\Delta d$ ,则会得到不同的频率分布。

表 1-5 频率分布

粒级 ( $\mu\text{m}$ )	平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	质量频率 ( $\%/ \Delta d$ )	个数频率 ( $\%/ \Delta d$ )	粒级 ( $\mu\text{m}$ )	平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	质量频率 ( $\%/ \Delta d$ )	个数频率 ( $\%/ \Delta d$ )
<20	~10	6.5	19.5	35~40	37.5	14.3	7.6
20~25	22.5	15.8	25.6	40~45	42.5	8.8	3.6
25~30	27.5	23.2	24.1	>45		7.5	2.4
30~35	32.5	23.9	17.2				

2. 累积分布,用大于或小于某一粒径  $d$  的颗粒质量  $\Sigma W_i$  占颗粒群总质量  $W$  的百分数来表示筛余累积百分数( $R, \%$ )或筛下累积百分数( $D, \%$ )。表 1-6 为一累积分布的例子。显然,  $D = 1 - R\%$ 。

表 1-6 累积分布

粒级 ( $\mu\text{m}$ )	质量累积 (%)		个数累积 (%)	
	$R(\%)$	$D(\%)$	$R(\%)$	$D(\%)$
<20	100.0	6.5	100.0	19.5
20~25	93.5	22.3	80.5	45.1
25~30	77.7	45.5	54.9	69.2
30~35	54.5	69.4	30.8	86.4
35~40	30.6	83.4	13.6	94.0
40~45	16.3	92.5	6.0	97.6
>45	7.5	100.0	2.4	100.0

注:在进行累积分布计算时,通常  $R$  值对应于粒级的下限, $D$  值对应于粒级的上限。

工业中多习惯采用筛余累积的表示方法,如在粉磨作业中,由筛余累积分布的测定可知还

有多少物料未达到合格产品细度而仍为粗粉。

### § 1-2-2 粒度分布的表达形式

粒度分布数据有三种表达形式,即:粒度表格、粒度分布曲线和粒度分布方程。

#### 1. 粒度表格

多用于筛析法测定粒度分布的数据纪录中,是表示粒度分布的最简单的形式,也是粒度分布其他两种形式的原始形式,如表 1-5 与 1-6 所示。

#### 2. 粒度分布曲线

为了更直观方便地反映和比较颗粒组成特性,通常更多地是采用作图法来绘制粒度分布曲线。作图法分为直方图法和曲线图法。对应前述的频率分布和累积分布,粒度分布曲线也分成两种。现举例说明。表 1-7 为由长石粉料的筛析数据制得的累积分布粒度表格。由此绘制出筛余和筛下累积分布曲线,如图 1-3 所示。同样根据频率分布粒度表格亦可绘制出频率分布图(图 1-4)。但往往筛析法所使用的套筛并不能将颗粒群分成相等  $\Delta d$  的粒级,使用中甚感不便,所以,实用中常常是由累积分布曲线换算得到频率分布曲线。

表 1-7 长石粉料的筛析粒度表格

筛目 (孔/m)	孔径 (mm)	筛上物 (g)	筛上物累积 (g)	R(%)	D(%)
+28	0.63	0.25	0.25	0.2	99.8
+35	0.50	7.00	7.25	5.8	94.2
+45	0.40	11.27	18.52	14.8	85.2
+55	0.32	15.77	34.29	27.4	72.6
+75	0.20	24.86	59.15	47.3	52.7
+120	0.13	48.60	107.75	86.2	13.8
-120		17.25	125.00	100.0	0

表 1-8 长石粉料的频率分布

粒度 (mm)	平均粒度 (mm)	Wi (%/0.05mm)	粒度 (mm)	平均粒度 (mm)	Wi (%/0.05mm)
0	0.025	0	0.40	0.425	5.5
0.05	0.075	3	0.45	0.475	4.5
0.10	0.125	8	0.50	0.525	3.5
0.15	0.175	15	0.55	0.575	3
0.20	0.225	20.5	0.60	0.625	2.5
0.25	0.275	15.5	0.65		
0.30	0.325	10.5	0.70	0.675	1.5
0.35	0.375	7			

仍以长石粉料为例。取粒度范围  $\Delta d$  为 0.05mm,从图 1-3 中的 R 曲线查得  $\Delta R/\Delta d$  (%/0.05mm) 即  $f$ ,制成频率分布粒度表格 1-8,然后绘制直方图,最后光滑连结各矩形顶部中点而成  $\Delta d=0.05\text{mm}$  时的频率分布曲线,如图 1-4 所示。显然,只有当  $\Delta d$  足够小时,获得的曲线才



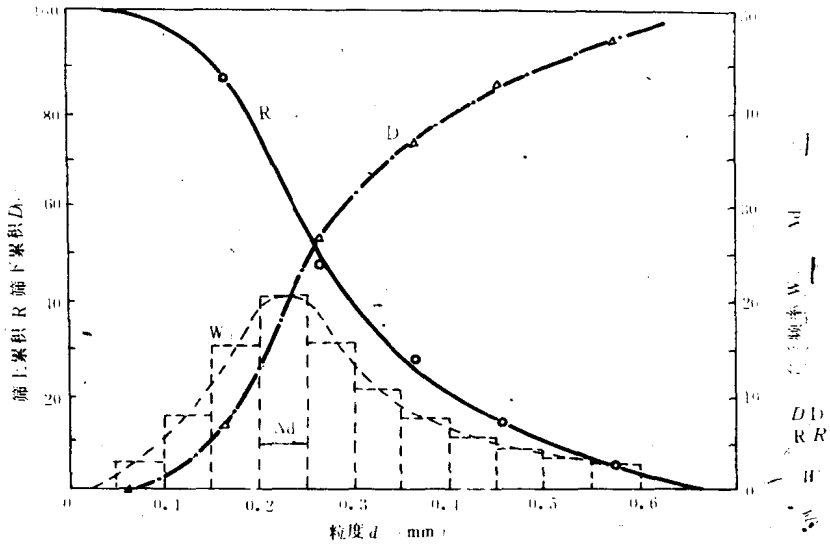


图 1-3 长石粉料的粒度分布曲线

有意义。此时，可不作直方图，直接用粒级平均粒径绘制频率分布曲线。

由累积分布曲线，可直接读出  $R=D=50\%$  时所对应的中位径  $d_{50}$ ，以及任何两个粒度之间的颗粒百分含量  $\Delta R$ ；由频率曲线，亦可直接读出对应于曲线最高点即颗粒含量最多的多数径  $d_{mod}$  以及颗粒群个数平均径或质量平均径  $d$ ：

$$d = \sum_{i=1}^n (f_i \times d_i) \quad (1-6)$$

式中  $n$  是粒级数目； $d_i$  是各粒级平均直径； $f_i$  是对应粒级频率。

累积分布与频率分布有如下关系：当  $\Delta d \rightarrow 0$  时，有  $f = d_R/d_d$ ，则在同一横坐标条件下，筛余累积分布曲线上各粒径点之切线斜率  $d_R/d_d$ ，即为频率分布曲线上对应粒径点之频率值，逐点作切线求斜率，即逐点求微分，可得频率分布，故又称频率分布为累积分布的微分形式， $f$  曲线为微分曲线；而在频率分布曲线上以各粒径  $d$  为中心， $d_d$  为粒级宽度，对应频率  $f$  为高度，则各直方体面积为  $f \times d_d = d_R$ ，即各粒级质量百分数，逐点作直方体并求面积和，即逐点求积分，即得筛余（筛下）累积分布，故又称累积分布为频率分布的积分形式， $R(D)$  曲线为积分曲线。综上所述，可用下式表示两种分布的关系：

$$R = \int_d^{d_{\max}} f d_d = \int_d^{d_{\max}} \frac{dR}{d_d} d_d \quad (1-7a)$$

$$D = \int_{d_{\min}}^d f d_d = f_{d_{\min}}^d \frac{dD}{d_d} d_d \quad (1-7b)$$

显然， $R+D = \int_{d_{\min}}^d f d_d + \int_d^{d_{\max}} f d_d = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} f d_d = 100$ ，即为  $f$  曲线下所包含的全部面积。

粒度分布曲线的另一优点是，可在由有限个粒度分布测定数据作出的光滑曲线上，读出粒度表格中未能给出的任意一个粒级的颗粒百分含量。

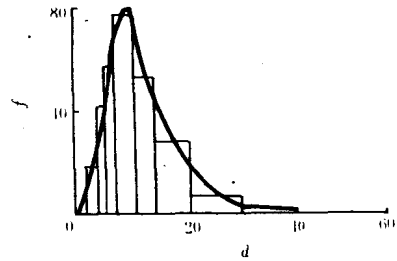


图 1-4 频率分布直方图