

(京)新登字 039 号

内 容 提 要

本书是根据美国著名的ROBERT H. PERRY所著的《PERRY'S CHEMICAL ENGINEERS' HANDBOOK》(第六版)译出。

中译本分上、下两卷出版。全书共分27篇。上卷包括第1至12篇,主要内容有:单位换算和各种数据表,数学,物理和化学数据,反应动力学,反应器设计,热力学,流体与颗粒力学,流体的输送与贮存,粉粒体的输送及固体和液体的包装,粉碎与团聚,能的利用、转化与储存,传热及传热设备,湿度测定法,蒸发冷却,致冷及深冷过程。

本书为全化工各行业通用的工具书,是指导化工、轻工、冶金等领域的科研人员,教学人员、生产人员进行过程研究开发,生产设备设计计算的必备手册。

ROBERT H. PERRY

PERRY'S CHEMICAL ENGINEER'S HANDBOOK

SIXTH EDITION

McGraw-Hill

1984

PERRY化学工程手册

第 六 版

上 卷

责任编辑, 郭乃铎
陈 丽

封面设计, 韩 星

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里1号)

北京朝阳区东华印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

开本787×1092 1/16 印张112 3/4 字数2804千字

1992年2月第1版 1992年2月北京第1次印刷

印数 1—3000

ISBN 7-5025-1036-2/TQ·603

定 价145.00元

编辑说明

(1) 《PERRY化学工程手册》是一部在国际、国内具有较大影响的权威性工具书，对指导化工、轻工、冶金等行业的科研、设计和生产具有重要的参考价值。该书自1934年问世以来，经过五次修订再版。现将1984年第六版译成中文，介绍给广大读者。

(2) 由于计算机技术的迅速发展和被广泛采用，以及新的结构材料的开发利用，化学工程的理论和技术日益更新，新的另枝不断形成。为此，作者在第五版的基础上，对手册的内容作了大量修订和补充，不但对第五版的25篇逐一修正增补，并改写了经济、蒸馏、萃取和吸收各篇，还增加了生化工程技术和废物管理两篇新内容。另外，本版新收入的图、表、数据等以SI单位制表示，并增加了U.S.单位和SI单位的换算。

(3) 天津大学，浙江大学，清华大学，大连理工大学化工学院，石油大学，华南理工大学，成都科技大学，天津化工研究院的有关专家教授参加了翻译和审校工作。

(4) 参加本手册的编辑人员(以姓氏笔划为序)：刘哲、刘小蕓、李迟善、**李诵雪**、李洪勋、李建斌、朱振东、陈丽、陈逢阳、苗延秀、罗幼松、张红兵、张婉如、施承薇、周国庆、郭乃铎、徐世峰、梁虹、谢丰毅等。

总 目 录

上 卷

单位换算因子和各种数据表	1-1
数学	2-1
物理和化学数据	3-1
反应动力学, 反应器设计, 热力学	4-1
流体与颗粒力学	5-1
流体的输送和贮存	6-1
粉粒体的输送及固体和液体的包装	7-1
粉碎与团聚	8-1
能的利用、转化与储存	9-1
传热	10-1
传热设备	11-1
湿度测定法, 蒸发冷却, 致冷及深冷过程	12-1

下 卷

蒸馏	13-1
传质与气体吸收	14-1
液液萃取	15-1
吸附和离子交换	16-1
新的分离过程	17-1
液-气系统	18-1
液-固系统	19-1
固体干燥和气固系统	20-1
固-固体系和液-液体系	21-1
过程控制	22-1
结构材料	23-1
过程机器的传动	24-1
过程经济	25-1
废物管理	26-1
生化工程	27-1
索引	1

第 8 篇 粉碎与团聚

作者:

Richard H. Snow	篇主编
Brian H. kaye	粒度分析
C. Edward Capes	团聚
Guggilam C. Sresty	破碎和磨碎设备

译者:

马克承	本篇审校人
石炎福	破碎和磨碎设备, 团聚, 破碎和磨碎的实际应用
余华瑞	粒度分析, 粉碎原理, 破碎和磨碎设备 (设备的分类和选择, 鄂式破碎机, 旋回破碎机, 辊式破碎机, 冲击式破碎机)

第8篇 目 录

8.1 粒度分析	8-7	二、断续磨机方程的解	8-29
一般参考文献	8-7	三、连续磨机模拟	8-30
8.1.1 粒度分布	8-7	四、连续磨机的解	8-31
一、散粒的粒度特性	8-7	五、闭路磨碎	8-31
二、粒度方程式	8-8	六、有关破碎函数特性的数据	8-32
8.1.2 粒度测量	8-9	七、磨碎速率函数	8-33
一、粉体的取样	8-9	八、根据可磨性函数进行放大	8-33
二、显微镜法	8-9	8.3 破碎与磨碎设备	8-35
三、沉降法	8-10	8.3.1 设备的分类和选择	8-35
四、光衍射法	8-11	8.3.2 鄂式破碎机	8-36
五、沉降-天平法	8-12	一、设计与操作	8-36
六、离心法	8-12	二、性能	8-38
七、液流法	8-12	三、破碎机产品的程度	8-39
八、筛析法	8-12	8.3.3 回转破碎机	8-40
九、扬析法	8-13	一、设计与操作	8-40
十、通过测量气体吸附量确定表面积	8-13	二、性能	8-41
十一、渗透法	8-13	8.3.4 辊子破碎机	8-44
十二、在线方法	8-14	一、设计与操作	8-44
8.2 粉碎原理	8-15	二、性能	8-45
一般参考文献		8.3.5 冲击式破碎机	8-46
8.2.1 固体的性质	8-15	一、锤式破碎机	8-46
一、单一颗粒的断裂	8-15	二、转子式冲击破碎机	8-47
二、可磨性	8-17	三、笼式磨碎机	8-48
三、测定可磨性的方法	8-17	四、预碎机	8-49
四、磨机的磨损	8-18	五、旋转切割机	8-49
五、安全性	8-18	六、精密切割机和纵切机	8-51
8.2.2 可达到的产品粒度和所需的能量	8-20	8.3.6 碾盘式破碎机	8-51
一、能量定律	8-21	一、设计与操作	8-51
二、磨碎效率	8-21	二、性能	8-52
三、干法与湿法磨碎的比较	8-23	8.3.7 圆筒式磨碎机	8-52
四、分散剂和助磨剂	8-24	一、设计	8-53
8.2.3 伴有其他操作的粉碎	8-25	二、操作	8-54
一、有粒度分级的粉碎	8-26	三、圆筒式磨碎机的循环回路	8-55
二、粒度分级器的特性	8-27	四、物料和球的荷载	8-55
8.2.4 磨碎循环过程的模拟	8-29	五、进料和排料	8-55
一、断续式磨碎	8-29	六、磨机效率	8-56
		七、磨机参数	8-56
		八、磨机的选择	8-57

九、生产能力和功率消耗	8-57	七、石棉和云母	8-91
十、电动机和传动装置	8-58	八、耐火材料	8-92
十一、各公司磨机的性能	8-58	九、碎石和骨料	8-92
十二、圆筒形自磨机	8-59	8.4.3 肥料和磷酸盐	8-94
8.3.8 不旋转的球磨机或珠磨机	8-60	一、牡蛎壳和石灰岩石	8-94
一、搅拌磨	8-60	二、磷酸盐	8-94
二、振动磨	8-61	8.4.4 水泥、石灰和石膏	8-95
三、性能	8-62	一、干法生产水泥	8-96
四、行星式球磨机	8-62	二、湿法生产水泥	8-96
8.3.9 与磨碎机联用的粒度分级器	8-63	三、水泥熟料的闭路磨碎	8-97
一、干式分级器	8-63	四、石膏	8-98
二、性能	8-65	8.4.5 煤、焦炭和其他碳素产品	8-99
三、湿式分级器	8-65	一、烟煤	8-99
8.3.10 锤磨机	8-66	二、无烟煤	8-99
一、无内置空气分级器的锤磨机	8-66	三、焦炭	8-100
二、碎散机	8-68	四、其他碳素产品	8-100
三、钢柱磨碎机	8-69	8.4.6 化学品和肥皂	8-101
四、有内置空气分级器的锤磨机	8-69	一、染料和颜料	8-101
8.3.11 环辊磨碎机	8-74	二、氧化铝	8-102
一、无内置分级器的环辊磨碎机	8-74	三、化学品	8-102
二、有内置筛分机的环辊磨碎机	8-74	四、硫	8-102
三、有内置空气分级的环辊磨碎机	8-74	五、肥皂的磨碎	8-103
四、碗磨机	8-76	8.4.7 有机聚合物	8-103
8.3.12 盘磨机	8-76	8.5 团聚	8-106
8.3.13 分散磨和胶体磨	8-78	8.5.1 范围和应用	8-106
8.3.14 流能磨或射流磨	8-79	8.5.2 团粒强度	8-106
8.3.15 新的方法	8-82	一、结合机理	8-106
一、避免粉碎操作	8-82	二、团粒强度的计算	8-107
二、热效应	8-83	三、强度试验方法	8-108
三、张力粉碎	8-83	8.5.3 压制	8-109
四、爆炸破碎	8-83	一、力的传递	8-109
五、特殊的圆筒型磨碎机	8-83	二、粘结剂和润滑剂	8-109
8.4 破碎和磨碎的实际应用	8-85	三、压制设备	8-110
8.4.1 谷物和其他植物产品	8-85	8.5.4 翻滚和混合团聚	8-114
一、面粉和饲料粉碎	8-85	一、团粒长大	8-115
二、大豆、豆饼和其他压榨饼	8-86	二、正确的翻滚作用的重要性	8-116
三、淀粉和其他粉体	8-86	三、翻滚团聚机	8-116
8.4.2 矿石和矿物	8-86	四、倾斜盘式和鼓式团聚机的相对优缺点	8-117
一、金属矿石	8-86	五、混合团聚机	8-118
二、非金属矿物	8-87	8.5.5 热过程	8-119
三、粘土和高岭土	8-87	一、烧结和热硬化	8-119
四、滑石和皂石	8-89	二、干燥和固化	8-120
五、碳酸盐和硫酸盐	8-89	8.5.6 喷雾方法	8-121
六、硅石和长石	8-90		

一、喷雾干燥.....	8-122
二、造粒.....	8-122
三、流化床和喷动床成粒.....	8-122
四、急骤干燥.....	8-123

8.5.7 液体系统	8-123
一、被不溶混的液体润湿.....	8-124
二、溶胶-凝胶过程	8-124
三、丸粒絮凝.....	8-125

术语和单位

符 号	定 义	SI单位	美国惯用 单 位	符 号	定 义	SI单位	美国惯用 单 位
A	双Schuman 方程中的系数			Q	辊式破碎机的生产能力	cm^3/min	ft^3/min
a	常数			g	磨机总的质量通过率	g/s	lb/s
$a_{k,r}$	磨机方程中的系数			g_r	粗颗粒组分的质量流率	g/s	lb/s
$a_{k,n}$	磨机方程中的系数			g_F	进入磨机的新鲜物料质量流率	g/s	lb/s
B	破裂函数的矩阵			g_f	细颗粒组分的质量流率	g/s	lb/s
$\Delta B_{k,p}$	破裂函数			g_o	进料质量流率	g/s	lb/s
b	常数			g_p	分级器产品的质量流率	g/s	lb/s
C	常数			g_s	分级器分级余物的质量流率	g/s	lb/s
C_s	冲击-破碎阻力	kWh/cm	$(\text{ft}\cdot\text{lb})/\text{in}$	R	磨机循环质量流率	g/s	lb/s
D	磨机直径	m	ft	R	循环		
D_o	球或棒的直径	cm	in	R	Reid解		
D_{miv}	磨机直径	m	ft	r	粒度分布方程中的无因次参数		
d	微分			s	速率函数	s^{-1}	s^{-1}
d	破碎机滚筒间的距离	cm	in	$\frac{s}{s}$	校正的速率函数	s^{-1}	s^{-1}
E	粉碎时所作的功	kWh	$\text{hp}\cdot\text{h}$	s'	速率函数的矩阵	Mg/kWh	$\text{ton}/(\text{hp}\cdot\text{h})$
E	输入磨机的能量	kW	hp	$s_0(X)$	可磨性函数	s^{-1}	s^{-1}
E_1	Bond 功指数	kWh/Mg	$(\text{hp}\cdot\text{h})/\text{ton}$	S_o	磨碎速率函数		
E_2	磨机进料的功指数			s	粒度分布方程中的参数		
E_3	输入实验室磨机中的净功	kW	hp	s	辊子的周边速度	cm/min	in/min
erf	正态概率函数			t	时间	s	s
F	表示进料流的下标			u	颗粒的沉降速度	cm/s	ft/s
F	结合力	kg/kg	lb/lb	W	物料流中微分粒度分布矢量		
g	重力加速度	cm/s^2	ft/s^2	w_t	截留在每个筛上的重量百分率		
I	磨机方程中的单位矩阵			w_u	较大粒度颗粒的重量百分率		
i	圆块的抗拉强度	kg/cm^2	lb/in^2	w_i	磨机中物料的滞留量	g	lb
K	常数			X	粒度或筛子尺寸	cm	in
k	粒度分布方程中的参数	cm	in	X'	粒度分布方程中的参数	cm	in
k	表示磨机和分级器参数中粒度的下标			ΔX_1	粒度间隔	cm	in
L	表示磨机或分级器排料的下标			X_i	粒度间隔 ΔX_1 的中点	cm	in
L	滚筒长度	cm	in	X_o	用于分级器设计的常数		
L	圆筒形破碎机的长度	m	ft	X_1	进料粒度	cm	in
M	磨机方程中的磨机矩阵			X_m	粒度分布方程中增量的平均粒度	cm	in
m	粒度分布方程中的无因次参数			X_p	产品粒度	cm	in
N	平均配位数			X_p	磨机较粗进料的粒度	cm	in
N_c	磨机的临界速度	r/min	r/min	X_{25}	相应于分级器选择性25%的粒度	cm	in
ΔN	粒度分布方程中颗粒增加的数目			X_{50}	相应于分级器选择性50%的粒度	cm	in
n	粒度分布方程中的无因次参数			X_{75}	相应于分级器选择性75%的粒度	cm	in
n	常数,一般性的			ΔX_k	相邻筛孔间的差	cm	in
n_c	磨机临界速度的百分数			π	液体的重度百分率		
O	表示进入流的下标			Y	粒度分布方程中筛下物的累积重量分率		
P	表示产品流的下标						
P_h	大小给定的筛孔的颗粒百分率						
p	磨机方程中短的时间间隔数						

续表

符 号	定 义	SI单位	美国惯用 单 位	符号	定 义	SI单位	美国惯用 单 位
Y	分级器方程中筛下物或筛上物的累计重量百分率			ϵ	空隙的容积百分率		
Y	二筛孔间的颗粒分率			Z	磨机中的滞留时间	s	s
ΔY	粒度分布方程中颗粒的重量增量	g	lb	η_x	粒度选择性参数		
ΔY_{oi}	粗颗粒物分的累积粒度分布	cm	in	μ	流体的粘度	(N·s)/m ²	P
ΔY_{oi}	细颗粒物分的累积粒度分布	cm	in	ρ_l	液体的密度	g/cm ³	lb/in ³
Z	指数矩阵			ρ_l	液体的密度	g/cm ³	lb/in ³
β	分级器的锐度指数			ρ_s	固体的密度	g/cm ³	lb/in ³
δ	接触角	rad		Σ	总和		
				σ	标准偏差		
				σ	表面张力	N/cm	dyn/cm

8.1 粒 度 分 析

一般参考文献

*Beddow, *Particulate Science and Technology*, Chemical Publishing, New York, 1980. Cadle, *Particle Size*, Reinhold, New York, 1965. Chamot and Mason, *Handbook of Chemical Microscopy*, vol. 1, 3d ed., Wiley, New York, 1958. Herdan, *Small Particle Statistics*, 2d ed., Butterworth, London, 1960. Kaye, *Direct Characterization of Fineparticles*, Wiley, New York, 1981. Klug and Alexander, *X-Ray Diffraction Procedures for Polycrystalline and Amorphous Materials*, Wiley, New York, 1954. Orr and Dalvalle, *Fine Particle Measurement*, Macmillan, New York, 1959. *Particle Size Analysis*, symposium, Institution of Chemical Engineers, London, 1947. *Particle Size Analysis*, conference, Loughborough, England, 1966, publ. British Society of Analytical Chemists, London, 1967. Stevens, *Microphotography*, Wiley, New York, 1957. Van de Hulst, *Light Scattering by Small Particles*, Wiley, New York, 1957. Whitby and McFarlane, *Bibliography of Particle Size Analysis*, 1111 references, University of Minnesota, Minneapolis, 1959.

8.1.1 粒 度 分 布

一、散粒的粒度特性

粉碎操作的进料和最终产品的粒度必须进行测定，最好也知道是否要测定单个颗粒的粒度。如果颗粒发生聚集或团聚，还要知道它们是否是由于粉碎操作所造成的。

粒度分布对粉体进行描述是最为充分的。粒度分布可以用筛上物或筛下物的累积百分率同颗粒直径的关系图来表示，也可以用每个单元直径间隔所具有的物质同直径的关系作图来表示。百分率通常采用重量基准，但在文献中有些数据也使用频率或颗粒数目为基准。此百分率的基准，不论是重量、频率或某些不常采用的参数都应具体说明；还应说明直径所使用的单位；最好还指出直径是由筛分、沉降速度或是由其它方法确定的。图8-1列出了二组分布曲线图，一组是累积的，另一组是以单元间隔方式表示的。累积曲线每隔 $5\mu\text{m}$ 处的斜率可转换成每微米的百分率，并画成块形或矩形图，由此可作出光滑曲线。就整重而言，粉体A的图形较粉体B的图形有更窄的亦即更密集的粒度范围。两种物料在箭头所示的粒度以上与以下均有相同的重量。

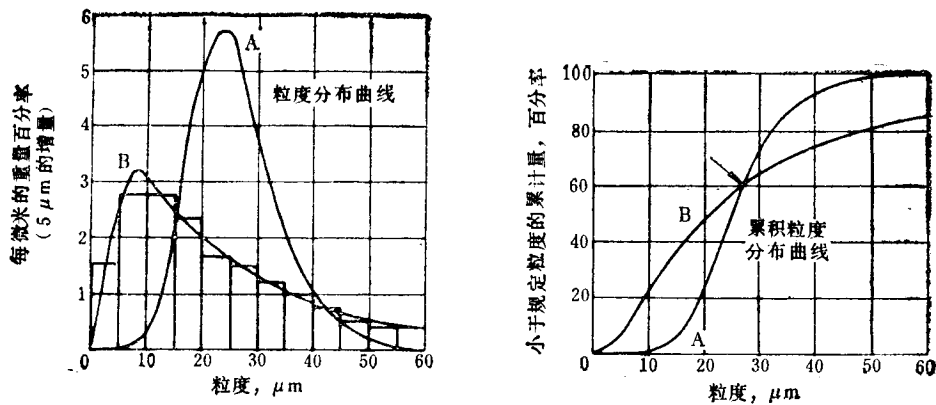


图 8-1 简单粉体的粒度分布曲线

对粒度分布进行较简单的处理是可能的。在有些情况下,最大粒度(top size)是个重要的量。但由于相当于100%这一点的粒度是不可靠的,有些量规定相当于95%或98%的粒度称作最大粒度。在另一些情况下,相当于某一筛孔上的百分率有助于确定颗粒的粒度。仅仅说全部或除少量外全部通过某一规定筛孔来确定物料的真实细度是不够的。用全粒度分析表示粒度分布,对于比较和分析颗粒的粒度往往是必需的。

二、粒度方程式

对于分布关系曾提出了许多方程式来建立散粒物料粒级百分率与其粒度间的关系[Harris, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 241, 343-357(1968); Fagerholt, *Particle Size Deistribution of Products Ground in Tube Mill*, Gads Forlag, Copenhagen, 1945]。文献中常假定粉体必定遵循某一分布,如 Rosin-Rammler-Bennelt[Rosin and Rammler, *J. Inst. Fuel*, 7, 29-36 (1933); Bennett, *ibid*, 10, 22-39(1936)]分布:

$$Y=1-[\exp-(X/X')^n] \quad (8-1)$$

或 Gates-Gaudin-Schumann 分布[Schumann, *Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng. Tech. Pap* 1189, *Min. Technol.* (1940)];

$$Y=(X/k)^m \quad (8-2)$$

或对数概率分布[Hatch and Choate, *J. Franklin Inst.*, 207, 369 (1929)];

$$Y=\operatorname{erf}\left(\frac{\ln X/X'}{\sigma}\right) \quad (8-3)$$

或 Gaudin-Meloy 分布[Gaudin and Meloy, *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, 223, 40-50(1962)];

$$Y=1-\left(1-\frac{X}{X'}\right)^r \quad (8-4)$$

式中 Y = 筛下物的累计重量分率;

X = 尺寸;

k, X' = 具有尺寸因次的参数;

m, n, r = 无因次指数;

erf = 正态概率函数;

σ = 标准偏差。

假定某一种特定的粉体遵循这些经验定律中的某一定律是没有固有的理由的,否则会造成误差,而且很难确定粒度分布同定律是否吻合得很好。任一累积量-粒度曲线都会呈现出吻合得很好的现象。随机数显示出十之八九与 Rosin-Rammler 曲线吻合得好[Kaye, *statub* (March 1964)],但微分曲线能较清晰地表明粒度偏差[Kottler, *J. Franklin Inst.*, 250, 399, 419, 499(1950); 251, 617(1951)]。

在特殊情况下,只需要确定粒度曲线的几个粒度-数据点,其余部分则假定曲线遵循原先已形成的趋向。当一台磨机已经对类似的物料和条件进行过多次磨碎操作后,这种方法可用来检验该磨机是否适用于磨碎该物料。

上述定律中的某几个仅仅是为了同曲线吻合而建立的。Rosin-Rammler 分布可代表微分曲线上有一顶点的分布。Gates-Gaudin-Schumann 分布的优点是简便,而 Gaudin-Meloy 分布的优点是能吻合实际中存在的多种曲线。粒度数据也可以表格形式列出,从而避免了同曲线吻合问题。

粉体的平均粒度根据所强调的特性（如重量、体积、表面积及比表面），可以有許多不同的值。

体积平均粒度和比表面平均粒度在以重量为基准时，分别以 $\sqrt[3]{\Sigma \Delta Y X_m^3 / \Sigma \Delta Y}$ 及 $\Sigma \Delta Y / \Sigma \Delta Y X_m^{-1}$ 表示；以数目为基准时，分别以 $\sqrt[3]{\Sigma \Delta N X_m^3 / \Sigma \Delta N}$ 及 $\Sigma \Delta N X_m^2 / \Sigma \Delta N X_m$ 表示。式中 ΔY 及 ΔN 分别为颗粒重量及数目的增量， X_m 为增量的平均粒度。

比表面可由全分布数据算得。Gates图采用了筛下物的重量累计百分率对直径的倒数作图，曲线之下的面积代表表面积。同样，Roller图曲线之下的面积也表示表面积。此图是以每微米的重量百分率对直径的对数作图的。

8.1.2 粒度测量

文献中介绍了确定粉体特性的许多方法，但由于此学科的快速的发展，常常缺乏严密的技术语言，甚至没有一个公认的分析方法分类。

若粉体是由硬而光滑的球体组成，则无论用什么方法测量的粒度分布，其测量值均是相同的。然而，对非球粒的粉体，可能定义出许多不同的粒度分布。例如一棒形颗粒在筛子上进行筛分，其粒度不是由其长度而是由其能通过的孔径大小来定义。但是若令颗粒在粘性流体中沉降，则某一材质相同的球体在同一流体中具有与之相同的沉降速度，并由此计算出的该球体的直径（即所谓Stokes直径）将定义为该棒性形颗粒的粒度。

由于棒形颗粒的Stokes直径与棒的真实直径相差较大，因此这种差异反映了有关颗粒形状的附加影响。球形颗粒用所有测量方法得出的分布均是相同的这一事实，并非代表理想情况，而是简化了的情况。

形状这一名词用有二种含义：（1）表示各颗粒的立体形状；（2）作为一个因数去关联细颗粒系统的两种平均粒度，这两种平均粒度是用基于不同物理原理的两种方法测出的。

一、粉体的取样

准确的粒度分析必要的先决条件是正确的粉体取样。Kaye（在所引的书中，1981）对各种取样装置的相对有效性作了综述。广泛使用的一种有效取样装置是旋转隔盘，如图8-2所示。在此装置中，排列成环形的许多容器在粉体给料口的下方旋转。若粉体流动的时间与转一转的时间相比很长，则在每个容器中的样品会由粉体整体中各点引出的许多小部分所构成。旋转速度必须维持很低，以免产生空气流而将细粉吹出。一个有二十格的旋转隔盘，只要通过三次即可将样品分成原先粉体体积的1/8000。

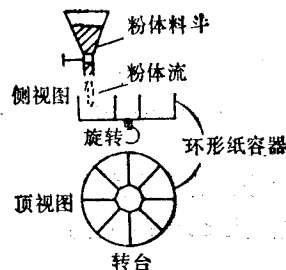


图 8-2 旋转隔盘取样器

二、显微镜法

粒度分析的显微镜法是直接测量放大的颗粒图象。最简单的方法是用放在颗粒图象顶部的标尺来进行颗粒的线性测量。除了球形以外，对所有其它形状的颗粒，必须对如何在投影图上进行测量加以明确规定。在图8-3中定义了一些有关的尺寸。

直径这一术语可恰当地用来表示通过任意形状投影图的任何直线线段。

显微镜法分析粒度的二个主要问题是：收集足够的数以保证计算出有适当精度的粒

度，消除操作者测量时所引起的数据中的可能误差。当一组颗粒的粒度之比大于10:1时，对

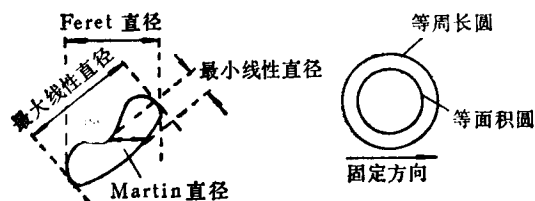


图 8-3 不规则颗粒的各种尺寸

任何给定粒度的投影面（在颗粒图象间）出现的统计波动将成为十分尖锐的问题（Kaye，在所引的书中，1981）。测量是很费时的，因为须将标尺放在图像顶部，然后两次调整方向以测量最大和最小直径。测量与方向无关的参数则较快，如图 8-3 所示等面积和等周长圆的直径。数据收集的速度也可通过提供一组比较

圆 (comparison circles) 而加快，但此法要受到操作者个人倾向性的影响。

测量等面积圆的 Zeiss Endter 仪器（当有显微照相相片时）可有效地减小主观因素 [Endter and Gebauer, *Optik*, 97, 13 (1956)]。

加速数据采集的第二个方法是测量所谓统计直径，而不是图像投影面的具体直径。Feret 直径（见图 8-3）是颗粒外缘两端的切线在规定方向的垂直投影。Martin 直径是平行于规定方向的线，切线将颗粒投影面分成二个相等面积。因为统计直径的大小随个别颗粒的方位而变，所以这些直径只有将足够数量的测量值平均后才有意义。使用这些直径中的问题，是技术人员常常不知道所谓“足够”意味着多少（Loughborough Conference，及其参考文献）。

电光仪器和微型计算机价格的下降促进了许多测量细粒图像尺寸的自动仪器的发展（供应厂商一览表见 Kaye，及所附的文献中，1981）。这些仪器的速度和先进性使得有可能去拟定新的方法来表示细粒的形状。为方便起见，可将新的形状表示法分成二类：第一类可称为傅立叶法；第二类可称为 fractal 法 (fractal method)。在傅立叶法中是将细粒的形状特征转换成信号波形。因此 Beddow 及其合作者所用的基本方法是将投影面的质心作为基准点，然后一矢量围绕此质心旋转，矢量的顶端伸至投影面的外缘。矢量大小对旋转角位置所作的图是一波形函数。对此波形进行傅立叶分析后，显示出组成此复杂波的低频率谐波对应于细粒的总外部形态，而高频率谐波对应于细粒的结构（J.K. Beddow, *Particulate Science and Technology*, Chemical Publishing, New York, 1980）。

Fractal 逻辑 (fractal logic) 是由 Kaye 及其合作者引入细粒科学的。他们表明 Mandelbrot 的非欧式逻辑可用于描述投影面的不平整性。业已证明，联合使用 fractal 尺寸 (fractal dimensions) 和几何形状因数，如长度与直径之比（长度除以直径）或伸长度，可用来描述各种形状的一组细粒，并可与粒子的功能特性相关联（Kaye 书中，1981）。

三、沉降法

在粒度分析的沉降法中，可根据沉降悬浮液中出现的浓度变化得出粉体的 Stokes 直径分布。此法是基于 Stokes 定律，

$$D = \sqrt{\frac{18\mu u \times 10^8}{(\rho_s - \rho_f)g}} \quad (8-5)$$

式中 μ = 粘度，P； u = 速度，cm/s； ρ_s = 固体颗粒的密度，g/cm³； ρ_f = 流体的密度，g/cm³； D = 球体直径， μm ； g = 重力加速度，cm/s²。

Stokes 方程理论上只适用于球体。但是，不规则颗粒的体积与相当球体体积之间的差异不是代表“误差”，而是代表颗粒形状的有用信息。颗粒愈不规则，此体积之比愈小。

实验中的一个问题是在进行沉降分析前使颗粒得到充分的分散。一种较好的作法是至少将粉体分散至下一步加工所需的那种分散程度。

由沉降数据计算粒度分布的方程通常基于颗粒在悬浮液中进行自由沉降的假定，但在许多沉降分析使用的浓度下，沉降颗粒间的相互作用能使估计的颗粒尺寸偏大。

在吸管法(图8-4中)中，悬浮液内的浓度变化，通过用一吸管从悬浮液本体中取样测定。样品假定取自图8-4a中的D区，根据所测得的浓度变化计算粒度分布。

应用此法的最简单的设备〔Andreasen, *Kolloid. Z.*, 49, 253 (1929)〕示于图8-4b中。

当悬浮液开始沉降时，按给定的时间间隔取出一系列样品。此系统的主要缺点如下：第一，样品的取出除了改变颗粒至取样区的沉降距离外，还影响沉降悬浮液的性质；第二，系统中吸管的存在对悬浮液的沉降起干扰作用。实际的取样区是图8-4a中的S，它是以吸管尖端为中心的圆球。

在A下面的颗粒未被来自上面的颗粒置换，所以此区的密度较小，从而在吸管尖端的下方发生湍动对流。为了克服由此密度差引起的对流，Leschonski的设备(图8-4c)将吸管伸至容器底部。悬浮液在B处吸入孔中，孔沿杆的圆周布置。此取样区能更好地接近于理论区D。

吸管法分析的精度受吸管的形状和容积、取样球的直径与取样点的深度之比以及取样速率等的影响。这些因素应严格控制。如果样品的浓度是将固体进行干燥并称量的方法确定的，必须注意，应该考虑所含表面活性剂的重量。

在粒度分析的比重计法中，用小的比重计来测定悬浮液中的密度梯度。此法广泛用于土壤科学研究中。虽然此法的精度不高，但花费较少，且通常能提供足够的数据以满足目前的需要(ASTM Spec. Pub.234, 1959)。

在光测沉降法中，用一束光线通过悬浮液来测量浓度的变化。该法有很高的灵敏度，只需少量样品。在低浓度时，颗粒之间相距足够远，因而符合自由沉降条件。最终测得的量是适合于自动记录的电信号。只有当颗粒小到与光的波长一样时才会出现困难。因为此时几何光学的简单定律不能用来计算此种悬浮液的不透明度。

四、光衍射法

使用激光技术将需要测量的颗粒悬浮液置于激光束中。用计算机对所产生的复杂衍射图形中的能量分布进行分析。在将衍射图形变换成粒度数据时曾作了某些假定。销售此类设备的各种公司提供不同的解释程序。这些解释程序与所研究系统中预先的分布形式有关。此类设备包括由Leeds & Northrup Co.制造的Microtrac仪CILAS颗粒测量仪和Malvern粒度分析器。

激光技术还产生一整套测量方法，它们通过检测离开细粒的反射光中的多普勒频移(Doppler shift)来测定颗粒的运动速度〔Doyle, Thompson, and Stevenson (eds), *Laser Velocimetry and Particle Sizing*, Hemisphere Publishing, Washington, 1979〕。多普勒法曾用于研究旋风分离器的内部动力学(Stenhouse, "Particle Trajectories in Uniflow Cyclones", Second World Filtration Congress, 1979; Mazumder et al., "Real-time Measurement of Stack Emissions, "application of SPART analyzer, in Doyle, Thompson, and Stevenson, 及其参考文献中)。

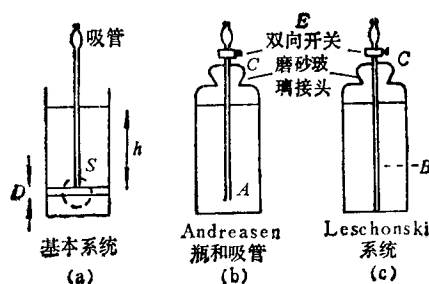


图 8-4 吸管法粒度分析中所用设备

五、沉降-天平法

在沉降-天平法中，天平悬挂在初始是均匀的悬浮液中。当颗粒沉积在天平盘上时，对沉降的颗粒重量进行测量。此方法是比较便宜的，但较慢，因为最小的颗粒沿给定的圆筒高度沉降下来需要较长的时间。

六、离心法

对非常细的颗粒的分析可用离心沉降法。盘式离心机同管型离心机相比有一优点，即在盘式离心机中颗粒是径向沉降，可避免由于颗粒撞击管壁所引起的误差。

由Slater和Cohen所开发的设备（图8-5）实质上是离心吸管装置。通过测量一系列样

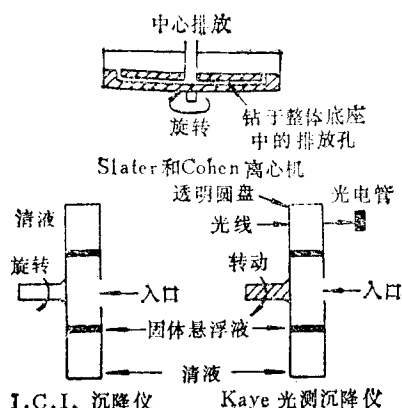


图 8-5 圆盘离心机系统的基本操作

品的固体浓度来计算粒度分布。样品是在不同的时间间隔从中心排放柱取出。由于颗粒是在距旋转中心不同距离处开始沉降的，所以其初加速度也不同，使计算复杂化。

在ICI离心沉降仪中，需要测试的悬浮液通过入口注入旋转圆盘的清液中，在清液自由表面上形成一层悬浮液。达到给定的离心强度后，通过如图8-5所示的入口放置一个收集器，取出样品。用此仪器时液相系统的稳定性可能是关键性的问题，因为必须注入相当高的悬浮液才能得到足够的样品。

离心盘式光测沉降仪虽然是由Kaye及其合作者独立开发的，但是它类似于ICI装置。浓

度变化由光束检测。此设备对信息具有高鉴别能力。一次分析完以后，可注入第二次样品而无需停机和清洗圆盘。可用很低的固体浓度，但是小颗粒的光散射特性给阐明浓度变化造成困难（对这些仪器更完全的讨论见kaye, 1981）。

七、液流法

在此方法中，所需测量的颗粒在液流中进行单个检测。当流体通过敏感区时，由于颗粒引起的扰动可检测颗粒的存在。检测区可用光束、超声波和电阻测量等方法。液流法广泛用于Coulter计数器中[Kubitschek, Research, 13, 129 (1960)]。在此设备中颗粒的尺寸由电解质溶液圆柱中的电阻变化导出，此电阻变化是在颗粒通过圆柱时发生的。

液流法中必须使用十分低的颗粒浓度，因为来自二个小颗粒的信号与来自一个大颗粒的信号是不能辨别的。这称为重合误差 (coincidence error)。

近来，基于测量电阻的液流法得到了改进，可以测量长度。同时，对孔口（颗粒流经此孔口）的设计作了改进，提高了仪器的分辨能力和精确度。HIAC仪器是一种利用液流流经一光束而对颗粒尺寸进行测量的常用设备。

八、筛析法

筛析可能是最常用和最滥用的分析方法，因为所用设备、分析方法和基本概念都是最简单的，在筛析中，将颗粒加于许多尺寸相等的小孔之上，这些小孔组成一系列“通过”-“不通过”的量规。筛析有三个主要困难：（1）市场上供用的筛网，不是所有的孔径都是相同的，虽然高质量的筛可使尺寸偏差减至最小；（2）筛面在使用中易于损坏；（3）颗粒必须有效地引至筛孔所在的位置。

过去筛析的低限一般为43微米(325目),因为这是制造编织的金属丝网筛的实际极限。且大致在此尺寸时:作用在粉体系统内的表面力使粉体难于通过小孔。

最近研制成功的电铸筛,改变了孔径尺寸的下限。实际孔径与名义孔径的偏差约为2微米。更小的孔(40 μm 以下)支持在较粗的栅格上。用此细筛时不能用传统的筛析方法,可用Alpine空气吹扫筛。在此设备中,筛面下旋转的喷气流清扫筛孔,回吹的空气将细粒吹出筛孔。

在称为气流筛析(felvation)的分析方法中,颗粒在筛面下的隔室中流态化。流体通过粉体的流速逐渐增大,直至细粒通过筛面被扬析出去。然后进一步增加流体的流速,直至那些刚好不能够通过筛子的颗粒被迫碰撞在筛孔上。当筛面上的流体变清时,筛析即完成[Kaye and Jackson, *Powder Technol.*, 1, 43 (1967)]。

九、扬析法

在最简单类型的垂直重力扬析器中,流体夹带颗粒向上经过圆筒,由于这是对抗重力的运动,所以只有小于某临界尺寸的颗粒才被吹出。颗粒的终端速度在第5篇(“颗粒动力学”)中给出。但是,流体的向上流动是不均匀的(如产生漩涡)。所以分离是很粗略的。此外,运动流体的速度分布呈抛物线形,所以在圆筒的中心部分比旁边部分能承托更大的颗粒。如果用的是气体,则颗粒的静电荷可能成为一个问题。Leschoswki和Rumpf[*Powder Technol.*, 2 (3), 175-185 (1969)]提出了一种改进的设计,能将此类问题减小至最低限度。该设计采用一块密孔板使流体的流速分布均匀;还用一根直径逐渐缩小的管子,以便一旦细粒从床层中分选出来后,细粒的输送即得到加速。

旋风分离器是一离心扬析器(虽然通常不这样认为,见第20篇“粉尘捕集设备”)。传统的旋风分离器的一种巧妙的变型称作旋风分粒器(cyclosizer)[Kelsall and McAdam, *Trans. Inst. Chem. Eng. (London)*, 41, 84 (1963)]。将旋风分离器倒转并加上一个顶室,则理论上应吹出旋风分离器的细粒再循环,这相当于颗粒依次通过许多类似的旋风分离器。

十、通过测量气体吸附量确定表面积

假设气体以完整的单分子气体层覆盖粉体,如测得此覆盖层所需的气体量,则可根据气体分子的横截面积来计算表面积。由气体吸附法测定的表面积直接与化学反应的有效表面积相关。在分析之前,粉体应仔细进行除气以保证结果的重复性。对气体吸附,曾提出过许多理论,但是对粉体的测量一般都来用BET理论[Brunauer, Emmett, and Teller, *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309 (1938)]。

Nelsen和Eggertsen的气相色谱系统(如图8-6所示)无需使用高真空系统。当粉体置于周围是液氮的容器中时,氮气载体中的氮就吸附在粉体上。如移去冷却剂,就发生解吸。氮的浓度由一个导池测量。预先净化是很重要的。

十一、渗透法

粒度特性可根据流体流经压实的粉体柱所产生的阻力而求出。Kozeny-Carman方程广

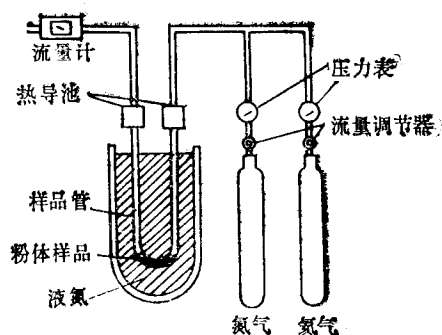


图 8-6 测量粉体表面积的设备。热导池测定进入和离开样品管的气流中氮气百分率

泛用于计算平均粒度或估计粉体表面积。由于在推导Kozeny-Carman方程时,作为推导基础所假定的模型是十分简单的,所以不能期待由渗透法测定的表面积和由其它分析方法测定的表面积相吻合。混乱的根源之一在于用Kozeny-Carman方程计算的表面积值在理论上应与所测量的粉体柱的绝对孔隙率无关。实际上测量值是孔隙率的函数。因为当孔的结构破坏时,孔径分布发生变化,且在每一孔隙率下有效弯曲路径也不同。经验表明,只要用于压实颗粒的压力不使颗粒破裂或变形,当孔隙率达到某一极限孔隙率后,对大多数物体,孔隙率的影响将减小。一个很好的做法,是对各种粉体确定其孔隙率与所测表面积之间的关系,找出孔隙率变化时对结果影响最小的孔隙率范围,并以此范围将实验方法标准化。

Kaye和Legault[*Powder Technol.*, 23, 179-186 (1979)]提出了一种新型渗透设备,其中传统的刚性渗透室用橡皮膜衬里的室来代替。需要测量的粉体置于此软壁室中,然后进行水力压缩,由此可得一更为均匀的粉体柱,并便于此方法的自动化。

十二、在线方法

工业上自动化倾向的增长促进对快速产生粒度信息的方法的广泛研究,使反馈回路成为粉碎过程的必不可少的组成部分。这种方法中有许多是传统方法改进而成的。在工程基础(Engineering Foundation)的出版物[Herbst and Sastry (eds.), *On-Stream Characterization and Control of Particulate Processes*, Engineering Foundation, New York, N.Y. 10017, 1978]中对在测定颗粒特性(on stream characterization)作了精辟的讨论。

Davis[*Am. Lab.*, 97-110 (April 1978)]评论了各种正在使用或试验的方法。一个16通道的Coulter计数器能在90秒内完成一次分析。各种激光衍射设备(如Microtac)能对快速流动的液相悬浮液(如南美贫铁矿)进行采样和分析。Kelsall仪和Restarick仪的Cyclo-sensor传感器能自动测量分级尺寸(cut size)之上和之下的颗粒量。压电天平用来测量空气中尘埃的尺寸;当尘埃撞击在传感器上进行测量。