

Powder Technology & surface modification

粉体工程与表面改性

杨辉

课程简介

- **授课对象：无机非金属材料**
- **课程性质：专业选修课**
- **课程学时：理论34h + 实验6h**
- **考核方式：**
 - (1) 过程考核（考勤、课堂表现等）：10%**
 - (2) 实验考核：20%**
 - (3) 课后作业：10%**
 - (4) 闭卷考试：60%**

课程简介

■ 参考教材：

- (1) 陶珍东、郑少华 编著，粉体工程与设备，化学工业出版社，2015
- (2) 盖国胜 编著，粉体工程，清华大学出版社，2009
- (3) 曹国忠 编著，纳米结构与纳米材料：合成、性能及应用，高等教育出版社，2012
- (4) 金谷 编著，表面活性剂化学，中国科学技术大学出版社，2008

■ 主讲教师联系方式：

➤ 电话：18879737967，邮箱：yanghui_2521@163.com

绪论

■ 引言

William Blake (1757-1827) 威廉-布莱克：英国诗人、水彩画家、版画家——《天真的预言》开头著名的四句：

To see the world in a grain of sand

一花一世界

And a heaven in a wild flower

一沙一天国

Hold infinity in the palm of your hand

君掌盛无边

And eternity in an hour

刹那含永劫

绪论

To see the world in a grain of sand



绪论

■ Question?

一粒砂石（单个颗粒）是固体，沙堆（颗粒群）是固体？
是流体？还是气体？



利用粉体技术解决实际问题

化学工程
与选矿工
程师

研究粘性力
与摩擦力控
制因素

物理学家

学科
背景

结构工程
师

解决粉体料仓
建造等问题

土力学者

借助计算机解决实际问题



技术学科，
综合性，
用广泛联

基本概念、
、理论基
炸、安全
掌握流程

型工业的过程及装备具有重要作用。

■ 历史沿革

- **20世纪60-70年代**：由于石化、能源和矿山技术的发展，粉体工程技术得到了迅猛发展，在世界各地出版了各种版本的颗粒学专著，这些专著对粉体工程的理论与应用发展起到了很大的推动作用。
- **20世纪80年代**：随着微细与超细颗粒材料制备与应用技术的发展，致使微米和超细颗粒成为粉体技术的热门研究课题——微细和超细颗粒与传统粉体的性能和行为差异很大。
- **20世纪90年代**：纳米材料制备与应用技术的发展赋予了粉体技术新的生命，从原子和分子的微观尺度和纳米尺度来研究粉体的行为，使粉体理论与技术成为一门多学科交叉的尖端科学

■ 工业背景

国际标准化组织ISO认定，社会经济过程中的全部产品通常分为四类：

- 硬件产品 hardware
- 软件产品 software
- 流程型产品 processed materials
- 服务产品 service

■ 工业背景

在21世纪初，我国和世界上各主要发达国家都已经把“**先进制造技术**”列为自己国家优先发展的战略性高技术之一。通常，先进制造技术主要是指**硬件产品**的先进制造技术和**流程型材料产品**的先进制造技术

流程型材料：气体、液体、粉体

■ 工业背景

- **在化学工业中**：约60%的产品的是粉体，如果加上粉体悬浮在液体和气体中的产品，粉体和含粉体的产品可达80%，考虑粉体原料与中间产物，在化学工业中粉体的处理量可达粉体产品的3-4倍。

粉体涉及广泛的操作单元：存储、输送、混合、分级、分离、制粉、造粒、流态化等，涉及工程、力学、物理、化学、材料等学科的基础理论与技术。

■ 工业背景

20世纪80年代，美国一家咨询公司对美国和加拿大37家与粉体有关（原料和产品）的工厂作了调研，得到如下结论：

- **2/3工厂的运行负荷小于90%的设计负荷**
- **1/3工厂的运行负荷小于60%的设计负荷**
- **20世纪80年代与60年代的设计水平相当**

■ 工程应用

➤ 在工程领域中，粉体和散料的处理被称为粉体技术，是过程工业的重要组成

➤ 粉体材料性能的变化或转化：

粉碎、聚集、混合和偏析

单个颗粒加工

颗粒群加工

} 增加产品附加值

➤ 粉体的处理过程：存储与输送 ➡ 不增值但必不可少

2. 粉体工程：(powder technology)

a kind of technology and science emphasizes the preparation and characterization of powder, and powder-handling operation.

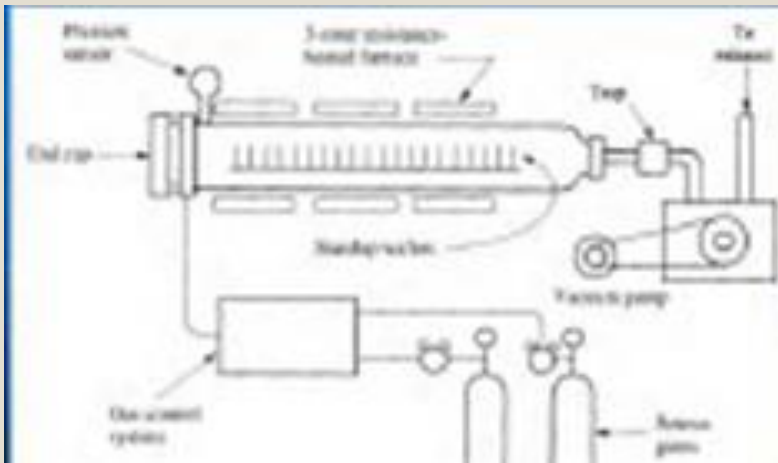
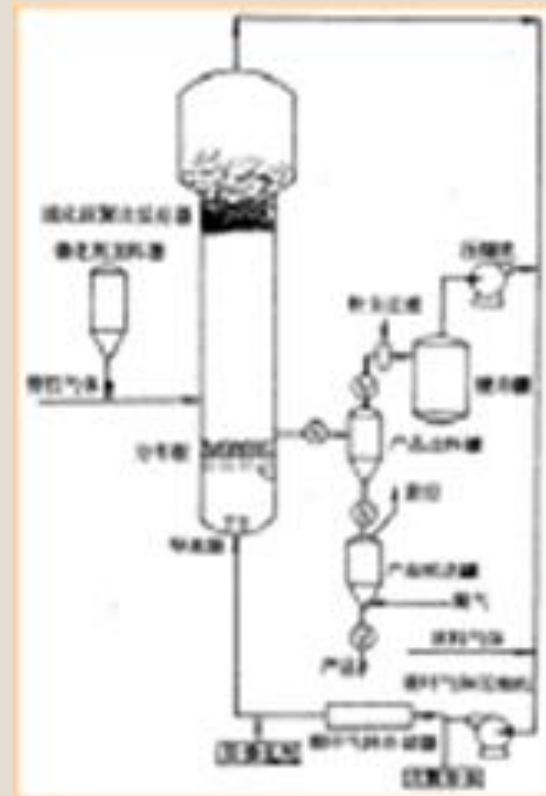
粉末制备，粉末检测，粉体加工过程单元操作

➤ 粉末制备:

流化床气相聚合工艺示意图

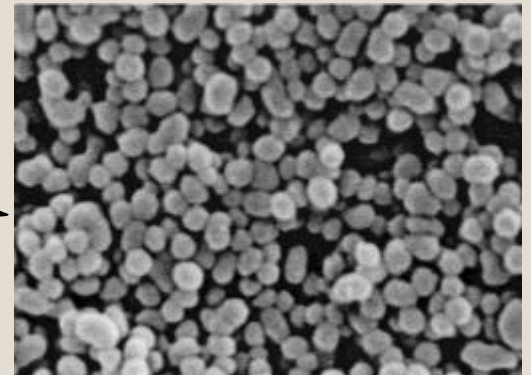


等离子体化学反应



低压CVD系统

ZrO₂粉末

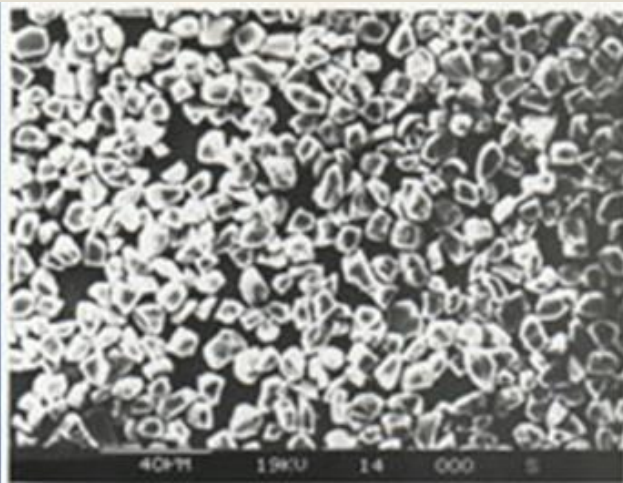


➤ 粉末检测：

粉末尺度（粒径与粒径分布、形状、比表面积）

粉体特性（流动性、粘性、堆积特性、压缩性、成形性）

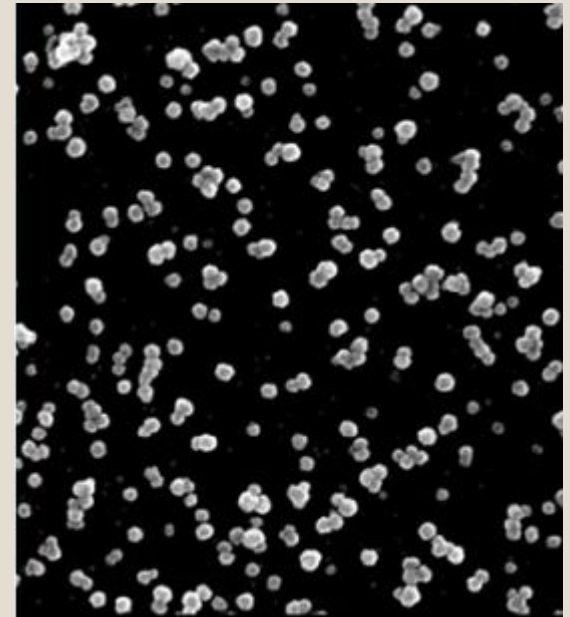
粉末物理化学性质（光、电、磁、生物、催化特性等）



球状纳米SiC



针状纳米SiC



纳米Au颗粒

➤ 粉末加工过程单元操作：



粉碎-分级-收尘



粉碎-收尘

粉体工程涉及领域：

- 矿业资源：无机矿物资源等
- 陶瓷材料：氧化铝、氧化锆陶瓷等
- 化学工业：催化剂等
- 冶金工业：粉末冶金材料等
- 电子材料：集成电路基板
- 军事领域：固体推进剂
- 机械工业：磨料，润滑剂

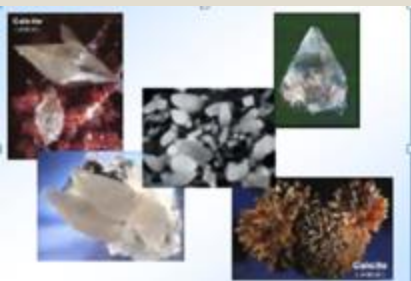
洲际导弹固体推进



高温电路基板



航天飞机



矿物晶体



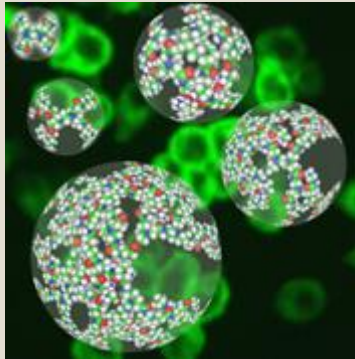
氧化铝陶瓷



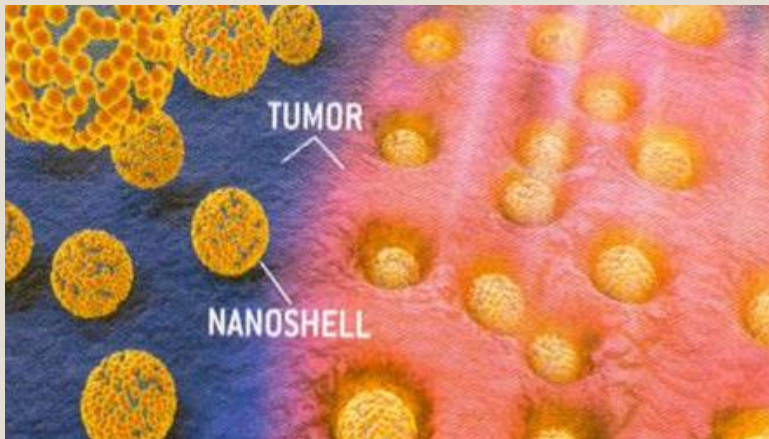
高导热BeO陶瓷

粉体工程发展趋势：

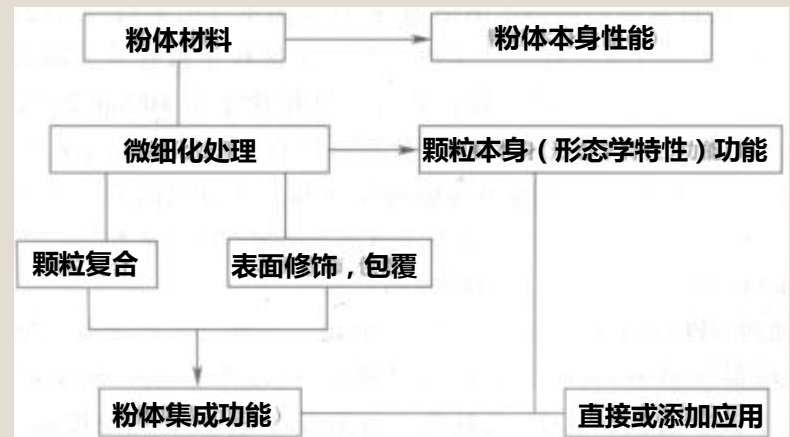
- 向生命科学、环境保护、信息工程领域延伸
- 粉体的微细化与功能化
- 粉体的深加工与装备现代化



肿瘤靶向治疗



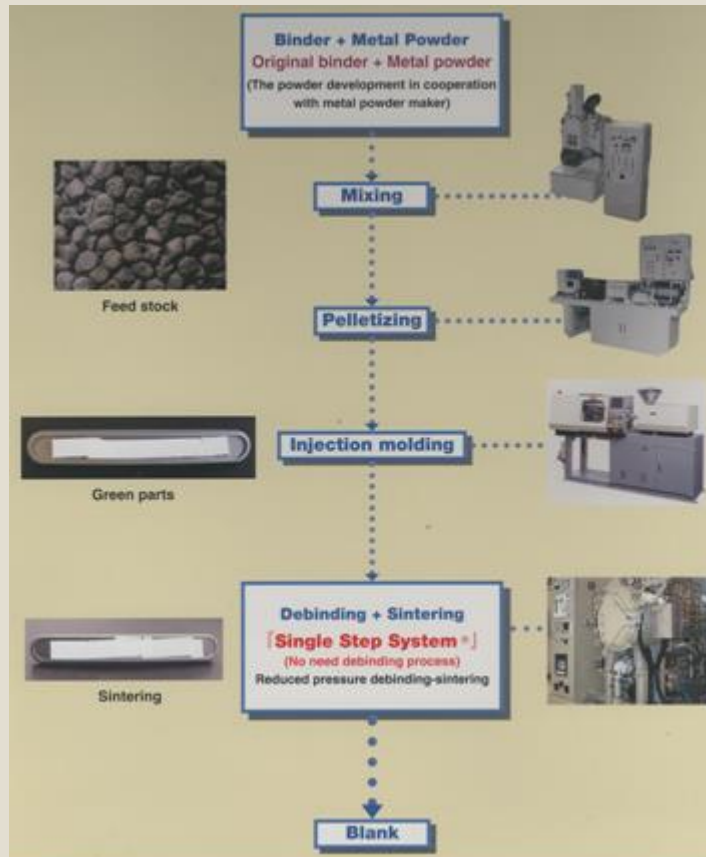
喷射气流粉碎



粉体功能化示意图

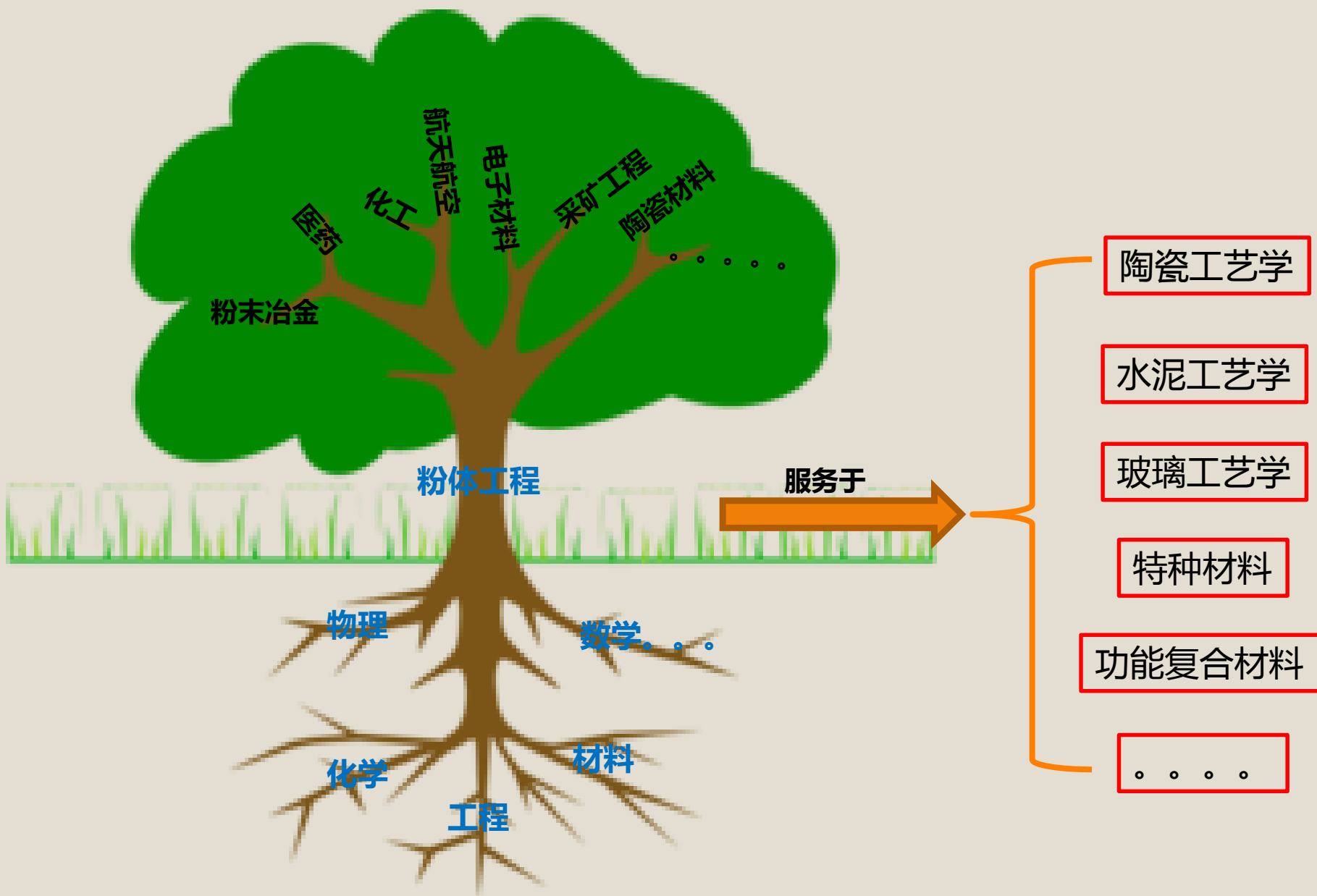
我国粉体工业特点和差距

- 原材料丰富、市场大
- 较大的规模产量
- 品种单一、性质不稳定、特别是不能满足高端市场的要求



ZrO₂陶瓷插芯毛坯（素管）
生产工艺流程及设备

课程内容回顾



本课程主要内容:

- Particle characterization and measurement (粉末表征与测量)
- Preparation and modification of powder (粉末制备与改性)
- Powder equipment (粉体处理相关设备)

章次	内容	实验时数
一	粉体颗粒性质及测量	实验一 实验二 实验三
二	超细粉体制备技术	
三	超细粉体分散与表面改性	
四	筛分与分级	
五	分离与收尘	
六	粉体输送与仓储	
七	粉体爆炸与安全防护	

第一章 粉末的性能与表征

(Properties and characterization of powders)

- Particle size (颗粒尺寸)-----size measurement
- Particle shape(颗粒形状)
- Bulk properties of particles(粉体堆积特性)

本章概要

- 什么是粒径？
- 一群颗粒怎样来表示其粒径
- 一群颗粒的粒径能否进行计算
- 如何计算其粒径
- 不同粒径测量方式的原理及特点
- 粉体的特性及其应用实例

1.1 颗粒尺寸 (particle size)

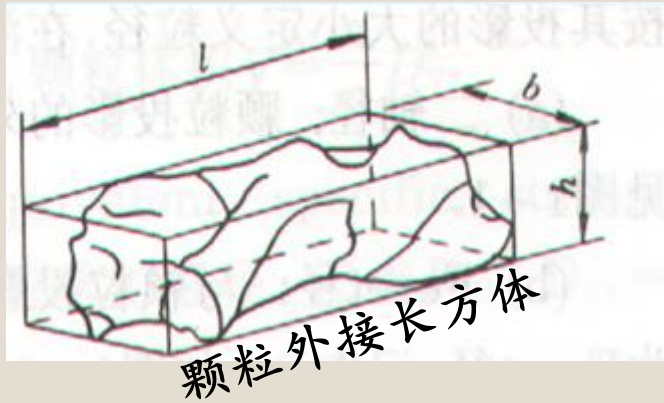
相关定义(definition)

- Powder: 粉末、粉末体、粉体 — the aggregate system consists of lots of solid particles and porous between the particles
- Powder particles: 粉末颗粒、颗粒 — the littlest unit of individuals which compose powder, usually less than 100 nm
- Particle diameter or particle size: 粒径、粒度 — Expressions of individual particle size are usually classified in terms of geometric characterization of its silhouette and a hypothetical equivalent sphere, cubic, rectangular prism with regard to some properties (在空间范围内所占据的线性尺寸, 可用其轮廓或其它性质相关的球体、立方体或四棱柱等几何特征值表示)

原级颗粒	聚集体颗粒	凝聚体颗粒	絮凝体颗粒
初始颗粒	二次颗粒	三次颗粒	液固分散介质

颗粒粒度表示方法

1. 三轴径：以长方体长、宽、高定义的粒度平均值



三轴径计算公式

序号	计算式	名称	物理意义
1	$\frac{l+h}{2}$	长短平均径 二轴平均径	二维图形算术平均
2	$\frac{l+b+h}{3}$	三轴平均径	三维图形算术平均
3	$\frac{3}{\frac{1}{l}+\frac{1}{b}+\frac{1}{h}}$	三轴调和平均径	与外接长方形比表面积相同的球体直径
4	\sqrt{lb}	二轴几何平均径	平面图形上的几何平均
5	$\sqrt[3]{lbh}$	三轴几何平均径	与外接长方形体积相同的立方体的一条边
6	$\sqrt{\frac{2lb+2bh+2lh}{6}}$	三轴等表面积平均径	与外接长方形比比表面积相同的立方体的一条边

三轴等表面积平均径

例二：三轴等表面积平均径
设一立方体的边长为 a ，其表面积为 $6a^2$ 。
设一长方体的长、宽、高分别为 a 、 b 、 c ，其表面积为 $2(ab+bc+ca)$ 。
设一球体的半径为 r ，其表面积为 $4\pi r^2$ 。
若立方体、长方体、球体的表面积相等，即
 $6a^2 = 2(ab+bc+ca) = 4\pi r^2$ ，
则可求得 a 、 b 、 c 、 r 之间的关系。
若立方体、长方体、球体的体积相等，即
 $a^3 = abc = \frac{4}{3}\pi r^3$ ，
则可求得 a 、 b 、 c 、 r 之间的关系。
若立方体、长方体、球体的密度相同，即
三者具有相同的密度 ρ ，
则可用球体的直径表示颗粒的平均径

颗粒粒度表示方法

2. 球当量径：按某种特性与球形颗粒相类比所得到的粒径——
体积球当量径、表面积球当量径

3. 圆当量径：对于薄片状二维颗粒，常用于圆形颗粒相类比的方法得到的粒径——等投影面积圆当量径、等周长圆当量径

投影径（统计平均径）：

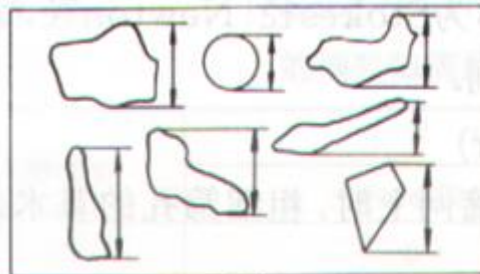
➤ **Feret diameter (a):** 在特定方向与投影轮廓相切的两条平行线间距 (d_F)

➤ **Martin diameter (b):** 在特定方向将投影面积等分的割线长 (d_M)

➤ **Krumbein diameter (c)(定方向最大直径):** 最大割线长

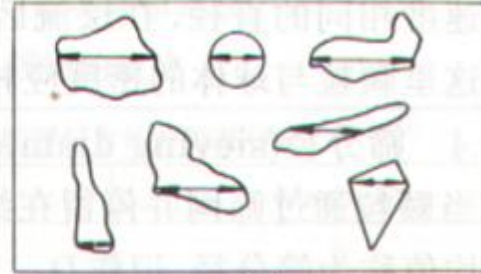
➤ **Heywood diameter (d)(投影面积相当径):** 与投影面积相等的圆直径

Feret径



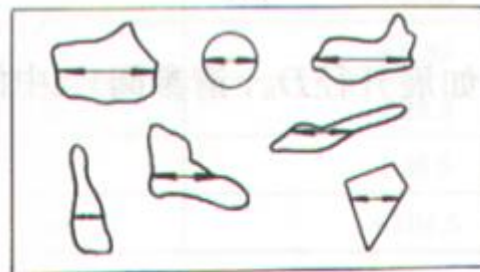
(a)

Martin径



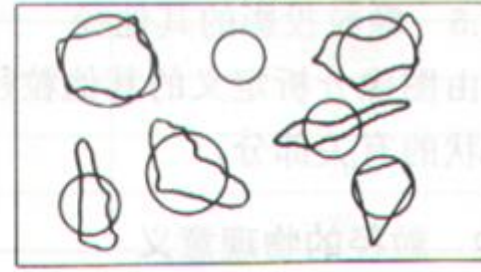
(c)

定方向最大径



(b)

投影面积相当径



(d)

不同基准的粒度分布

(size distribution of other basis)

➤ **频率分布(frequency distribution)**：在粉体样品中，某一粒度大小 (D_p) 或某一粒度大小范围内 (ΔD_p) 的颗粒在样品中出现的百分含量，即为频率，用 $f(D_p)$ 表示

$$f(D_p) = \frac{n_p}{N} \times 100\%$$

➤ **累积分布(cumulative distribution)**：把不同尺寸颗粒的频率分布按一定的方式累积，将得到相应的累积分布图——筛下累积分布 $D(D_p)$ 和筛上累积分布 $R(D_p)$

$$D(D_p) + R(D_p) = 100\%$$

$$D(D_p) = \int_{D_{\min}}^{D_p} f(D_p) dD_p$$

$$R(D_p) = \int_{D_p}^{D_{\max}} f(D_p) dD_p$$

数据分析示例

(example of size analysis data)

Data obtained		Data reduction						
Size interval (μm)	Number measured, Δn	Size range, ΔD_p (μm)	Mean of size interval, D_p (μm)	$q_0(D_p)$				Cumulative percent, Q_0 (%)
				$\frac{100\Delta n}{N}$ (%)	$q_0 = \frac{100\Delta n}{N\Delta D_p}$ (%/μm)	$\Delta \ln D_p$	$\frac{100\Delta n}{N\Delta(\ln D_p)}$	
0-0.2	10	0.2	0.1	1	5	—	—	1
0.2-0.4	80	0.2	0.3	8	40	0.693	11.5	9
0.4-0.6	132	0.2	0.5	13.2	66	0.405	29.3	22.2
0.6-0.8	142	0.2	0.7	14.2	71	0.288	49.3	36.4
0.8-1.0	138	0.2	0.9	13.8	69	0.223	61.9	50.2
1.0-1.2	112	0.2	1.1	11.2	56	0.182	61.5	61.4
1.2-1.4	75	0.2	1.3	7.5	37.5	0.154	48.7	68.9
1.4-1.6	65	0.2	1.5	6.5	32.5	0.134	48.5	75.4
1.6-1.8	52	0.2	1.7	5.2	26	0.118	44.0	80.6
1.8-2.1	65	0.3	1.95	6.5	21.7	0.154	42.2	87.1
2.1-2.7	62	0.6	2.4	6.2	10.3	0.251	24.7	93.3
2.7-3.6	32	0.9	3.15	3.2	3.6	0.288	11.1	96.5
3.6-5.1	35	1.5	4.35	3.5	2.3	0.348	10.1	100

Note: $\Sigma \Delta n = N = 1000$.

测量的数据

数据处理

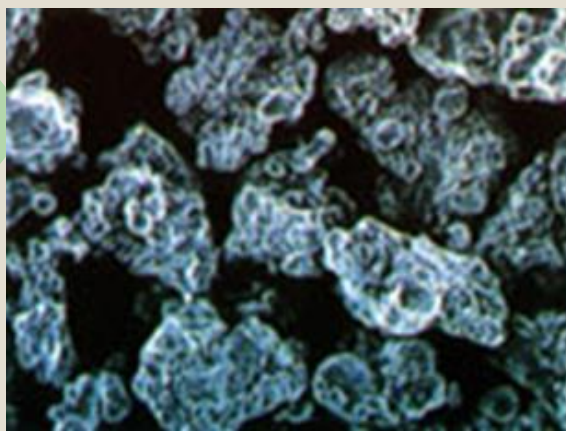
曲线由矩形顶部中点的连线组成，显然只有在 Δd 足够小时才有意义，否则，就用直方图表示其粒度分布

1.2 颗粒形状 (particle shape)

相关定义(definition)

● 颗粒形状是指一个颗粒的轮廓边界或表面上各点所构成的图像，它是除粒度外颗粒的另一重要的几何特征。

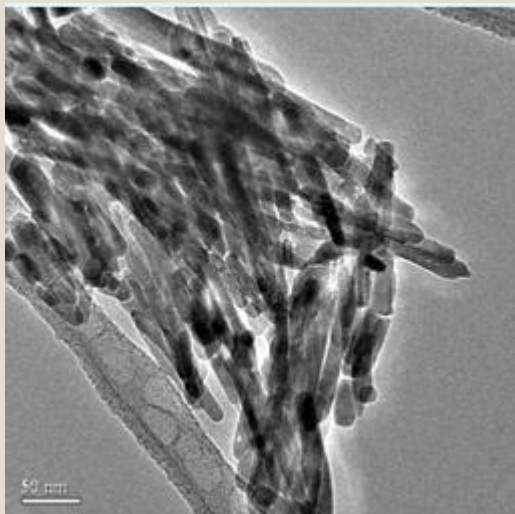
还原铁粉
SEM图



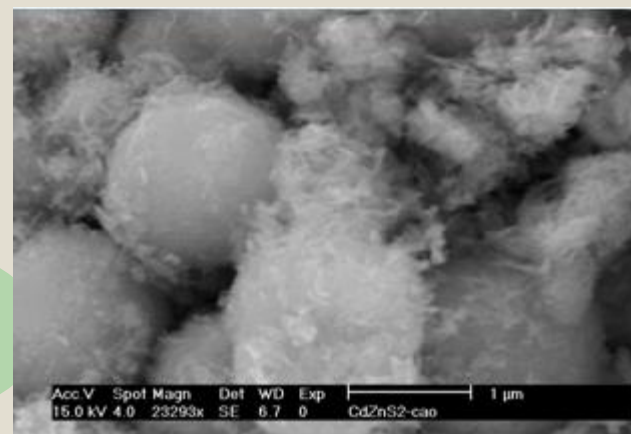
球形铜粉
光镜图



磷酸镧
TEM图



球形CdS
SEM图



➤颗粒形状对粉末性质的影响：

粉末比表面积，流动性，压缩性，固着力，填充性，研磨特性，同时影响混合，储运，运输，压制和烧结等单元过程。

表 1-7 一些工业产品对颗粒形状的要求

序号	产品种类	对性质的要求	对颗粒形状的要求
1	涂料、墨水、化妆品	固着力强、反光效果好	片状颗粒
2	橡胶填料	增强性和耐磨性	非长形颗粒
3	塑料填料	高冲击强度	长形颗粒
4	炸药引爆物	稳定性	光滑球形颗粒
5	洗涤剂 and 食品工业	流动性	球形颗粒
6	磨料	研磨性	多角状

颗粒形状的表达方式：一

➤ 颗粒形状的基本术语

球形 spherical	粒状 granular
立方体 cubical	棒状 rodlike
片状 platy, discs	针状 needle-like
柱状 prismoidal	纤维状 fibrous
鳞状 flaky	树枝状 dendritic
海绵状 spongy	聚集体 agglomerate
块状 blocky	中空 hollow
尖角状 sharp	粗糙 rough
园角状 round	光滑 smooth
多孔 porous	毛绒 fluffy, nappy

颗粒形状的表达方式：二

➤ 形状指数

将表示颗粒外形的几何量的各种无因次组合成为形状指数，它是对单一颗粒本身几何形状的指数化。

➤ 类别

- ◆ 与外形尺寸相关的形状指数
- ◆ 与颗粒投影周长相关的形状指数
- ◆ 与表面积和体积相关的形状指数

◆与三维尺寸相关的形状指数

length L, breadth B, thickness T, and so on.

- flatness=B/T (扁平度)
- Elongation=L/B (长短度)
- zig's index =LT/B²
-

◆与周长相关的形状指数

- 圆度
- 粗糙度
- 褶皱度

◆与表面积和体积相关的形状指数

- 表面指数
- 球形度
- 面积填充度
- 体积填充度

形状系数 (shape coefficient)

◆ 定义

在表征粉体性质、具体物理现象和单元过程等函数关系时，把颗粒形状的有关因素概括为一个修正系数加以考虑，该系数即为形状系数。

◆ 意义

- 形状系数是用来衡量实际颗粒与球形（立方体等）颗粒形状的差异程度，比较的基准是具有和表征颗粒群粒径相同的球的体积，表面积，比表面积与实际情况的差异。

1.3 粒径测量 (size measurement)

a. 显微镜观察法



光学显
微镜



光镜-图
像分析仪



扫描电子
显微镜-
SEM



透射电子
显微镜-
TEM

➤ 显微观察分辨率

Optical microscopy: $>1\mu\text{m}$

Scanning electron microscopy: $>1\text{nm}$

Transmission electron microscopy: $>0.1\text{nm}$

➤ 显微观察的期望标准偏差

$$S(x) = \sqrt{x(100-x) / y}$$

◆ **x**: 某一尺寸分布范围占颗粒总数比例;

◆ **y**: 所有尺寸分布范围内颗粒总数

➤ 需观察的最少颗粒数

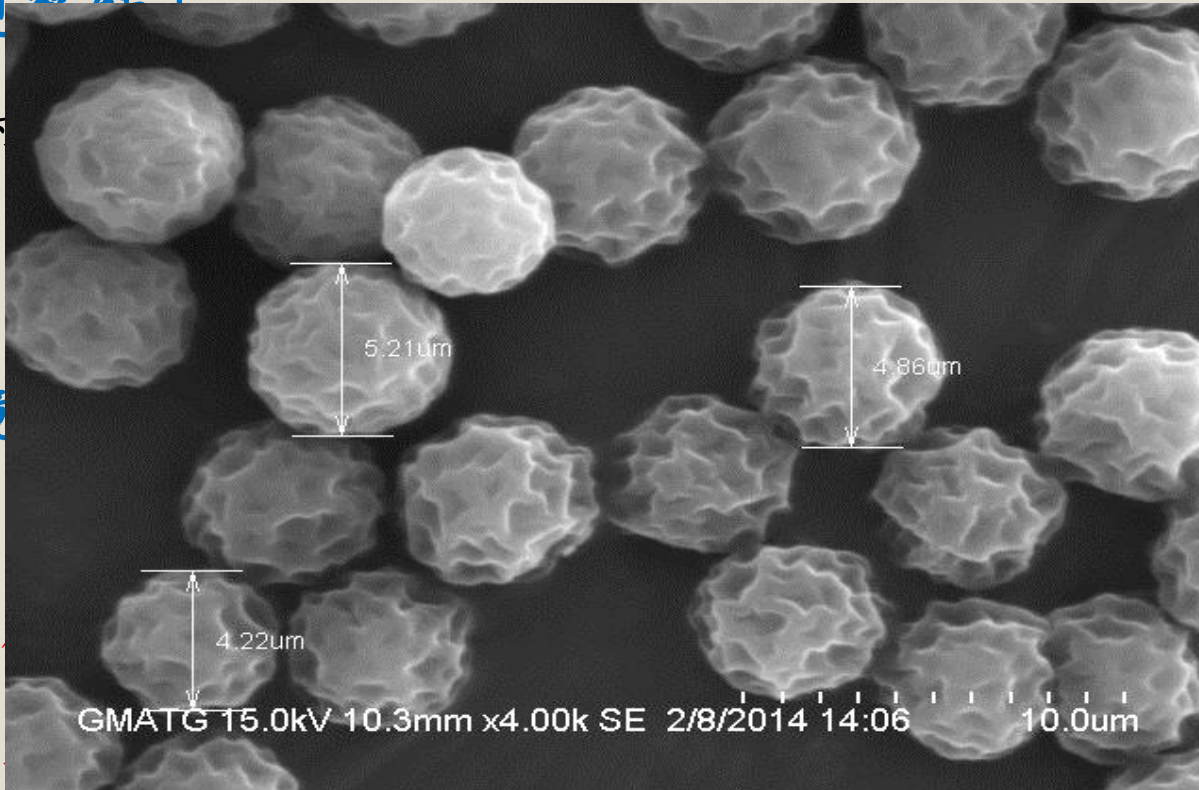
当x值为50时，标准偏差最大，为了保证标准偏差值小于2%，一般要求最少测量颗粒数不得少于625个。

➤ 显微镜观察上

直观的对
疏松等)

➤ 显微镜

取
光
透



结构（孔隙

扫描电镜：1nm，30万倍

➤ 制样

◆ 光学显微镜

- (a) 干法：粉末分散在载玻片上
- (b) 湿法：低浓度的粉末悬浮液，超声分散

◆ 扫描电镜

- (a) 干法：用牙签沾取少量粉体，将粉体轻轻粘附与导电胶表面
- (b) 湿法：将少量粉体分散于溶液中（水、乙醇），超声分散后，溶液仍需保持一定的透明性，随后将分散液滴至导电胶表面，常温烘干

◆ 透射电镜

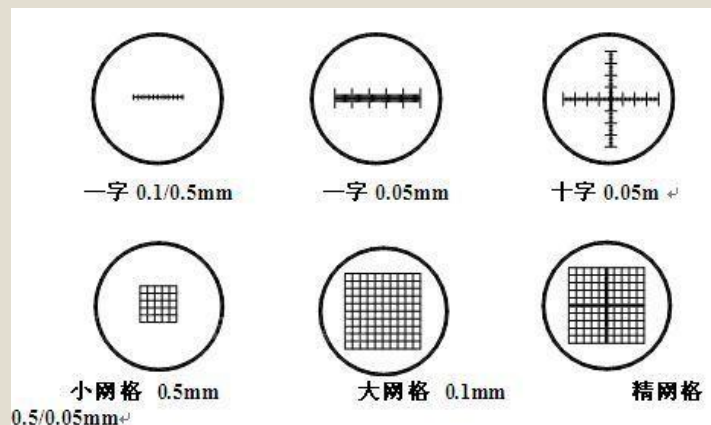
制备方法与扫描电镜湿法样品相似，但要严格控制粉体浓度，将分散液滴至铜网表面，常温烘干。

➤ 分散液

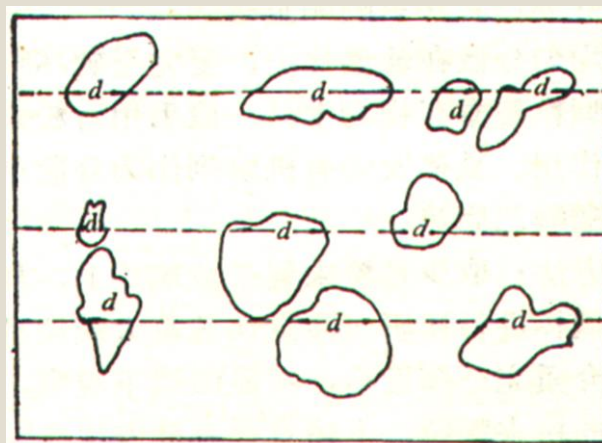
- ◆ 能够很好的润湿粉末
- ◆ 不与粉末反应
- ◆ 易挥发

➤ 测量方法

◆ 常用放大倍数200-600，目镜测微尺校准，常用的目镜测微尺有直线测微尺和网格测微尺

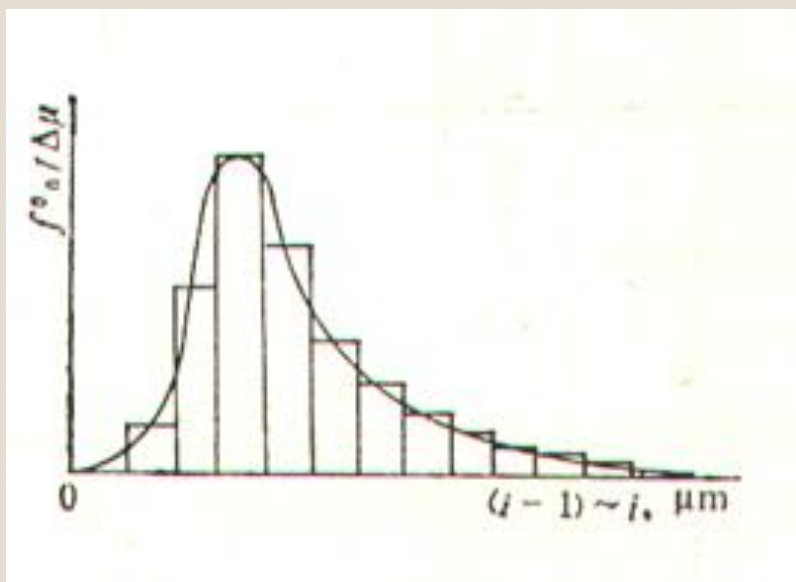


◆ 读取方法：Feret径、Martin径，或某一直线线切割，分10-20个粒径级，测量数目 ≥ 600 个

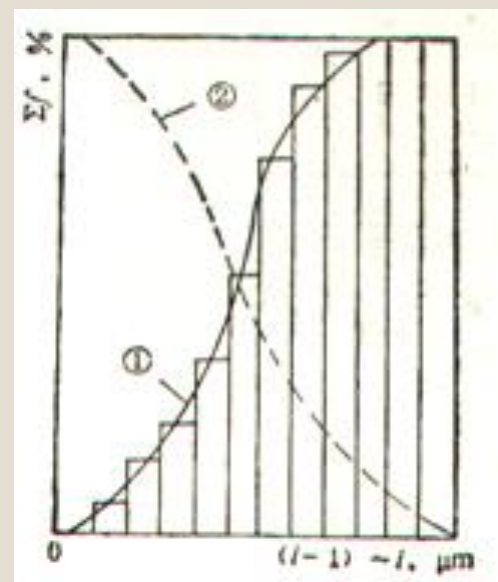


线性切割
线测量粒度

➤ 获得的结果



频率分布图



累积分布图

b. 筛分法

➤ 定义

利用筛孔尺寸由大到小组合的一套筛，借助振动将粉末分成若干等级，称量各级粉末重量，即可计算用重量百分数表示的粒度组成。

➤ 度量

筛孔的孔径和粉末的粒度可以用微米（毫米），或目数表示。所谓目数是指筛网1英寸（25.4mm）长度上筛网内的筛孔数，如100目的筛子表示每英寸筛网上有100个筛孔，目尺寸与网孔尺寸以及丝直径有关。

➤ 筛分终点

每分钟通过最大组分筛面上的筛分量小于样品量的0.1%时为筛分终点

➤ 套筛标准

◆ 美国Tyler标准：以目为单位

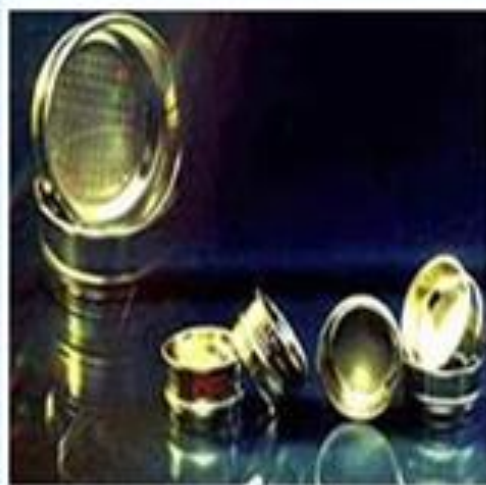
基筛200目(0.074 mm),基本系列按2的开方数列给出, 如 $200 \cdot 2^{n/2}$, $n=1,2,3,\dots$

附加系列按2的开四次方数列给出, 即 $200 \cdot 2^{n/4}$, $n=1,2,3,\dots$

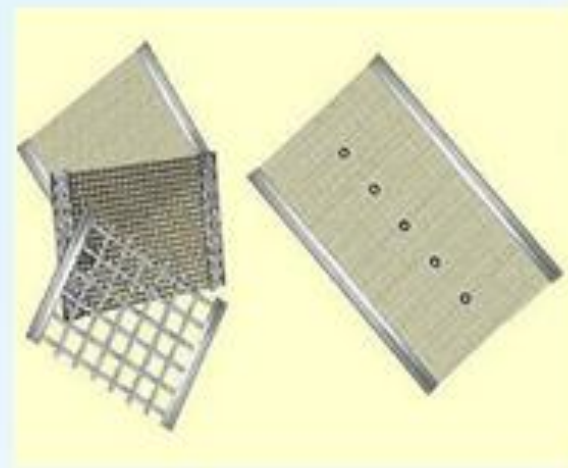
◆ 国际ISO标准：直接给出筛孔尺寸



振动筛装置



各种筛子



各种规格筛网

c. 沉降法

➤ **基本原理:** 密度为 ρ_0 , 粒径为 D , 质量为 m 的球形颗粒在介质密度 ρ_t , 粘度为 η 的无限容积中作沉降运动, 且需符合以下假定。

- ◆ 颗粒为刚性球体
- ◆ 颗粒沉降时互不干扰
- ◆ 颗粒下降时作层流流动
- ◆ 容器体积无限大且无温度梯度

➤ **颗粒运动方程:** 令颗粒在任一瞬间的沉降速度为 u , 颗粒沉降时作用在颗粒上的力有三个, 方向向下的重力 W , 方向向上的浮力 F_a , 与沉降速度相反的流体阻力 F_d , 此时, 颗粒运动的方程可写为:

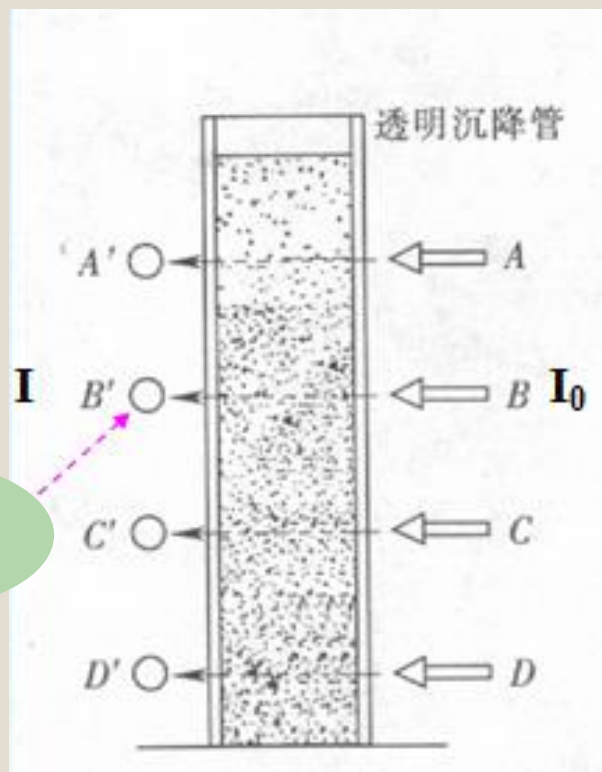
$$W - F_a - F_d = m \cdot du/dt$$

当沉降速度增加到一定值时, 三力平衡, $du/dt=0$, 颗粒以一个平衡速度下降:

$$\text{最终沉降速度: } u_{st} = gD^2(\rho_0 - \rho_t)/18\eta$$

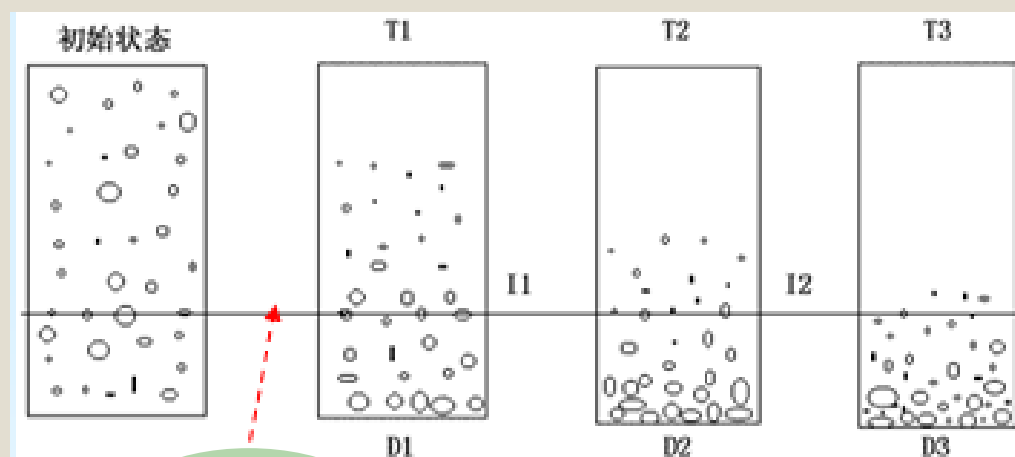
➤重力沉降光透法基本原理

建立在stokes和lambert-beer定律基础上。



光透过法原理

沉降法颗粒沉降状态示意图



测量位置

测量光强随时间变化的信号

➤重力沉降光透法公式的导出

◆沉降初期光束所处平面颗粒处于动态平衡状态

◆当悬浮液中存在的最大颗粒(粒径为 d_m)平面穿过光束平面后, 该平面上不再有相同大小的颗粒来代替, 这个平面的浓度也开始随之减少, 因此, t 时刻高度为 h 处只含有小于 d_{st} 的颗粒, 由stokes公式定律给出

$$d_{st} = \sqrt{18\eta h / (\rho_0 - \rho_t) g t}$$

◆通过颗粒悬浊液的透过光量服从兰伯特-比尔(lambert-Beer)定律,

$\ln(I_0/I) = K \cdot A \cdot c$ — 其中 K 为吸光度, A 为横截面积, c 为物质浓度

颗粒总截面积: $A = n\pi d_p^2/4$, 则 $\ln(I_0/I) = \pi k_0 k' c n d_p^2/4$

若颗粒体系 $d_1 < d_2 < \dots < d_i < \dots < d_n$, d_i 粒径的颗粒有 n_i , 则有:

$$\ln(I_0 / I_n) = k_o c \sum_{i=1}^n (k_i \phi_i n_i d_i^2)$$

颗粒按从大到小一次从测量面上消失: d_n, d_{n-1}, \dots, d_1

相应的透光量: $I_{n-1}, I_{n-2}, \dots, I_1$

Dn消失时: $\ln(I_0 / I_{n-1}) = k_o c \sum_{i=1}^{n-1} (k_i \phi_i n_i d_i^2)$

上式与初始状态相减: $\ln(I_{n-1} / I_n) = k_o c k_n \phi_n n_n d_n^2$

类推: $\ln(I_{i-1} / I_i) = k_o c k_i \phi_i n_i d_i^2$

.....

$$\ln(I_0 / I_1) = k_o c k_1 \phi_1 n_1 d_1^2$$

测量各式左侧值, 按下面关系求出粒径分布(式中 k_i, ϕ_i 为恒值)

$$\frac{\ln(I_{i-1} / I_i) d_i}{\sum_{i=1}^n [\ln(I_{i-1} / I_i) d_i]} = \frac{n_i d_i^3}{\sum_{i=1}^n (n_i d_i^3)}$$

➤ 离心力场沉降情况

性能指标：

◆ 测试范围：0.1-150 μm

◆ 测试方式：重力沉降、离心沉降、组合沉降



离心沉降粒度仪

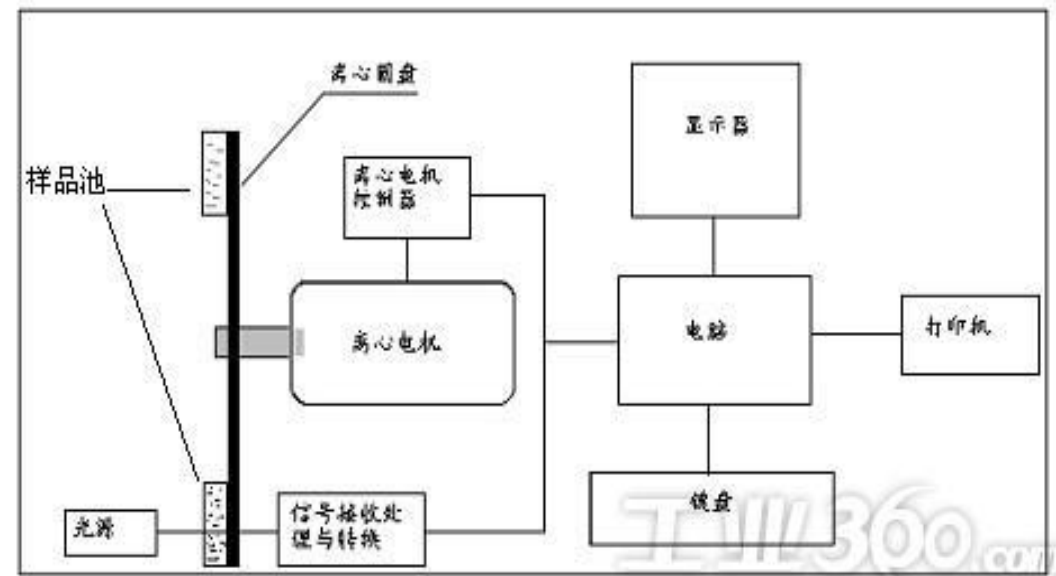
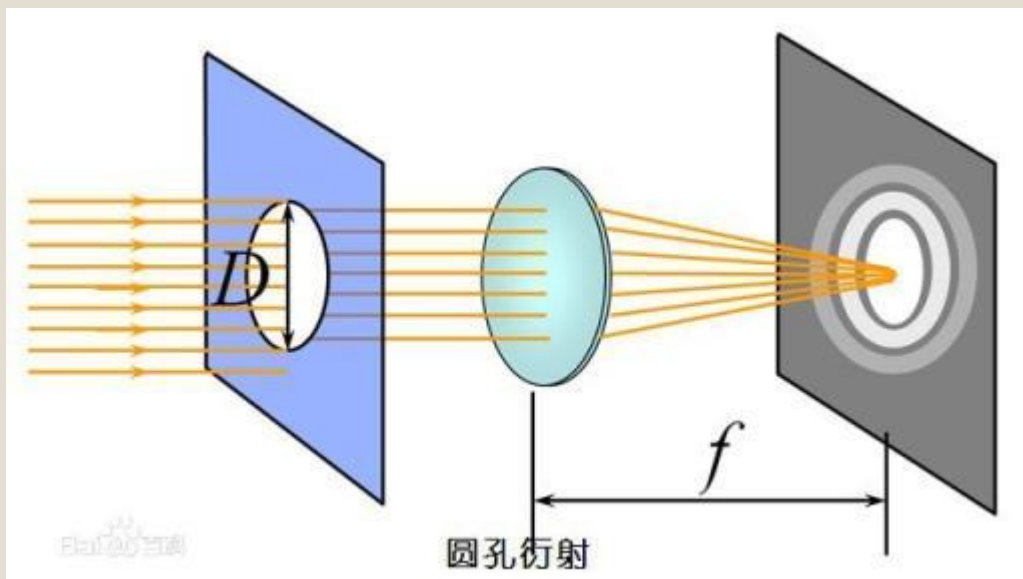


图12 BT-1500离心沉降式粒度仪结构示意图

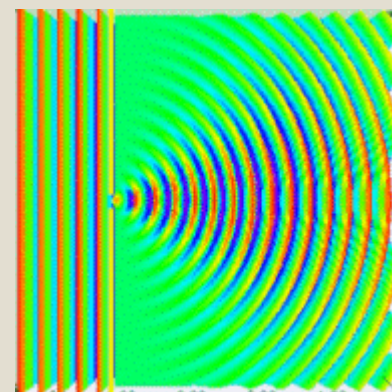
d. 激光衍射法

➤ 光的衍射现象

◆ 光在传播的过程中绕过障碍物的边缘而偏离直线传播的现象



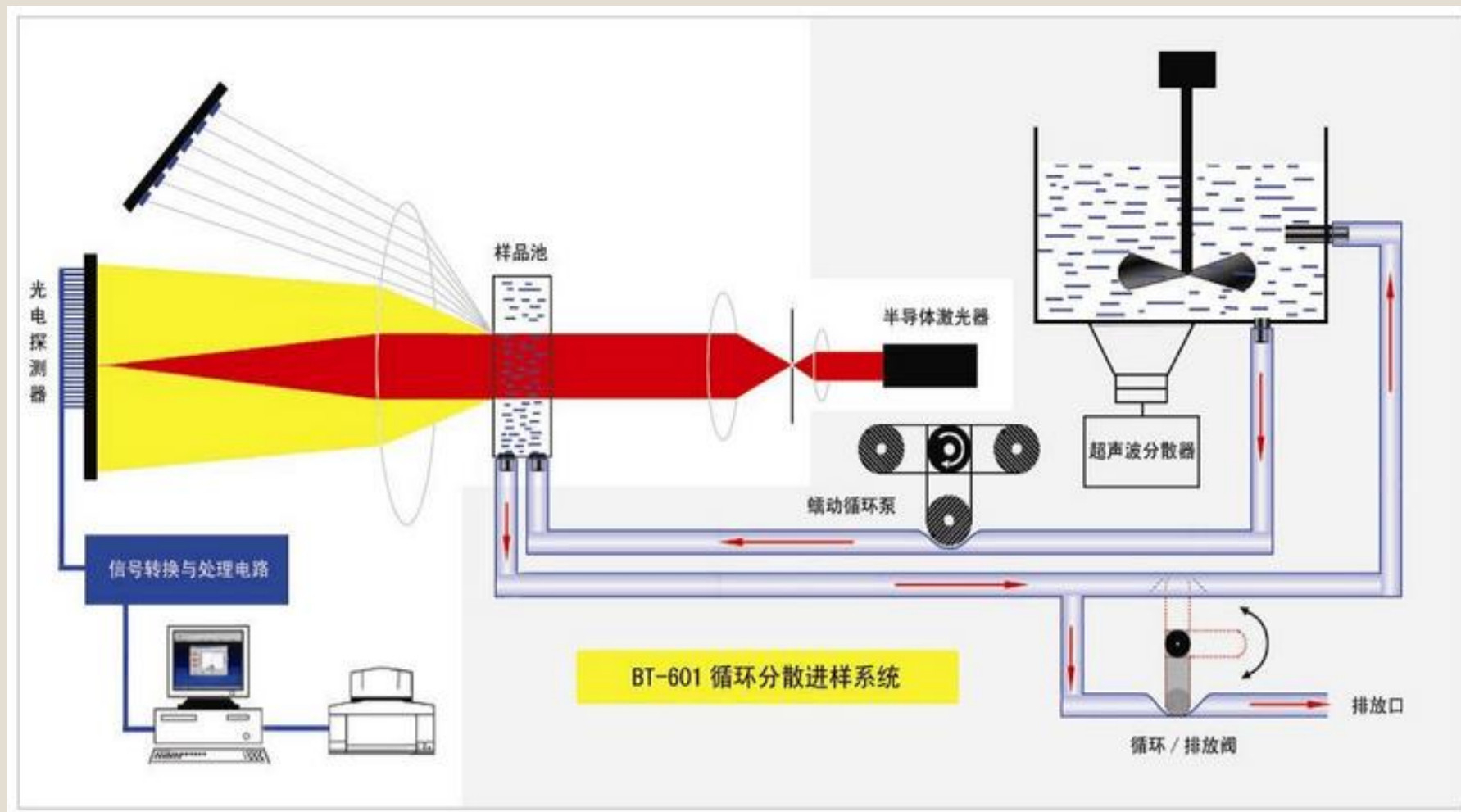
白光单缝衍射



圆孔衍射

光发生衍射后，能形成具有明暗相间的衍射图样，圆孔的衍射图样为一组圆环；狭缝的衍射图样是一组明暗相间的平直条纹。

➤小角激光衍射仪原理图



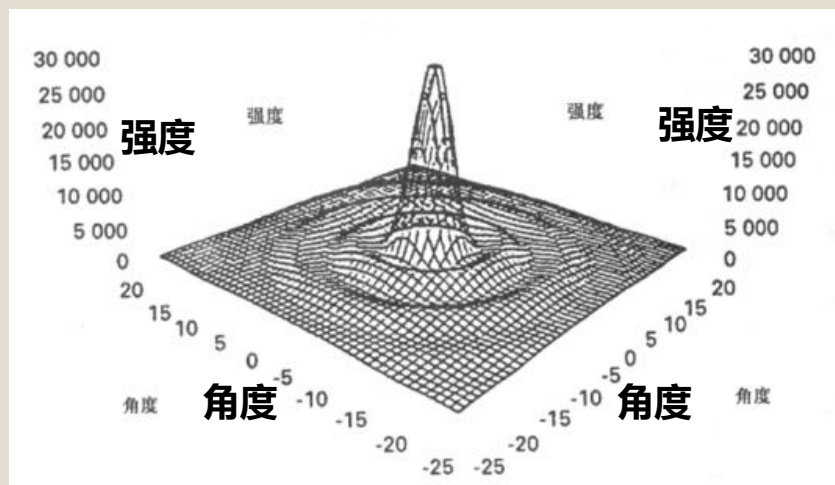
BT-9300H激光粒度仪原理

仪器原理与Airy图

◆当光束通过没有粒子存在的被测区时，在衍射场得到是一集中光斑，如果存在一个球形粒子则衍射图样为中心斑点和由中心向外围辐射的越来越弱的圆环。

◆当用激光照射系列尺寸的颗粒时也会发生类似的衍射现象，但是由于颗粒对于衍射的强度贡献不只一个圆环，因此这类衍射图案可用一个矩阵表示。

◆利用矩阵光电探测器计算探测信号的矩阵模型，它包括了单位粒径和单位体积的光衍射矢量，并计算出颗粒的粒径分布。



衍射强度与角度关系

e. 气体吸附法

➤ 气体吸附法基本原理

限定体系中，当物质表面吸附氮气时，引起测量体系中的压力下降，直到吸附平衡为止，测量吸附前后的压力，计算在平衡压力下被吸附的气体体积（标准状态下）以及BET等温吸附方程，计算试样单分子层吸附量，从而计算出试样的比表面积。

➤ BET方程

$$p/V(p_0 - p) = 1/V_m C + (c - 1)p/V_m C p_0$$

p : 吸附平衡时气体压力; p_0 : 吸附气体饱和蒸汽压; V : 被吸附气体体积; V_m : 固体表面被单分子层气体覆盖所需气体体积; c : 常数。

粉末的克比表面积:
$$S = V_m N_A A_m / 22410W$$

A_m : 分子截面积; W : 吸附气体质量

➤ 容量法测定比表面积

➤ 气体透过法基本原理

流体通过粉末床的透过率或所受的阻力与粉末的粗细或比表面的大小有关。粉末越细，比表面愈大，对流体的阻力也越大，因而单位时间内透过单位面积流体量就越小。

➤ 柯青-卡门方程

假设前提：粉末床由球形颗粒组成；所有孔道均为圆柱形毛细管束；毛细孔平均半径 r_m 与颗粒间空隙体积对孔壁的总比表面积只成正比，即 $r_m = K_s$ (空隙体积/孔壁总面积)， K_s 与毛细孔截面的形状有关，流体流速与粉末比表面积或粒径间存在以下数学关系。

$$S_o = \sqrt{\frac{\square pgA\theta^3}{K_c Q_0 L \eta (1-\theta)^2}}$$

比表面平均径 d_m 表达式如下：

$$d_m = 6 \times 10^4 \times \sqrt{k_c Q_0 L \eta (1-\theta)^2} / \square pgA\theta^3$$

空气透过法的理论基础

f. 库尔特计数法（流体扫描，coulter counter）

➤ 概念

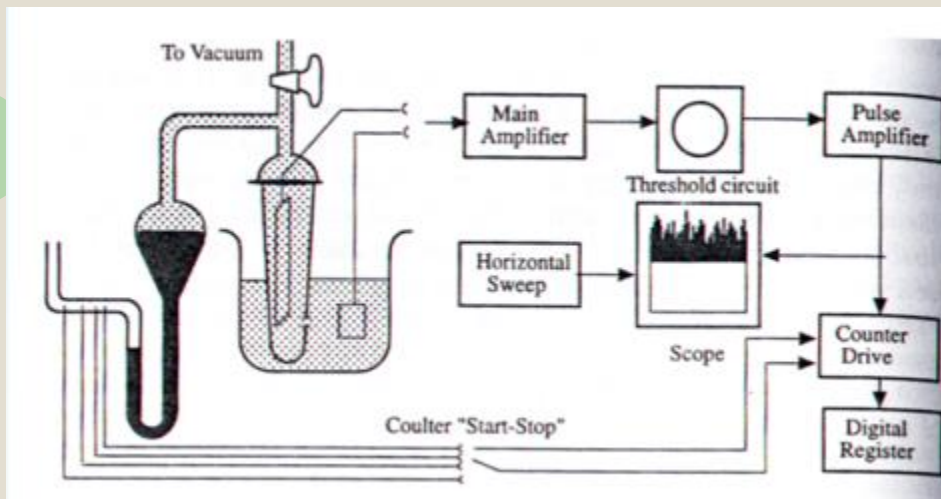
通过每个单个颗粒与外加场（电场、磁场）的作用来获得与尺寸相关的信号，只限于低浓度颗粒体系，且可测量液体、气体中的颗粒。

➤ 原理

颗粒分散在电解液中，已知尺寸的小孔插入悬浮液中，在小孔两端施加一电场，利用真空启动悬浮液流动，颗粒会一个个地通过小孔，从而造成电阻瞬时变化，产生电流、电压脉冲，其脉冲强度与颗粒体积成正比，根据脉冲信号可以计算出颗粒尺寸分布。

测试范围：0.6 ~ 1200 μm ；每个已知小孔可感知的尺寸范围为计数孔径的2% ~ 60%。

工作 原理



库尔特计数仪

测量方法的选择

➤ 粒度分布的范围

➤ 粒度的分散

➤ 基本的出发点

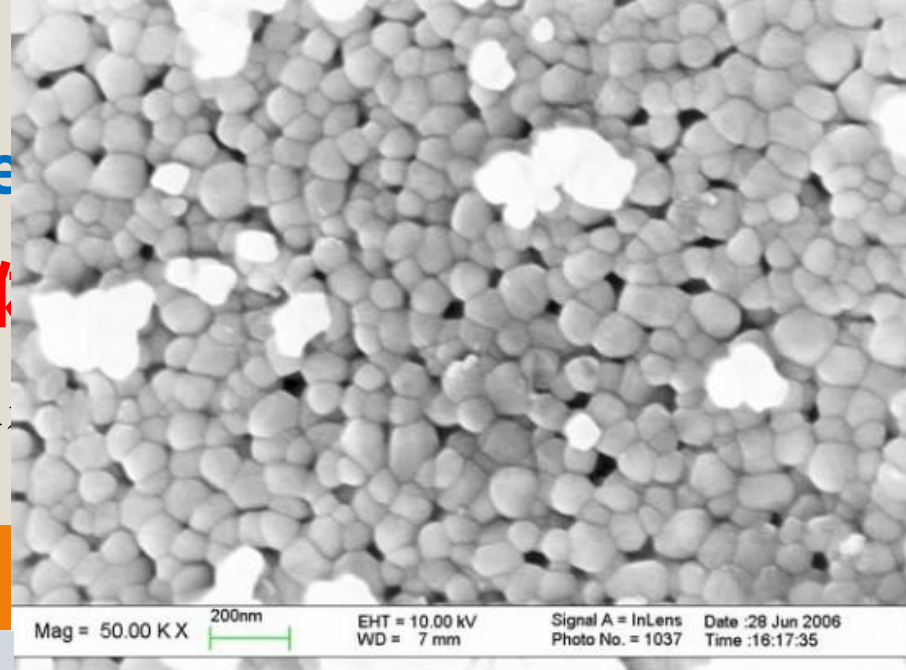
- ◆ 如要测形状，选用图像分析仪
- ◆ 如要测雾滴，选用激光法
- ◆ 如要测粒度，选沉降法或激光法
- ◆ 如要测比表面，可选选用BET或者流体透过法
- ◆ 如要测个数，则用coulter计数器

1.3 粉体性质 (properties)

1.3.1 粉体

➤ **孔隙率**：空隙体积占粉体表观体

$$\varepsilon = (V - V_p) / V$$

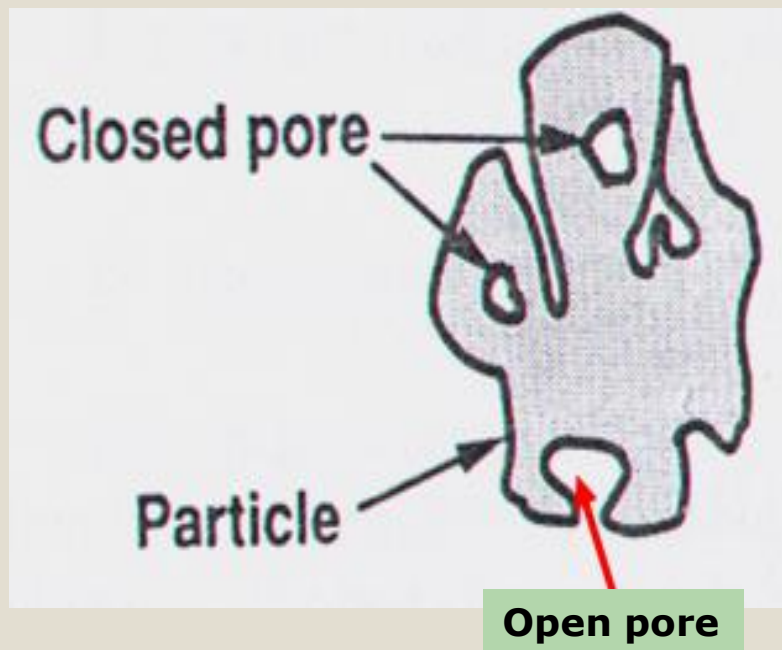


体积、颗粒所占据体积以及空

不考虑颗粒的孔隙，只反映颗

➤ 颗粒密度

- 真密度：材料在绝对密实的状态下单位体积固体物质的实际质量，即除去内部孔隙或者颗粒间空隙后的密度
- 颗粒密度：单位质量颗粒与其所占体积比值(体积中包含内孔)



●测量方法：比重瓶法

- ✓ 取20ml比重瓶一只，称取比重瓶质量 m_0
- ✓ 将比重瓶中灌满液体，质量为 m_l
- ✓ 将一定质量的粉体颗粒装入比重瓶中，称重得到 m_s
- ✓ 在含有固体颗粒的比重瓶中加满水，称重为 m_{sl}
- ✓ ρ_l 为液体密度

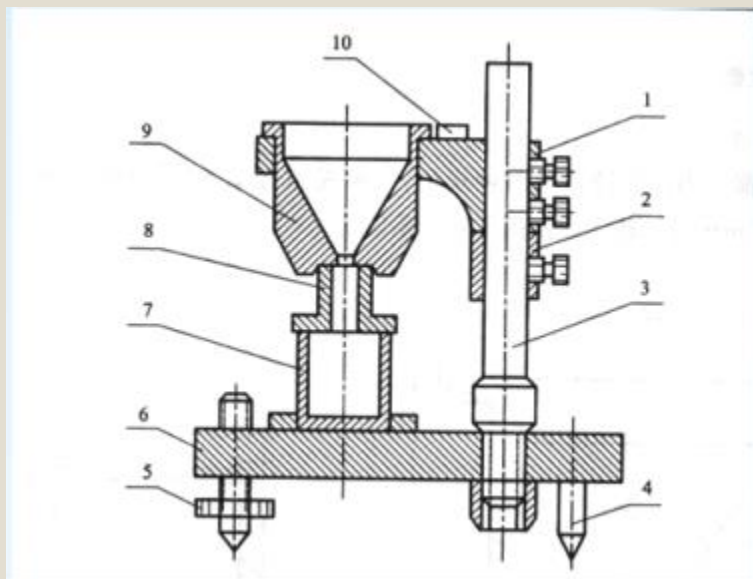
颗粒密度

$$\rho_s = \frac{\rho_l(m_s - m_0)}{(m_l - m_0) - (m_{sl} - m_s)}$$

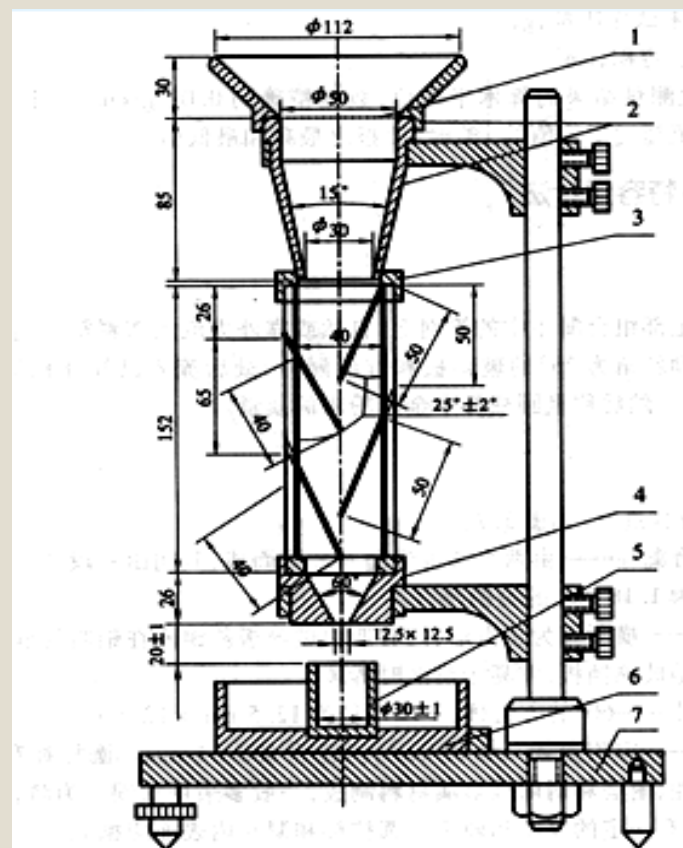
➤ 松装密度

● 松装密度又称为容积密度，是指在一定填充状态下，包括颗粒间全部空隙在内的整个填充层单位体积中颗粒的质量，它与颗粒物料的密度 p_p 和孔隙率 ε 有关： $p_v=(1-\varepsilon)p_p$ (p_v 与 p_p 分别为粉体表观密度和实际密度)

● 测量方法



漏斗法

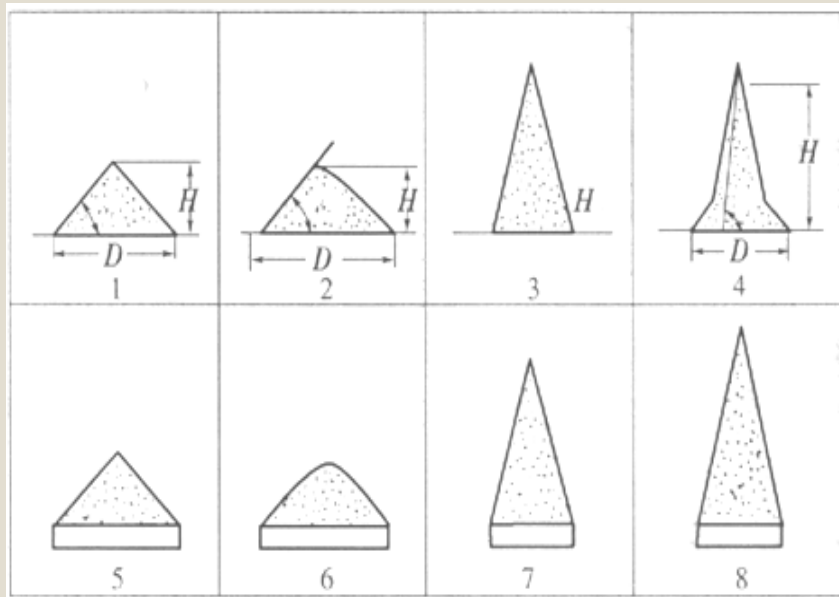


斯科特容量计法

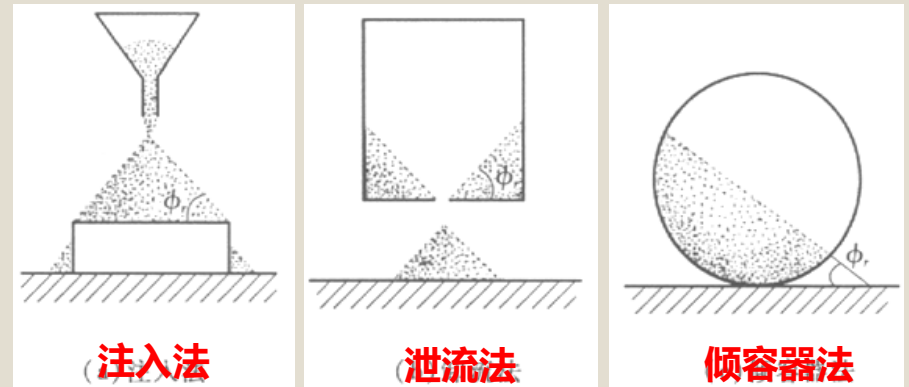
粉体摩擦性质

➤ 安息角

粉体自然堆积时的自由表面与静止平衡状态下的水平面所形成的最大角度。安息角可用来衡量和评价粉体的流动性，因此可将该角度视为粉体的粘度。



堆积角与排出角



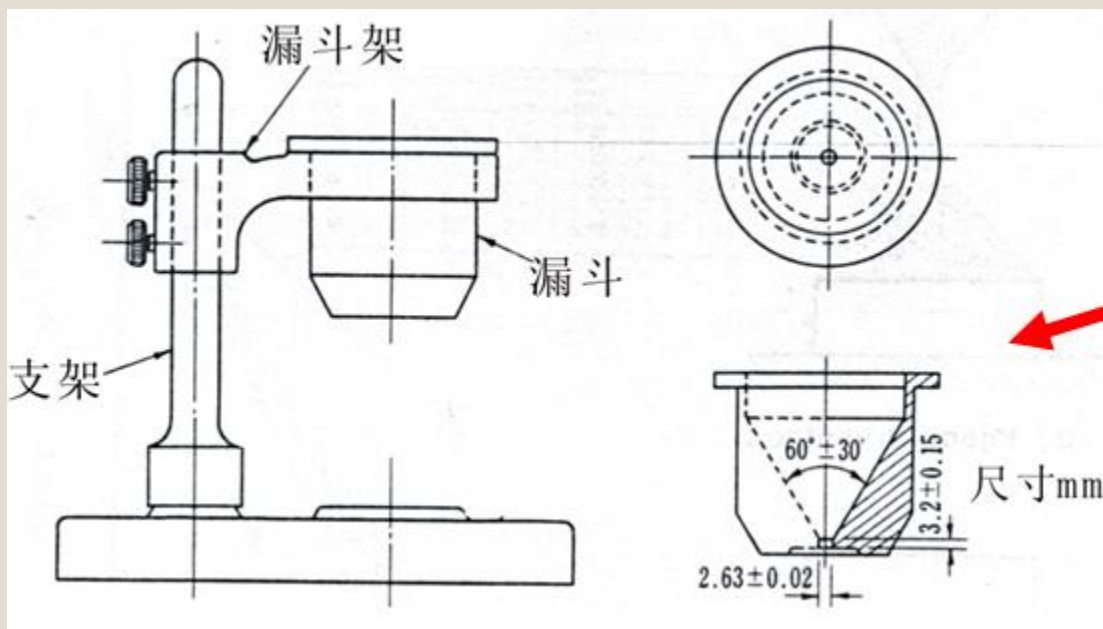
安息角的测量方法

粉体摩擦性质

➤ 流动性

粉体通过漏斗或者小孔的流动通常被表达为粉体的流动性，这种情况下，流速的大小与均匀性，以及堵塞的趋势都被看成流动性的标准，流动的方式以及分离状况也与粉体的流动性有关。

粉体流动性测量方法：50g粉体样品在重力作用下，从孔道流出的时间。



流动性测定

➤粉体压缩性与成形性

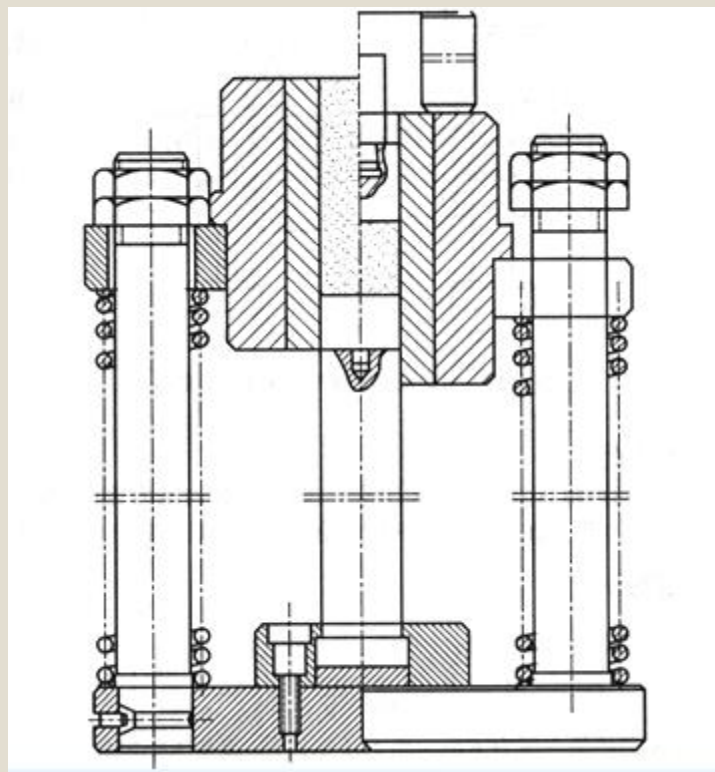
●压缩性

代表粉末在压制过程中被压紧的能力，在规定的模具和润滑条件下加以测定，用在一定单位压制压力（500MPa）下粉末所达到的压坯密度表示，通常也可用压坯密度随压制压力变化的曲线表示。

●粉末成形性

成形性是指粉末压制后，压坯保持既定形状的能力，用粉末得到成型最小单位压制压力表示，或者用压坯强度表示。

粉末成形性测定可对圆柱形样品进行轴向加压，记录压坯破裂载荷，以抗压强度表示粉体成形性，也可将成形的样品条通过三点弯曲法测定压坯抗弯强度



压缩性实验装置

作业

一、名词解释

1. 孔隙率
2. 真密度与颗粒密度
3. 安息角
4. 粉体成形性

二、论述题

- 1、粉体粒径的具体定义是什么？试对粉体粒径表示方法种类和定义进行阐述