



西安交通大学
xi'an jiaotong university

能源与动力工程学院
School of Energy & Power Engineering

<http://epe.xjtu.edu.cn>



气固两相流及其燃烧

西安交通大学能源与动力工程学院

主讲人：周屈兰

办公室：能源馆413

Email: qlzhou@mail.xjtu.edu.cn

Tel: 82665412(O) 13571995532(M)



研究生教学的思路:

六项能力:

理论推导
实验动手
工程实践
数值计算
数据采集与自动控制
中英文写作与语言表达

五种精神:

独立探索未知领域的精神
团队合作的精神
吃苦耐劳的精神
勇于面对挫折的精神
不拘一格解决问题的精神

全面的业务攻坚能力
优秀的社会适应能力



研究生个人素质的要求：理论推导

理论推导：分析研究对象，建立物理模型，对应物理模型建立数学模型，并使用数学工具完成数学模型体系的过程

- ⑩ 数学模型未必是百分之百精确的，但是必须可以（至少是可能）得到定量结果，完整描述研究对象的规律
- ⑩ 常用的数学工具：初等数学、高等数学（微积分学、微分方程求解）、线性代数（线性和非线性方程组求解）、解析几何，及其他必要的数学工具



研究生个人素质的要求：实验动手

实验动手：在实验室设计、建造、加工、安装、调试、运行、测试一个模拟物理过程（或模拟工业设备）的能力

- ⑩ 注意我们所讨论的实验能力与中学和本科阶段实验能力的差异：不仅仅是在一套现成的实验装置上使用现成的测量设备进行测量。
- ⑩ 经常被忽视的环节：场地的选取、物资的采购、加工安装的要求、工作周期的控制



研究生个人素质的要求： 工程实践

工程实践：设计工业设备，并到工程现场完成设备测试、诊断、调试、运行、改造的能力

- ⑩ 工业设备的设计，必须完全考虑用户的需求和具体操作能力。
- ⑩ 工程实践过程，非常注重安全性和经济性，同时对工作时间有严格的要求
- ⑩ 工程实践还与社会、市场紧密相关



研究生个人素质的要求：数值计算

数值计算：使用编程语言或者商用软件，求解物理问题的数学模型，从而获得有效结果的方法

- ⑩ 纯粹的数值计算：使用编程或者商用软件（比如Matlab）求解具体数学方程，通常解决单个数学问题
- ⑩ 数值模拟：使用大规模编程(Simple系列)或者商用软件（Fluent、Chemkin、ANSYS等），求解复杂完整的方程体系，实现对较为复杂和完整的过程的模拟，形成了一个“数字化实验平台”



研究生个人素质的要求：

数据采集与自动控制

数据采集与自动控制：本来是实验动手能力的一部分，但是，因为涉及较多的数字电路、非电量电测、计算机编程、自动控制方面的知识，所以单独提出来进行要求

- ⑩ 至少应该掌握团队常用的数据采集系统的性能，知道接线、安装、调试的方法
- ⑩ 能够参照以前的数据采集程序，自行编制或者改进数据采集软件
- ⑩ 会使用Labview等常用的数据采集、编程软件



研究生个人素质的要求： 中英文写作与语言表达

中英文写作与语言表达：这是一项极其重要的能力！是个人及其成果获取外界认可的主要渠道。

- ⑩ 通过文字和语言表述自己的思想和主要成果，实现与外界的交流互动。
- ⑩ 包括，学术论文的文字、格式、排版、图表、公式、参考文献的质量，PPT制作的水平，讲演和辩论的能力
- ⑩ 直接的成果：高水平的论文，高水平的讲座（答辩）



研究生个人素质的要求： 独立探索未知领域的精神

- ◆ 对科学问题、社会现象、人的言行，要有不受外界干扰的判断、分析和决策能力。
- ◆ 对自己的一切任务，要有“一人做事一人当”的不依赖（independence）心理。尤其是不能依赖教师、学长、同学来解决属于自己任务范围内的事情。
- ◆ 对自己的学术路线和个人发展，要有自己的独立规划和计划。
- ◆ 对任何新领域，要有“从头做起”的精神，这是创新能力的核心。



研究生个人素质的要求： 团队合作的精神

- ◆ 在独立意识之外，必须有团队意识。
- ◆ 团队意识的核心：没有人是无所不能的，没有人是一定正确的，没有人是可以不依靠他人就成功的。
- ◆ 本人与他人利益协调的意识
- ◆ 个人的准确定位
- ◆ 充分的沟通和表达能力



研究生个人素质的要求： 吃苦耐劳的精神

- ◆ 科研工作的任何一个环节，都比外人想象的艰苦，比电影电视上演的更艰苦
- ◆ 要做出得到大家认可的创新性成果，必须经历极其艰苦而漫长的学习、思考、实践、提升。
- ◆ 锅炉专业的实验工作，比其他专业更加辛苦。
- ◆ 当1%的灵感找到以后，剩下的就是99%的汗水了。



研究生个人素质的要求： 勇于面对挫折的精神

- ◆ 在科研工作中，挫折和暂时的失败是家常便饭。
- ◆ 如果你自己看不到正面的因素，外界不会自动给你正面的因素。如果你自己不相信自己，没有人会相信你。
- ◆ 信心不是来自于百战百胜，而是来自于无惧失败。
- ◆ 如果你不经常遇到挫折，表明你做的事情缺乏创造性。——伍迪·艾伦
- ◆ 我们唯一需要畏惧的，是“畏惧”本身。——温斯顿·丘吉尔



研究生个人素质的要求： 不拘一格解决问题的精神

- ◆ 遇到问题的时候，必须具备提出多种解决方案、灵活解决问题的能力。
- ◆ 解决问题的方法，是和问题一起产生的。——卡尔·马克思



研究生培养的标志性结果：

- ◆ 顺利、按时，获取学位
- ◆ 达成毕业后的目标（较好的工作岗位，继续深造等）
- ◆ 内在实力的实质性提升
- ◆ 外部成果的可见增长（较好的学习成绩，较多的文章、专利，获取高档次奖学金和其它奖项，获取更多的提升机会）



气固两相流主要研究的对象与目标：煤粉燃烧—气体颗粒流。扩展到广义的气固多相流及其化学反应过程。

- 煤粉在管道中的气力输送——大约1kg/kg
- 流化床中的气固两相流——大约10kg/kg
- 煤粉的沉积或粉仓中存储的煤粉——大约1000kg/kg——粉粒体力学
- 风沙——小于0.1kg/kg
- 粉尘污染——小于0.01kg/kg
- 流沙——大约2000kg/kg
- 沙石的风化
- 干法、半干法脱硫——化学反应
- 煤矿中煤层气及煤（气）的自燃、强迫点燃——燃烧
- 雪、冰雹的形成与运动——相变



- 暂时缺乏完整的体系，**本门课程的主要想法：**
- 以气体一颗粒流动为主要内容，强化常用、通用的基本概念；
- 以具体案例教学为思路（注重解决物理问题的能力）；
- 以数学模型和算法设计为主体（注重得到定量可用的结论）。



学习的过程：

- **完成基本的知识积累**——熟悉前人解决物理问题的方法，积累使用数学工具、实验手段的经验；
- **形成对问题的判断能力和分析能力**——知道如何简化物理问题，如何使用数学工具；或者如何设计实验来解决问题；
- **获得定量结果的能力**——如何求解各种方程，得到精确解、近似解、数值解；通过合理的测量方法，获得可信数据；
- **具备改进、创新物理模型和数学模型的创新能力；**
- **形成物理直觉**——“想象力比知识本身更重要”



讲课的方式:

- **讲课**——讲授一些因较多实践证明而比较公认或固定的成果;
- **自学**——掌握从文献及其它渠道获得知识和信息的能力;
- **分析**——亲手实践对问题的剖析和处理过程,掌握组织知识和信息的能力;
- **研讨**——进行学术的沟通、交流、争论,学习观点相同的知识、学习观点不同的知识;
- **上机**——编写程序,获得数值解,得到可以被使用的结果。



课程内容

- 第一章 绪论
- 第二章 颗粒特性
- 第三章 气固两相流中相间作用力
- 第四章 气固两相流的松弛过程
- 第五章 颗粒的沉降运动及终端沉降速度
- 第六章 管内气固两相流悬浮流动及气力输送



课程内容

- 第七章 气固两相流旋转运动及离心分离理论
- 第八章 固体燃料燃烧
- 第九章 气固两相流计算模型
- 第十章 气固两相流的测量技术
- 第十一章 气固两相流的模化理论与实验技术



课程内容：5个讲座

- 大容量锅炉灰斗分离特性的研究
- 旋流燃烧过程的实验研究与数值模拟
- 高速液滴-固体撞击过程研究
- 颗粒群分布特性的实验研究与数据分析
- 波纹板气液两相流的数值模拟



1. 绪论

1.1 气固两相流简介

1.2 建模的意义

1.3 循序渐进的建模目标

1.4 气固燃烧过程建模的主要步骤

1.5 全燃烧过程物理建模的整体构思



1.1 气固两相流简介

1. 气固两相流动及工程应用

- 流动系统中存在着气体—固体颗粒间动态相互作用的流动，伴随有动量、质量、热量的传递及化学反应过程。
- “相”：物质的形态，动力学性质相同的一群物质。



1.1.2 分类

一、 { 稀疏两相流 稠密两相流

“稀”或“密”按颗粒在气相中的含量多少来划分（需人为定义）

颗粒的质量分数 $\phi = m_p / m_g$

体积分数 $\phi = V_p / V_g$

$\phi \ll 1$, $\phi \ll 1$ 稀, $\phi \ll 1$ 十分稀疏

ϕ 不远小于1, 稠密

“稀”或“密”按颗粒与气相相互作用情况来划分

颗粒的运动由碰撞来支配, 稠

颗粒的运动由空气动力支配, 稀



Crave提出的划分准则： $\frac{\Delta u_p \tau_p}{\bar{\lambda}_p} < 1$
稀相——在发生碰撞之前已达到平衡

Δu_p 固体相对气体的速度滑移， τ_p 特征时间（松弛时间）， $\bar{\lambda}_p$ 发生碰撞的平均距离（平均自由程），

$\Delta u_p \tau_p$ 松弛距离（不平衡→平衡）

$\frac{\Delta u_p \tau_p}{\bar{\lambda}_p} > 1$ 密相，（不需人为定义，但各参数难于得到）



二、流态化与非流态化

固体颗粒在气相中处于悬浮状态时，称为流态化气固两相流。

$u_g - u_p \geq u_{mf}$ （最小流态化速度）和 $\varepsilon \geq \varepsilon_{mf}$ （空隙率）时为流态化；

$u_g - u_p < u_{mf}$ （最小流态化速度）和 $\varepsilon < \varepsilon_{mf}$ （空隙率）时为非流态化；



1.1.3 气固流动的特点和研究方法

一、特点

- 1、流动形态（流型）复杂多变 气固间相互影响
- 2、相间相互作用关系复杂
- 3、相间的非平衡现象十分显著(速度不同等)，流动中存在各种松弛过程，如速度（动量）、温度（热量）、成分（质量）
- 4、物性参数多且变化关系复杂
- 5、数学描述复杂，理论求解难度大



二、研究方法

- 1、理论研究——微观运动理论、宏观的连续介质理论
- 2、实验研究——模化实验、测试技术
- 3、数值模拟——通过理论分析的物理建模、数学建模，进行算法建模，引入实验测量的经验参数，进行模拟和仿真（学习该课程后应达到的一个标志性的水平）



1.2 建模的意义

1.2.1 物理建模

对一个客观的物理过程进行因素的取舍，提炼出主导物理过程的主要矛盾而忽略次要矛盾。主要任务是使物理问题得到简化，成为可以被定量研究的问题。

- **物理建模的途径：**
- 观察
- 测量
- 文献查阅（利用前人的成果）
- 想象、猜测
- 反复尝试



1.2.2 数学建模

把物理模型转化为数学描述，明了各物理量之间的具体数学关系。是整个研究过程中的核心内容。一定要提炼出可复现的、可继承的、可操作的、可用于定量预测的数学规律。大致分为：

- 代数模型
- 常微分方程模型
- 偏微分方程模型
- 积分方程模型
- 概率模型
- 离散模型

可以独立存在，但大量的是混合使用的



1.2.3 算法建模

- 将数学模型进一步转化为可以被求解的数学表达式和求解程序，尤其是可以利用计算机进行运算的数学表达式和求解程序。是编程以前最重要的一步准备工作。
- 三种模型是相互促进又相互制约的。比如，如果没有微积分的数学手段，就不可能建立多维的物理模型；没有大规模的数值求解能力，就不可能去建立复杂的微分方程模型体系。
- 主要讲物理建模和数学建模，讲一部分重要的算法建模。算法建模要专门开课讲解。



1.3 循序渐进的建模目标

建模工作的主要目标当然是使得复杂的物理过程最终成为计算机可以进行运算的算术表达式。但燃烧过程非常复杂，必然有一个由简入繁、逐步细化而最终获得足够精确解的过程。



“相”的概念

对于我们常研究的燃烧过程，物质的聚集形态有气体和颗粒（液态或固态）两种，所以我们称之为“气相”与“颗粒相”。

说文解字

【卷四】【目部】相

省视也。从目从木。《易》曰：“地可观者，莫可观於木。”《诗》曰：“**相鼠有皮。**”息良切

【释义】①交互；表示彼此之间：相识|相逢|相反|相距太远。②表示一方对另一方的动作：相信|相同|相劝。③亲自察看：相亲|相看|相中。



“相”的概念

➤ 道德经

“有无相生，难易相成，长短相刑，高下相盈，音声相和，先后相随，恒也。”
“大方无隅；大器晚成；大音希声；大象（相）无形”
“道生一，一生二，二生三，三生万物。”

➤ 佛学常见词汇

【相】 表现于外而能想像于心的各种事物的相状。

“无我相，无人相，无众生相，无寿者相” —— 《金刚经》

➤ 太极生两仪，两仪生四象（相），四象生八卦。 —— 《易经》

Phase (matter), a physically distinctive form of a substance, such as the solid, liquid, and gaseous states of ordinary matter

Phase transition is the transformation of a thermodynamic system from one phase to another



“相”的概念

- “相” (phase)首先是物质的聚集形态，比如气相、液相、固相。但“相”的含义非常丰富，其本身就包含了不同聚集形态之间相互作用的含义。同时，“相”不仅是一个物理上的概念，也是一个数学上很重要的概念。
- “相”可以是存在分解面的相同的聚集形态不同的成分，比如油和水。从数学上讲，不存在分界面的不同成分也可以分成不同的相，如：氧和氮。离散介质相的概念更丰富。比如气体中的粉粒体，可以统一看作一个相，但也可以用粒径的范围分为几个相。



- “相”的物理区分：主要是依靠物质聚集之间的分界面。
- “相”的数学区分：使用完全相同的数学描述的物质集合。相的划分主要取决于使用的数学模型。



“相内作用”与“相间作用”

- 相内作用就是指一种载体内部的物质、动量和能量的变化。如气—气燃烧过程是一种相内作用。
- 相间作用是指不同载体之间的物质、动量和能量的交换。比如气体—颗粒燃烧过程。
- 合理地描述相内作用和相间作用，是建模的任务



2. 颗粒特性

- 2.1 粒度
- 2.2 粒度分布
- 2.3 颗粒的形状
- 2.4 颗粒群的堆积特性
- 2.5 颗粒体的摩擦特性



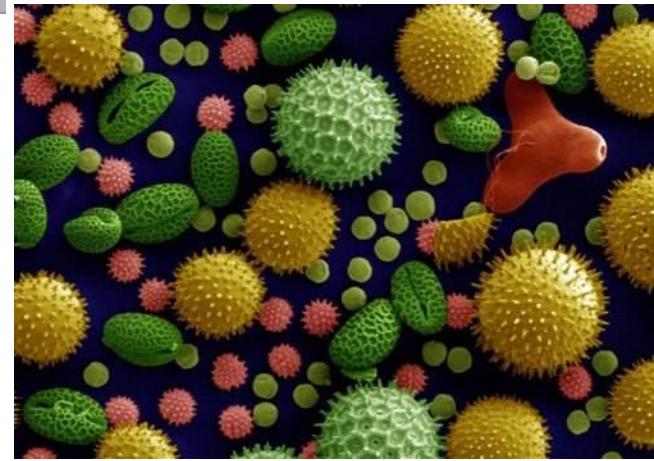
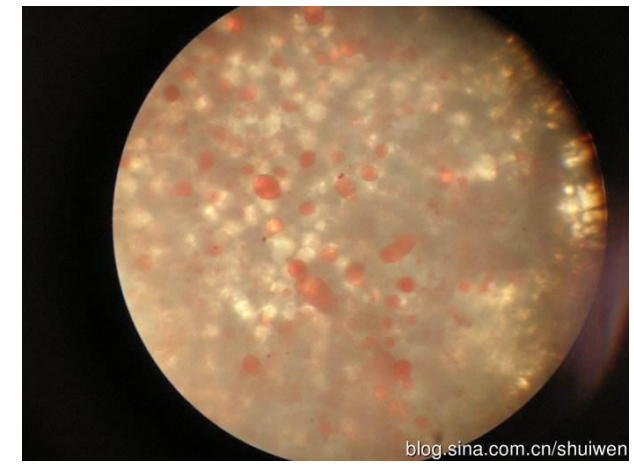
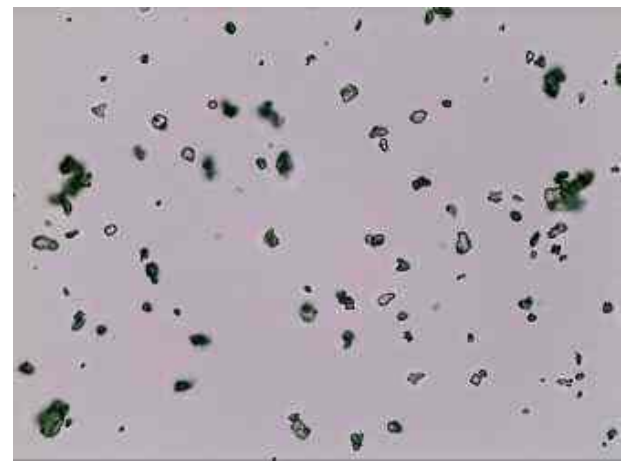
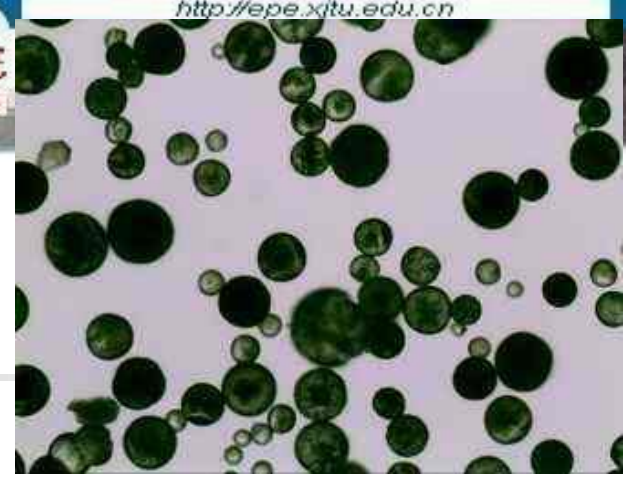
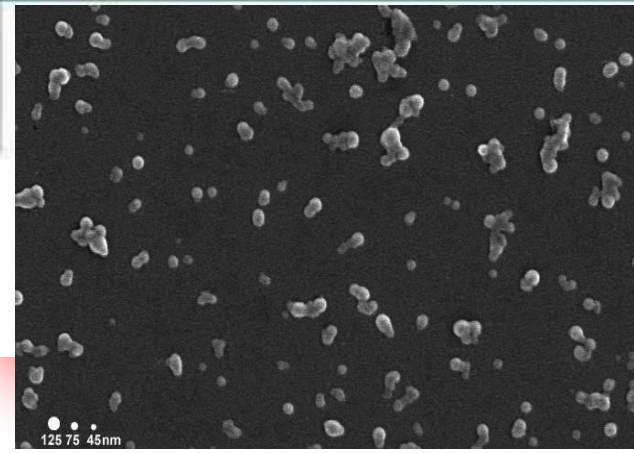
2.1 粒度

指颗粒群的粒径的整体特性，是颗粒在空间范围所占大小的线性尺度。（注意颗粒群粒度与单个颗粒粒径的联系和区别）粒度的定义和表示方法由于颗粒形状、大小和组成的不同而不同，也随所关注的物理过程不同而不同。



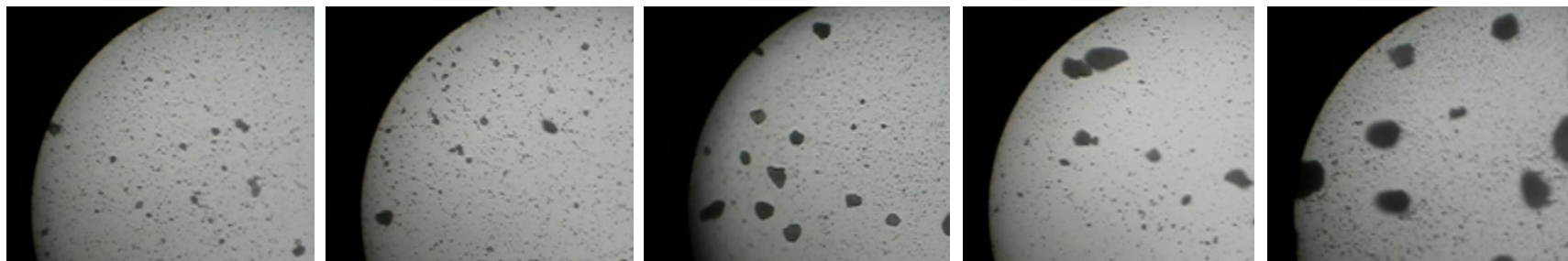
2.1.2 单一颗粒的粒度

- 表面光滑的球形颗粒——直径即粒度——（在研究气体颗粒流时，“表面光滑的球形颗粒”是一个基本的物理模型）
- 非球形，不光滑——使用当量圆或当量球的直径



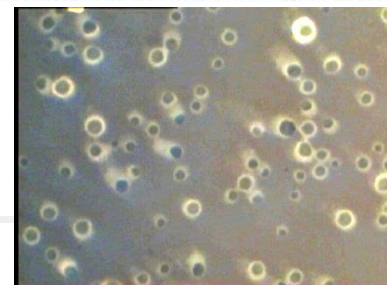
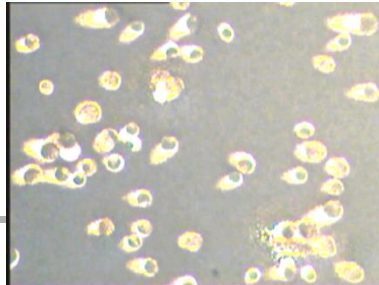
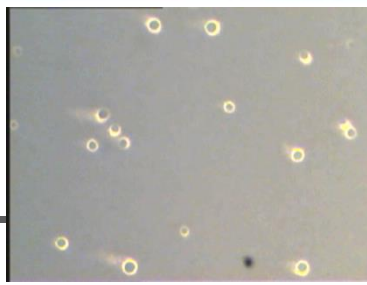
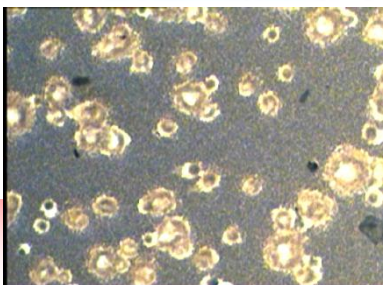


- 五种产地共十八种粒径分布的石灰石样品，在显微镜下对颗粒进行放大成像，并利用Mivnt计算机图像处理软件进行粒度测定。各样品拍摄图片如下：



礼泉石灰石

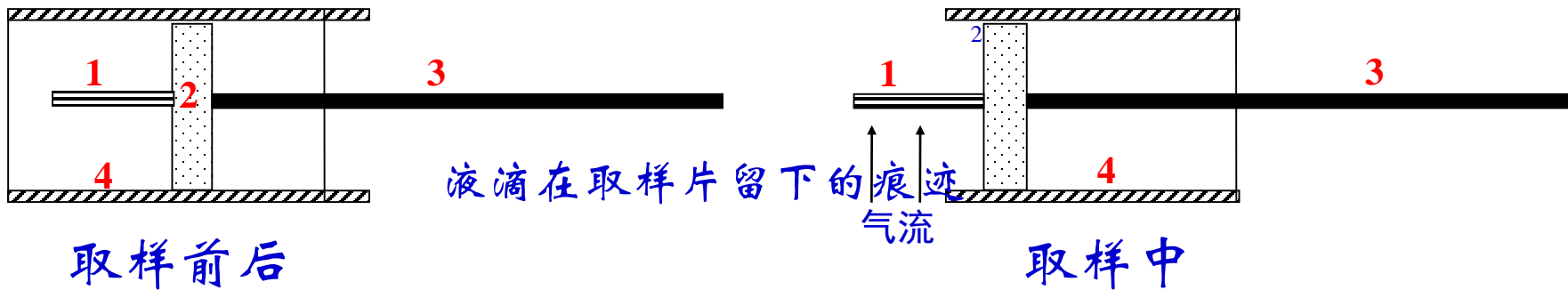
从左到右依次为样品1-1，样品1-2，样品1-3，样品1-4，样品1-5。



(a) 取样时间太长 (b) 取样时间太短 (c) 未正对气流来流方向 (d) 取样时间合适和方向正确

1—载玻片 2—活塞 3—拉杆 4—导筒
取样方法

取样方法：





根据不同的测量方法，有以下形式：

- 投影径：“统计学直径”，通过显微镜或全息照相法测量得到平行与一定方向的线度尺寸。
 (1) 定方向径 (2) 定方向等分径 (3) 定方向最大径 (4) 等投影面积直径 (当量径)

■ 几何当量直径

等体积球当量径：

$$d_V = \sqrt[3]{6V_p / \pi}$$

等表面积当量径：

$$d_S = \sqrt{S_p / \pi}$$

等比表面积（单位体积的表面积） $d_w = 6V_p / S_p$

当量径等投影面积当量径： $d_A = \sqrt{4A_p / \pi}$

等周长圆当量径： $d_L = L / \pi$



■ **物理当量直径**：在特定的物理过程中，将粒度、密度、形状等综合成一个参数来表示颗粒的大小。思路：根据关注的物理过程，寻找一个在该物理过程下完全等效的圆球，此圆球的直径就是颗粒的物理当量直径。

自由沉降当量径：设一与颗粒 ρ 相同的球体，在 ρ 和 μ 相同的气体中与颗粒具有相同的终端沉降速度。

Stokes径：颗粒在层流条件下($Re < 1$)的沉降粒径可根据终端沉降速度 u_t 求得。

空气动力直径：设在静止空气中颗粒的沉降速度与密度为 1000kg/m^3 的圆球（水滴）沉降速度相同。



2.1.2 颗粒群的平均粒径

- 实际颗粒群的粒径分布并不连续，在较窄范围 $d_i \sim d_{i+1}$ 内， n 个，则 $(d_i + d_{i+1})/2$ 可视作这 n 个颗粒的平均粒径（粒级）。

f_n 为该粒级内颗粒个数 n 占总个数的分数

f_m 为该粒级内颗粒质量 m 占总质量的分数



整个颗粒群的平均粒径的计算有两种基准：

个数基准

$$d_{\alpha\beta} = \left(\frac{\sum nd^\alpha}{\sum nd^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha-\beta}} = \left(\frac{\sum f_n d^\alpha}{\sum f_n d^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha-\beta}}$$

质量基准

$$D_{\alpha\beta} = \left(\frac{\sum md^\alpha}{\sum md^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha-\beta}} = \left(\frac{\sum f_m d^\alpha}{\sum f_m d^\beta} \right)^{\frac{1}{\alpha-\beta}}$$

$\alpha=1,2,3,4$

$\beta=0,1,2,3$

$\beta=0$ 时，以颗粒群的个数去均分粒度之和、总表面积或总体积所得。

$\beta=\alpha-1$ 时，以各粒级中颗粒的个数、粒径之和、表面积和为体积为权，对d进行平均得到，因此分别是个数分布、表面积分布和体积（质量）分布的平均径。

最常用 $\alpha=3, \beta=2$ （比表面积平均径），索太尔（Sauter）直径



- 定义函数法：安德烈耶夫提出用定义函数来求平均粒径。

设有 d_1, d_2, d_3, \dots 组成的颗粒群，有以粒径函数表示的某种特性 $f(d)$ ，若粒径函数具有加和性质

$f(d) = f(d_1) + f(d_2) + f(d_3) + \dots$ ，则 $f(d)$ 即为定义函数。假想有另一个颗粒群，完全由直径 D 相同的球形颗粒组成，双方有关物理性质完全相等，若 $f(d) = f(D)$ ，则 D 就是平均粒径。难点：构造有加和性质的定义函数 $f(d)$ ；求解 D

——思路仍然是寻找等效的均匀球体



2.2 粒度分布

2.2.1 粒度分布及其类型

- 是指将颗粒群以一定的粒度范围按大小顺序分为若干粒级，各粒级粒子占颗粒群总量的分数。四种类型：
 - 用个数表示的粒度分布 $f_N(d_p)$;
 - 用长度表示的粒度分布 $f_L(d_p)$;
 - 用表面积表示的粒度分布 $f_S(d_p)$;
 - 用质量（体积）表示的粒度分布 $f_m(d_p)$;
- 以上几种分布函数只有在形状系数为常数，即颗粒形状与粒度无关时才可以转换
- $f_L(d_p) = k_1 d_p f_N(d_p)$
- $f_S(d_p) = k_2 d_p^2 f_N(d_p)$
- $f_M(d_p) = k_3 d_p^3 f_N(d_p)$
- k_1 、 k_2 、 k_3 是形状系数（通常都与粒度有关）。



思考题:

- 已知, $f_N(x)dx = \frac{dN_x}{N}$, $f_M(x)dx = \frac{dM_x}{M}$

试推导 $f_N(x)$ 与 $f_M(x)$ 的换算关系。

- 提示: 假设颗粒为光滑球体, 则有

$$\rho_p \frac{\pi x^3}{6} dN_x = dM_x$$



2.2.2 粒度分布的表达形式

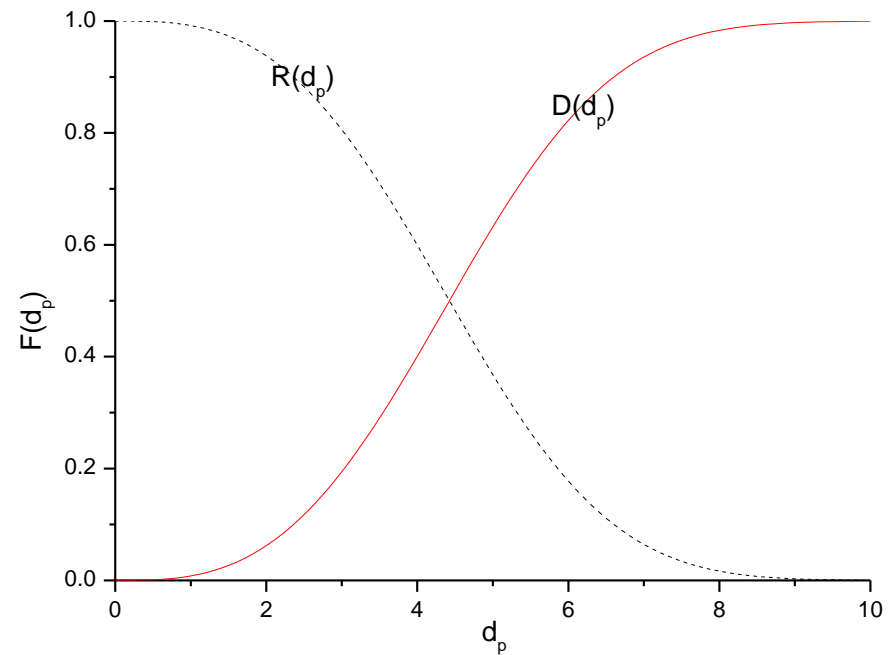
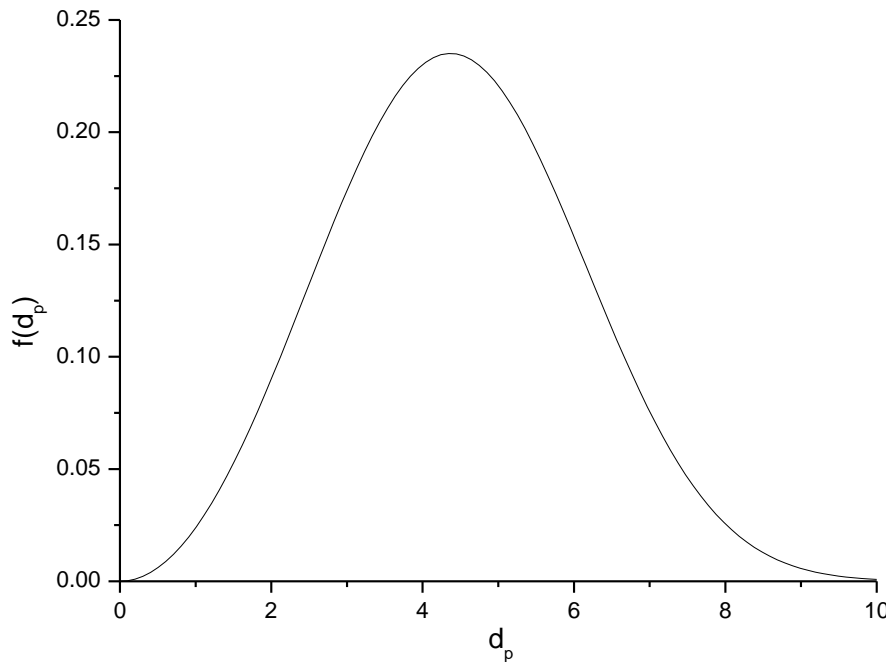
- 表格形式（离散）
- 直方图（离散）
- 函数形式（连续）



- 微分型 (频率分布)
- 积分型 (累积分布)

$$f(d_p) = \frac{dF(d_p)}{d(d_p)}$$

$$F(d_p) = \int_0^{d_p} f(d_p) d(d_p)$$





- 累积分布又分为筛上分布和筛下分布

筛上分布

$$R(d_p) = \int_{d_p}^{d_p^{\max}} f(d_p) d(d_p)$$

筛下分布

$$D(d_p) = \int_{d_p^{\min}}^{d_p} f(d_p) d(d_p)$$

$$R(d_p) + D(d_p) = 1$$



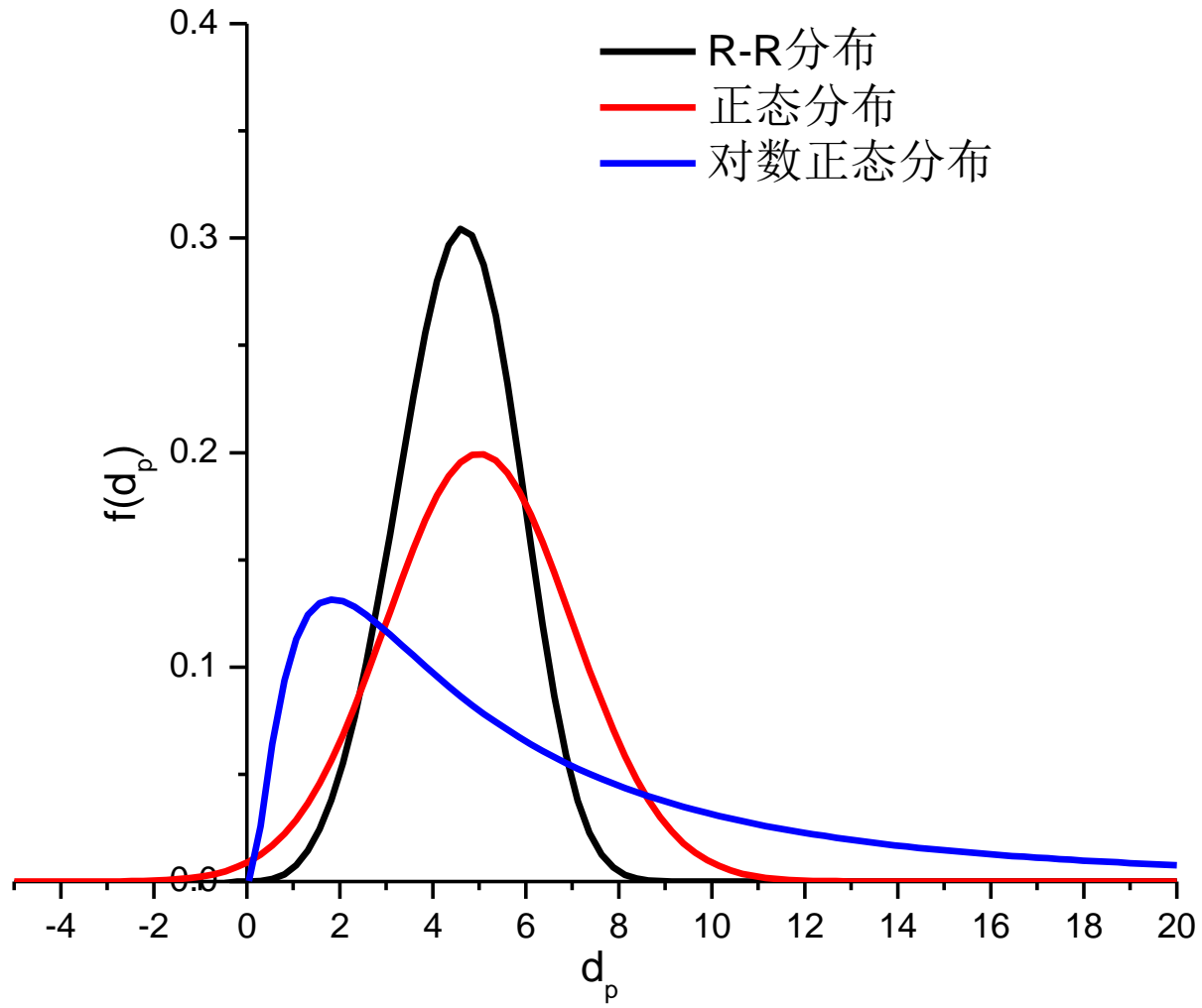
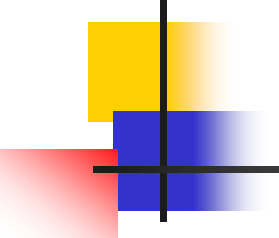
a) 正态分布 $f(d_p) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(d_p - \bar{d}_p)^2}{2\sigma^2}}$: 双参数 \bar{d}_p 和 σ (标准偏差, 分布曲线胖瘦), 如自然界花粉的分布

b) 对数正态分布 $f(d_p) = \frac{1}{d_p \ln \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln d_p - \ln \bar{d}_p)^2}{2 \ln^2 \sigma}}$: 峰值偏于小频率一侧, 分布更广, 河沙

c) Rosin-Rammler分布: 破碎, 煤粉, 水泥, 月球泥沙

$$F(d_p) = 1 - e^{-\left(\frac{d_p}{\bar{d}}\right)^n} \quad \text{或} \quad F(d_p) = e^{-\left(\frac{d_p}{\bar{d}}\right)^n}$$

$$f(d_p) = n \frac{d_p^{n-1}}{\bar{d}^n} e^{-\left(\frac{d_p}{\bar{d}}\right)^n}$$





c) Rosin-Rammler分布

- 特点一:

累积函数 $F(d_p) = e^{-\left(\frac{d_p}{\bar{d}}\right)^n}$ 两边求对数得 $\ln F = -\left(\frac{d_p}{\bar{d}}\right)^n$ 两边
取负值以后再求一次对数 $\ln\left(\ln \frac{1}{F}\right) = n \ln d_p - n \ln \bar{d}$
 $\ln\left(\ln \frac{1}{F}\right)$ 对 $\ln d_p$ 作图是一条直线

- 特点二:

微分函数 $f(d_p) = n \frac{d_p^{n-1}}{\bar{d}^n} e^{-\left(\frac{d_p}{\bar{d}}\right)^n}$ 存在一个峰值, 其位置在
 $d_p = \sqrt[n]{\frac{n-1}{n}} \bar{d}$, $n=3$, $\sqrt[n]{\frac{n-1}{n}} = 0.873$; $n=2$, $\sqrt[n]{\frac{n-1}{n}} = 0.707$;
 $n=4$, $\sqrt[n]{\frac{n-1}{n}} = 0.93$



- 还有很多其它分布形式，weibull函数，Harris方程，Caudin-Meloy方程，Pearson方程。

都是以下方程的特例：
$$f(d_p) = \frac{dF}{dd_p} = c' d_p^\alpha \left[1 - \left(\frac{d_p}{\bar{d}} \right)^\gamma \right]^{\bar{d}^\gamma \beta}$$

测量方法：显微镜分析，筛分、液体沉降法、光学方法（吸收、衍射）



2.3 颗粒的形状

- 指一个颗粒的轮廓边界或表面上各点所构成的图像。颗粒形状与颗粒的物性之间存在密切的关系，对颗粒群的许多性质产生影响。
- 定性描述：针状、多角状、结晶状、枝状、纤维状、片状、粒状、不规则状、模状、球状。



2.3.1 形状系数

反应颗粒的体积、表面积乃至在一定方向上的投影面积与某种规定粒度 d_j 之间比较尺度的因子。

- 一. 表面积形状系数 $\phi_{s,j} = \frac{S}{d_j^2}$: $\phi_{s,j}$ 与 π 的差别表示颗粒形状对于球的偏离。 d_j 表示于颗粒具有相同体的圆球直径。
- 二. 体积形状系数 $\phi_{V,j} = \frac{V}{d_j^3}$: $\phi_{V,j}$ 与 $\pi/6$ 的差别表示颗粒形状对于球的偏离 d_j 表示于颗粒具有相同表面积的圆球直径。
- 三. 比表面积形状系数 $s_V = \frac{S}{V} = \frac{\phi_{s,j} d_j^2}{\phi_{V,j} d_j^3} = \frac{\phi_{sV,j}}{d_j}$, $\phi_{sV,j} = \frac{\phi_{s,j}}{\phi_{V,j}}$: $\phi_{sV,j}$ 与6的差别表示颗粒形状对于球的偏离
- 四. 若以等体积当量直径计算 $s_V = \frac{6}{\phi_c d_V}$, ϕ_c 称卡门(Carman)形状系数。对于球体 $\phi_c = 1$ 。



2.3.2 形状指数

- 形状指数于形状系数不同，它不是描述颗粒形状对理想形状（球形）的偏离程度，而要用颗粒尺寸的各种无因次组合描述其外形。



一、均齐度proportion

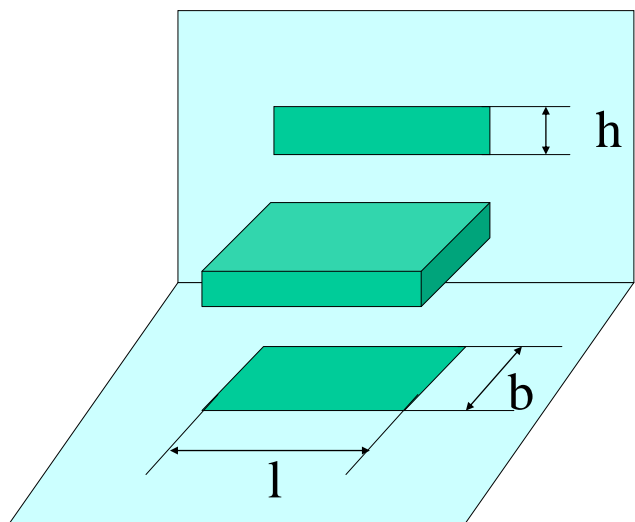
L,B,T分别是颗粒外接矩形体的长、宽、高

长短度 = 长径/短径 = L/B

扁平度 = 短径/厚度 = B/T

Zigg指数F = 长短度/扁平度 = LT/B₂

颗粒大小和形状表征
颗粒大小



颗粒大小和形状表征
颗粒大小

三轴平均径计算公式

三轴算术平均值:

立体图形的算术平均

$$\frac{l+b+h}{3}$$

三轴调和平均径:

与颗粒外接长方体比表面积相等的球的直径或立方体的一边长

$$\frac{3}{\frac{1}{l} + \frac{1}{b} + \frac{1}{h}}$$

三轴几何平均径:

与颗粒外接长方体体积相等的立方体的棱长

$$\sqrt[3]{lbh}$$



二、方向比aspect ratio和中心方向比 CAR(centroid aspect ratio)

$$CAR = D_{\max} / D_{\pi/2}$$

三、体积充满度volumic space filling factor

颗粒外接矩形的体积与该颗粒体积之比 $f_V = LBT/V_p$
磨料抗碎裂方面常用到这一指数。

四、面积充满度（容积系数bulkiness factor）

颗粒投影面积A与最小外接矩形的面积之比 $f_b = A/LB$



五、球形度 degree of sphericity

颗粒接近球形的程度

Wadell定义

$$\psi_w = \frac{S_s}{S_p} = \frac{4\pi(6V_p / \pi)^{2/3}}{S_p}$$

S_s —与实际颗粒体积相等的球体的表面积, S_p —颗粒的表面积

测定表面积比较困难, 使用近似球形度 $\psi_y = \frac{D_H}{D_{min}}$

D_H —与实际颗粒投影面积相等的圆的直径

D_{min} —颗粒投影的最小外接圆的直径, 可用圆形筛目近似表示

六、圆形度 circularity

颗粒投影与圆形接近的程度, 在显微镜分析和图像分析中应用广泛

$$\psi_{HL} = \frac{D_H}{D_L}$$

D_H —与实际颗粒投影面积相等的圆的直径 $D_H = \sqrt{4A / \pi}$

D_L —颗粒的当量直径 $D_L = L / \pi$

圆形度的倒数成为周长比, 在沉淀物水力输送中常用。



七、表面粗糙度 surface roughness

有粗糙度 degree of roughness 和表面指数 surface index 两种表示方法。
粗糙度又称圆角度，表示颗粒磨损的程度

$$\text{圆角度} = \sum r_i / NR$$

r_i —颗粒轮廓上的曲率半径

R —最大内接圆半径

N —测量的角度数

表面指数 $Z = L^2 / 4\pi A$

L —颗粒的周长

A —颗粒的投影面积

表面粗糙的颗粒 L 较大，所以表面指数 Z 也较大。



2.4 颗粒群的堆积特性

2.4.1 空隙率、填充率和空隙比

一、空隙率：填充层中未被颗粒占据的空间体积与包含空间在内的整个填充层表观体积之比

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V} = \frac{V - V_p}{V}$$

二、填充率：填充层中被颗粒占据的空间体积与整个填充层表观体积之比

$$\phi = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_c}{V} = 1 - \varepsilon$$

三、空隙比：

$$\phi_V = \frac{\varepsilon}{\phi} = \frac{\varepsilon_c}{1 - \varepsilon} = \frac{1 - \phi}{\phi}$$



2.4.2 颗粒的密度

- 一. 真密度 ρ_a : 颗粒质量除以不包括内外孔（内孔指封闭孔）在内的颗粒体积
- 二. 表观密度 ρ_s : 颗粒质量除以不包括外孔在内的颗粒体积
- 三. 颗粒密度 ρ_p : 颗粒质量除以包括内外孔在内的颗粒体积
- 四. 堆积密度 ρ_b : 自然堆积时单位体积内颗粒的质量
- 五. 悬浮密度: 单位提积流体中含有颗粒的质量（浓度）



2.5 颗粒体的摩擦特性

指颗粒体中固体离子之间以及粒子与固体表面因摩擦而产生的一些特性

2.5.1 休止角（安息角） φ_r

当颗粒物料处于自由堆积状态是（无容器约束），其堆积体的自由表面在静止平衡状态下与水平面间形成的最大夹角。

衡量颗粒物料流动性的重要指标，视为颗粒的“粘度”。 φ_r 小，流动性好。

有注入休止角、排出休止角



2.5.2 内摩擦角 ϕ_i

单面直接剪断试验，刚好滑动时，剪断面上的剪应力 $\tau = \frac{F}{A}$ ，垂直应力 $\sigma = \frac{W}{A}$ ，满足关系 $\tau = \mu_i \sigma$ ，式中 μ_i 为内摩擦系数，内摩擦角

$$\phi_i = \arctg \mu_i = \arctg \frac{\tau}{\sigma} = \arctg \frac{F}{W}$$

同时，颗粒的摩擦特性应充分考虑到静止时离子之间的附着力（凝聚力、静摩擦力），即 $\tau = \sigma \tan \phi_i + \tau_0$ ——库仑定律，满足这一定律的散体称为库仑散体。



2.5.3 壁摩擦角 ϕ_w

- 壁摩擦系数 $\mu_w = \frac{F}{\sum W}$ ，散体与容器壁面之间的摩擦特性，其正切值为壁摩擦系数，一般在剪切测试仪中进行测量。

$$\phi_w = \arctg \mu_w$$



2.5.4 滑动角 φ_s

- 表示颗粒物料与倾斜固体壁面之间的摩擦特性。
- 开始滑落时与水平面之间的夹角，实际上规定全部滑落时角度的90%为滑动角

