

第五章 颗粒的沉降和流态化

1 概述

1.1 工业背景

重力沉降—除尘

旋风分离器—回收细颗粒催化剂

粒级分离—浮选矿物

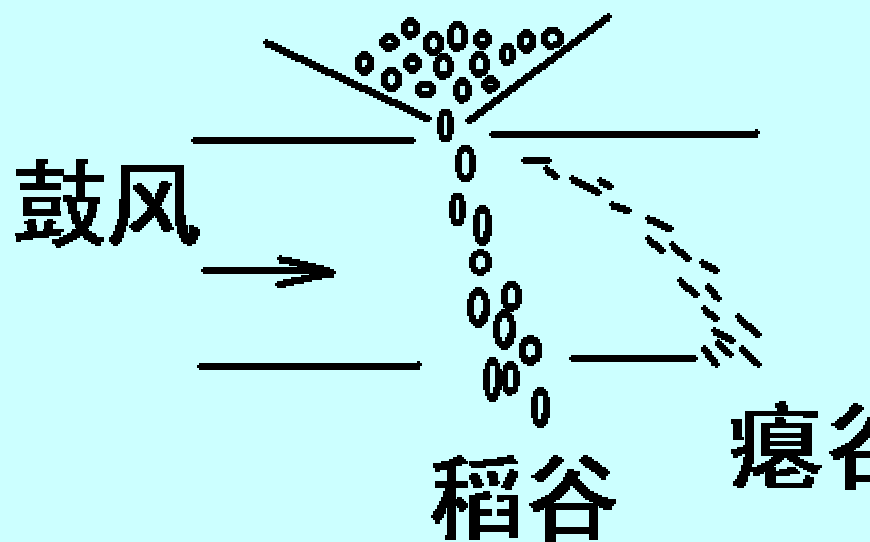
金矿粒与沙粒

气流粉碎—细颗粒制备

流化床—干燥，

化学反应

气力输送—颗粒输送



2 颗粒的沉降

2.1 绕流

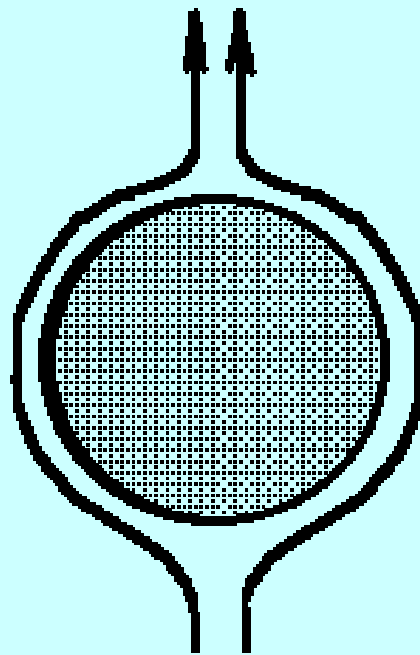
流体流动可分为两类：
内部流动—管流
外部流动—绕流

绕流可发生在下列系统中：

固-流(气、液)，液-液，气-液，液-气

本章分析典型的系统：

固-流(气，液)

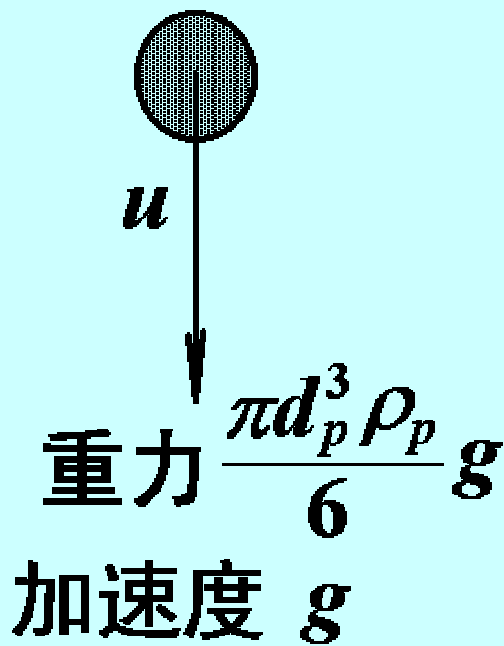


2.2 两种曳力

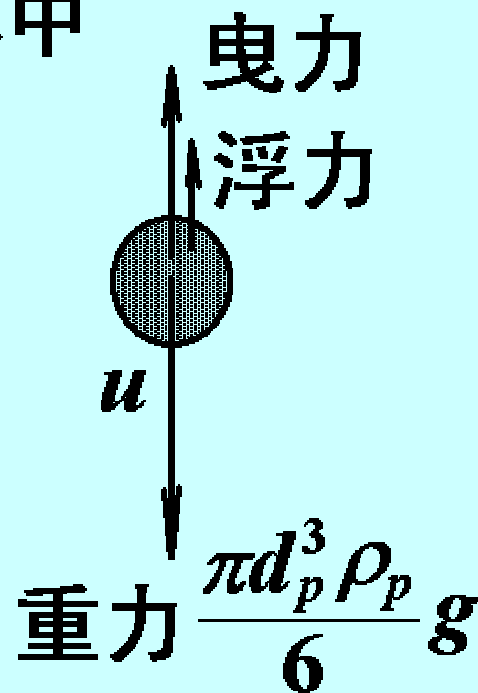
研究对象：物体受力运动

1. 固动，流静
2. 固静，流动
3. 固动，流动

真空中



流体中

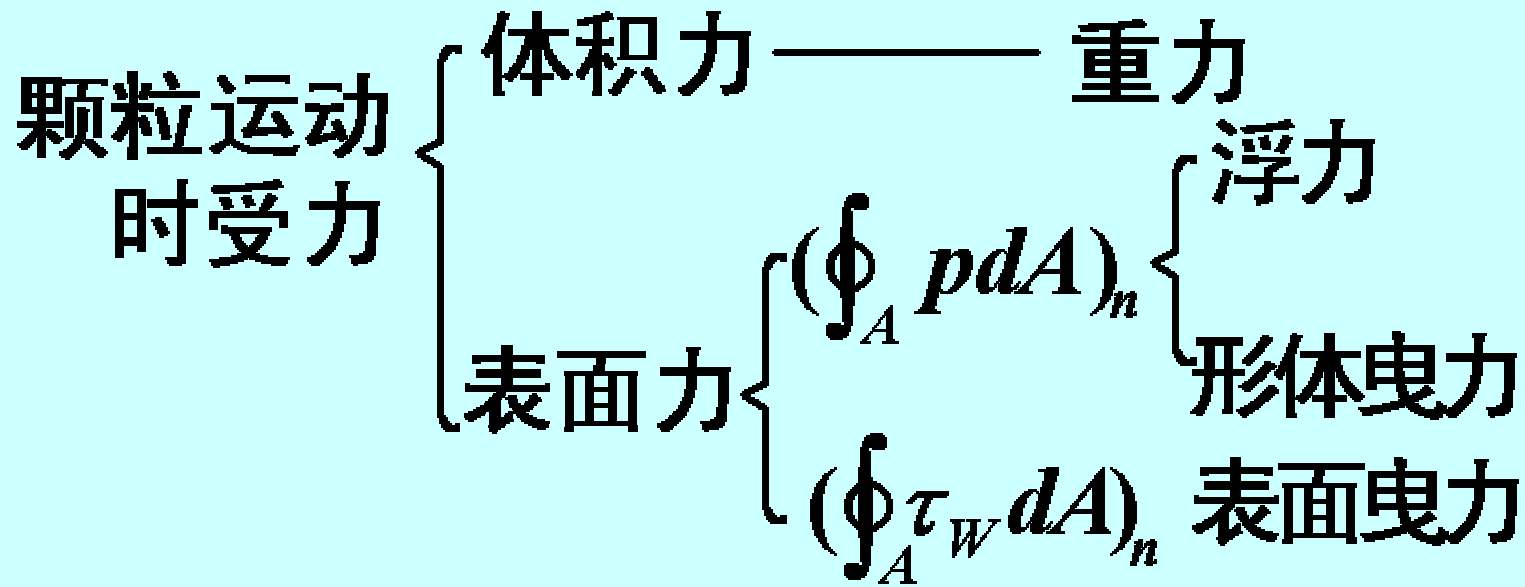
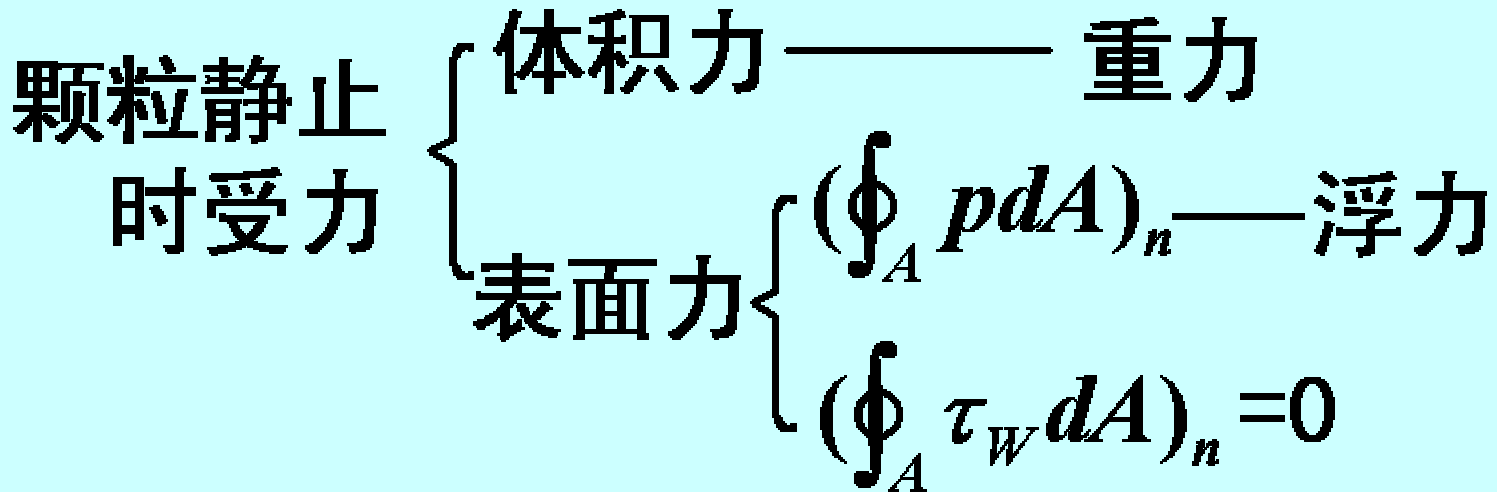


阻力—曳力是一对力

流体受到固体给的力—阻力

固体受到流体给的力—曳力

静止流体中：



曳力 = 形体曳力 + 表面曳力

2.3 曳力和曳力系数

对于球体，爬流时($\text{Re}_p = \frac{d_p u \rho}{\mu} < 2$)

Stokes 理论解：

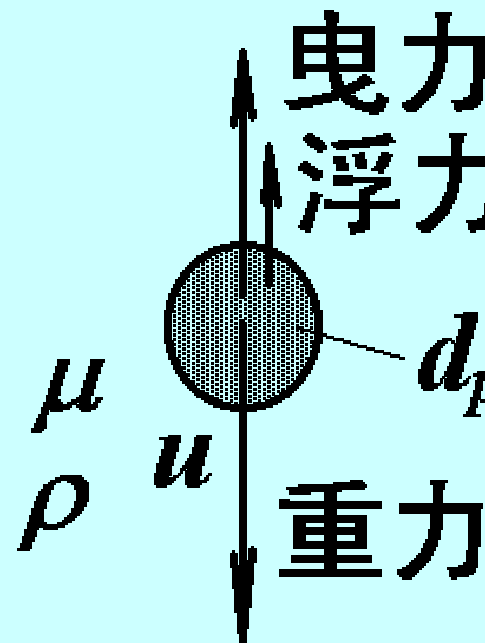
表面曳力= $2\pi\mu d_p u$

形体曳力= $\pi\mu d_p u$

表面曳力为主

斯托克斯定律

$$F_d = 3\pi\mu d_p u$$



非爬流时如何？

按牛顿定律：F与单位
时间产生的动量有关

单位时间排开流体的量

$$m = A_p u$$

A_p 指向下的最大投影面积

设排开速度 u_2 与下落速度 u 成正比，

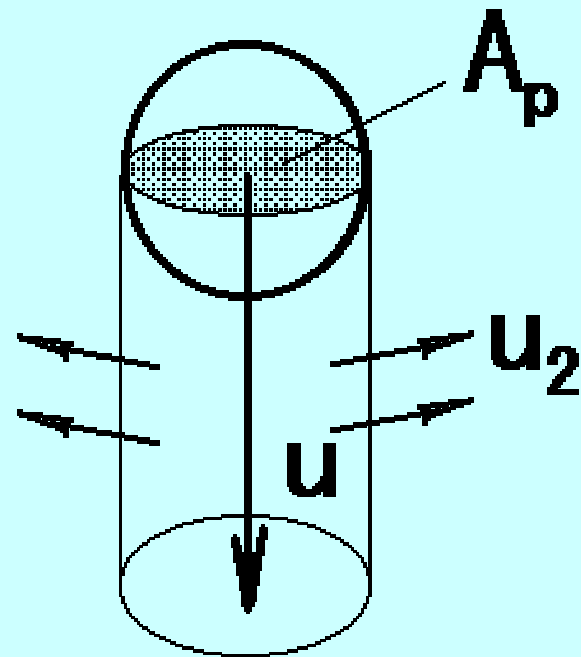
$$\text{则 } F_D \sim m u_2 \sim A_p u^2$$

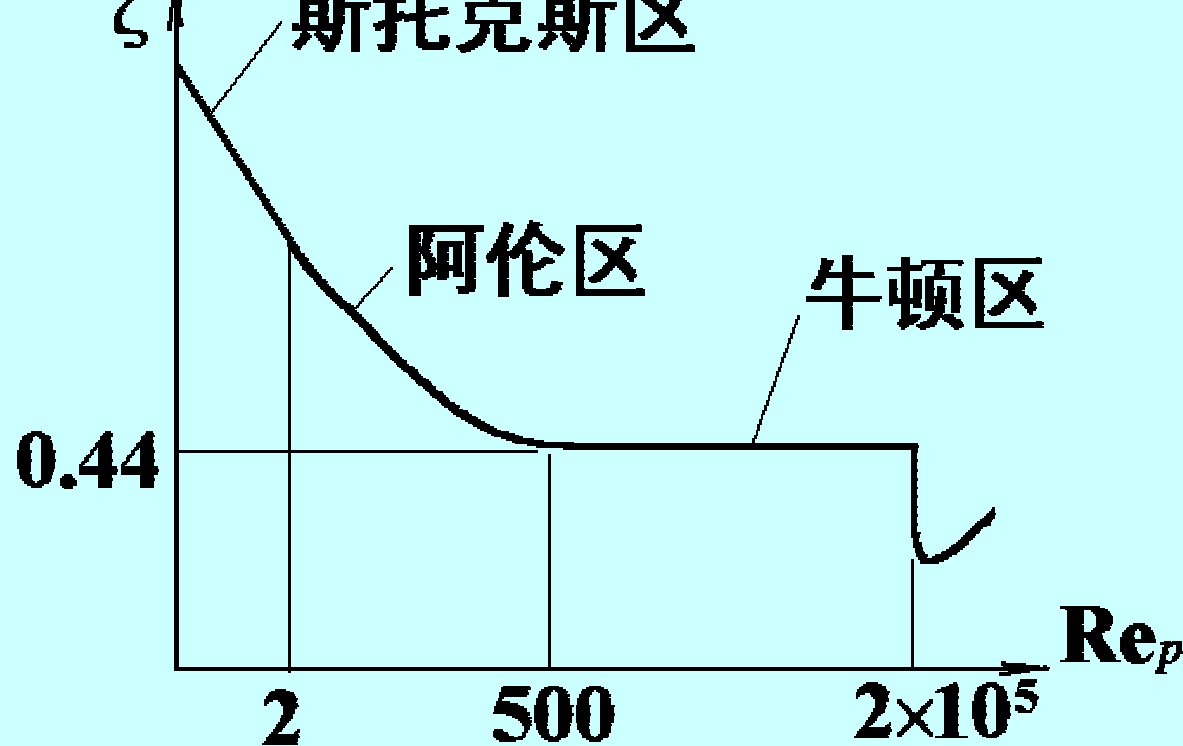
定义曳力系数

$$F_D = \zeta A_p \frac{\rho u^2}{2}$$

实验测定

$$\sim \text{Re}_p$$





用三段曲线来表示 $\zeta \sim \text{Re}_p$ 关系

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}_p}$$

$$\text{Re} < 2$$

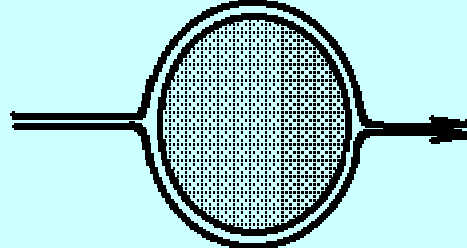
$$\zeta = \frac{18.5}{\text{Re}_p^{0.6}}$$

$$\text{Re} = 2 \sim 500$$

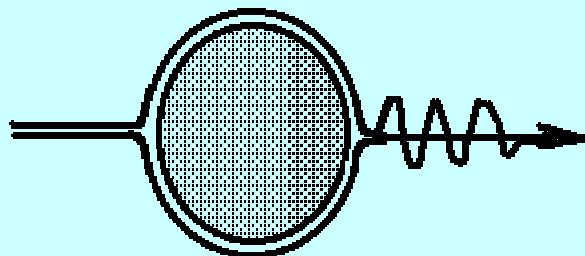
$$\zeta = 0.44$$

$$\text{Re} = 500 \sim 2 \times 10^5$$

$Re < 2$



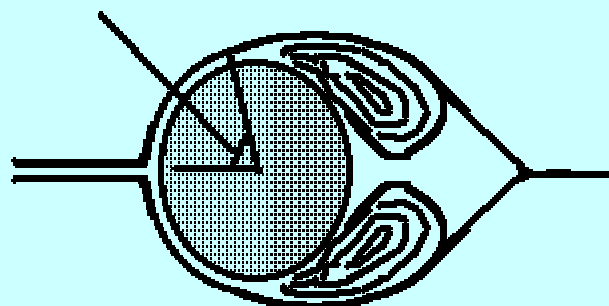
$Re = 2 \sim 500$



$\theta = 85^\circ$

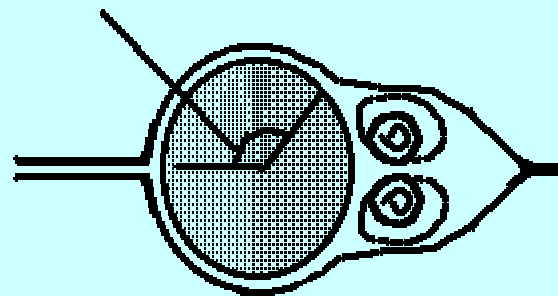
$Re = 500$

$\sim 2 \times 10^5$



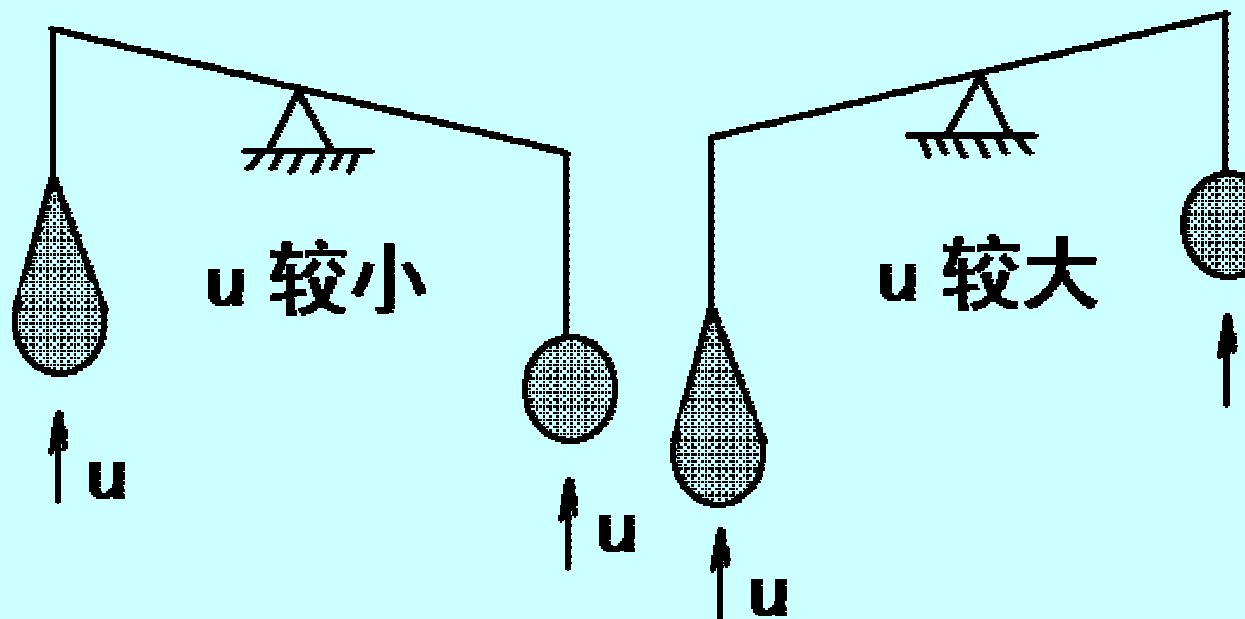
$\theta = 140^\circ$

$Re > 2 \times 10^5$

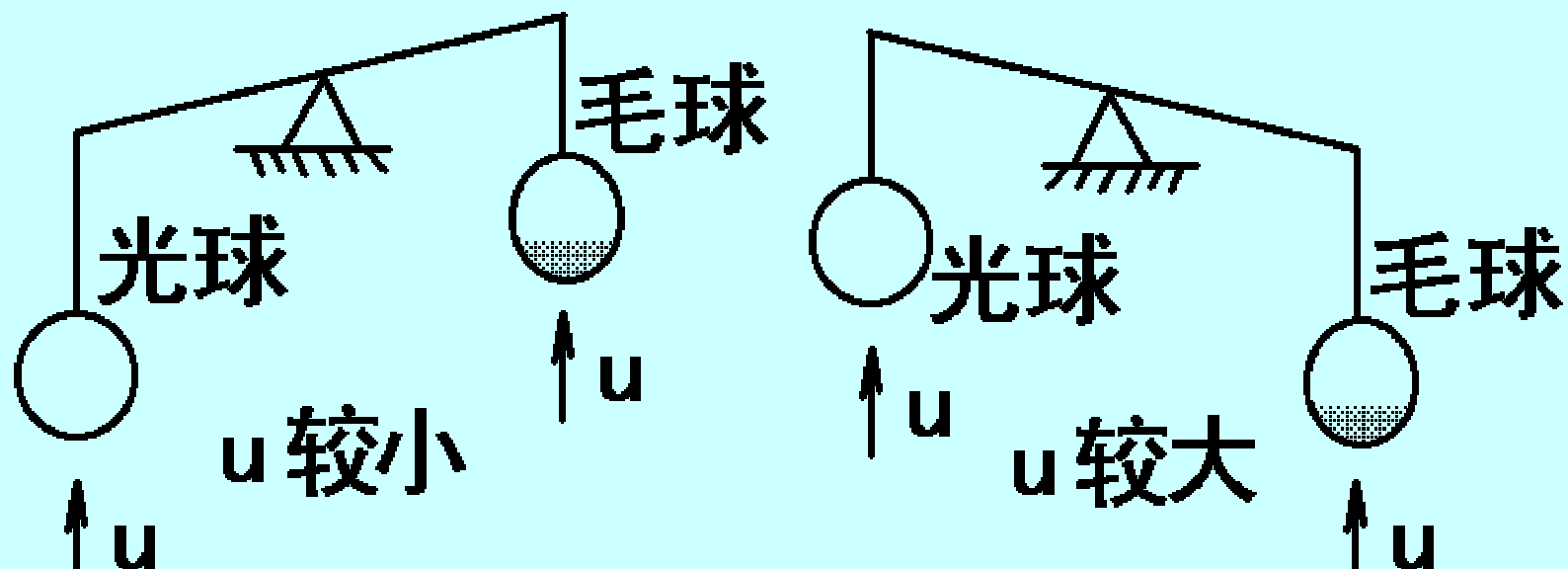


实验1 流线型物体与圆球曳力比较

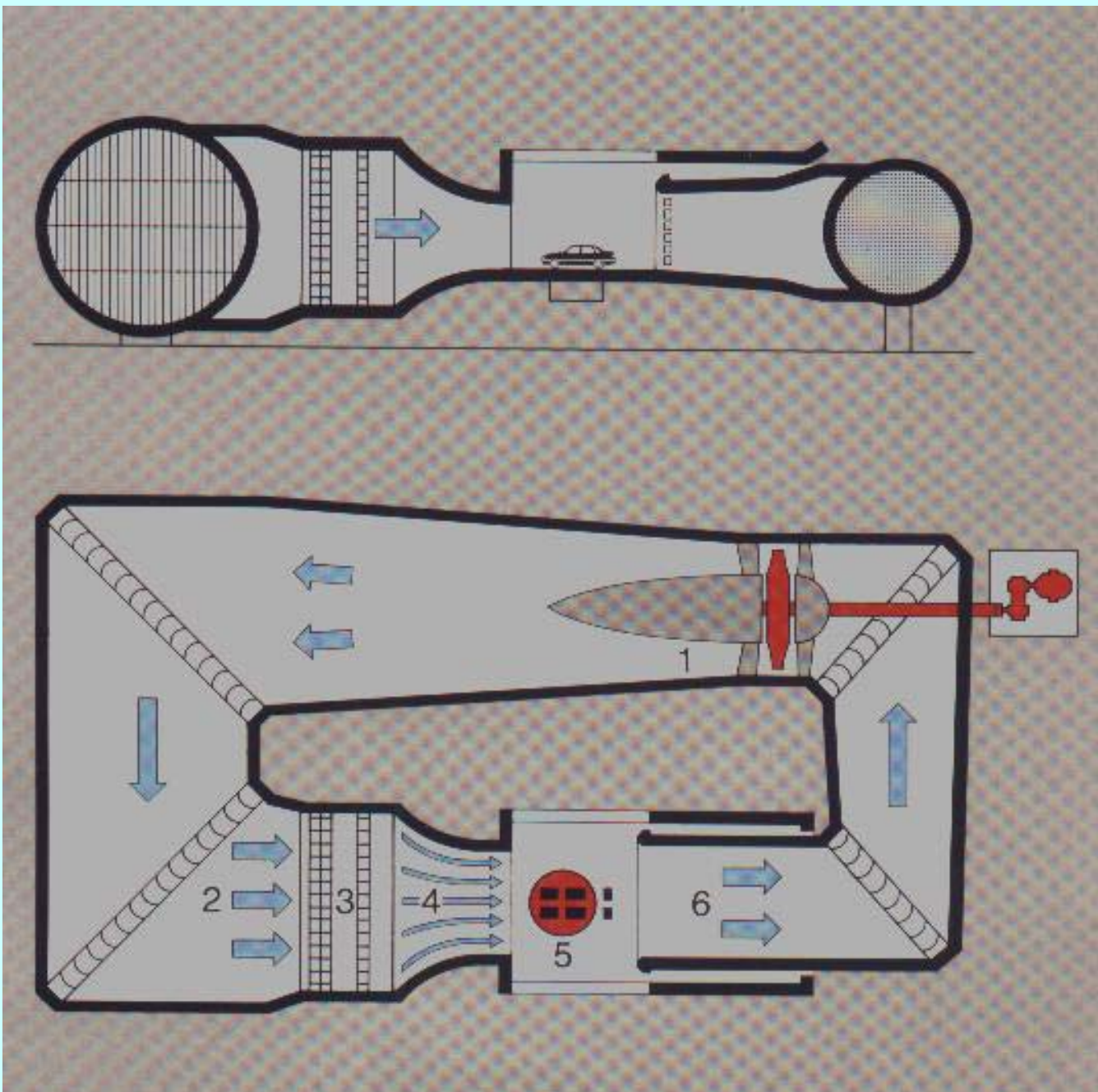
(重量相同,
迎风面相同)



实验2 光球与毛球曳力比较



汽车

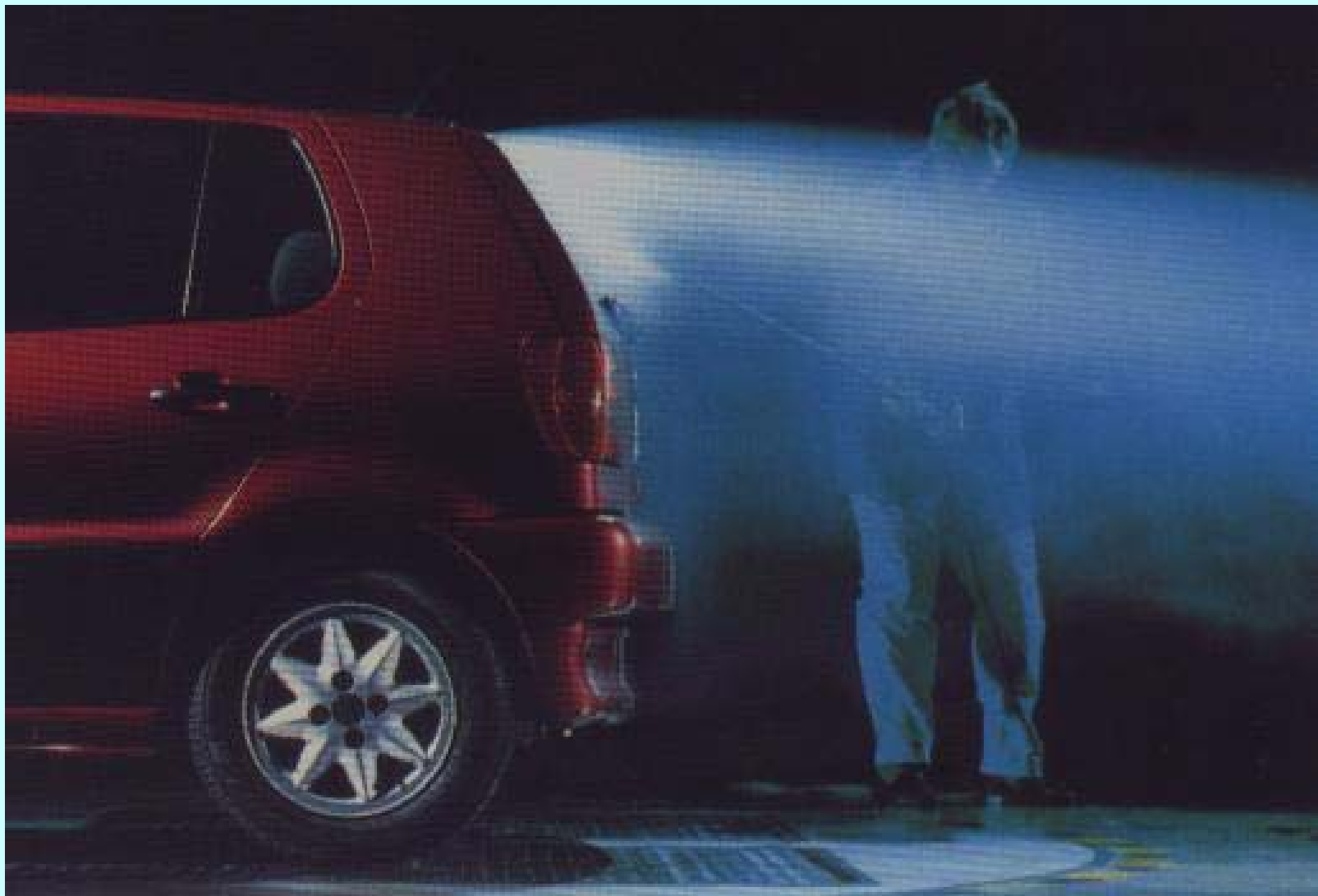


汽车



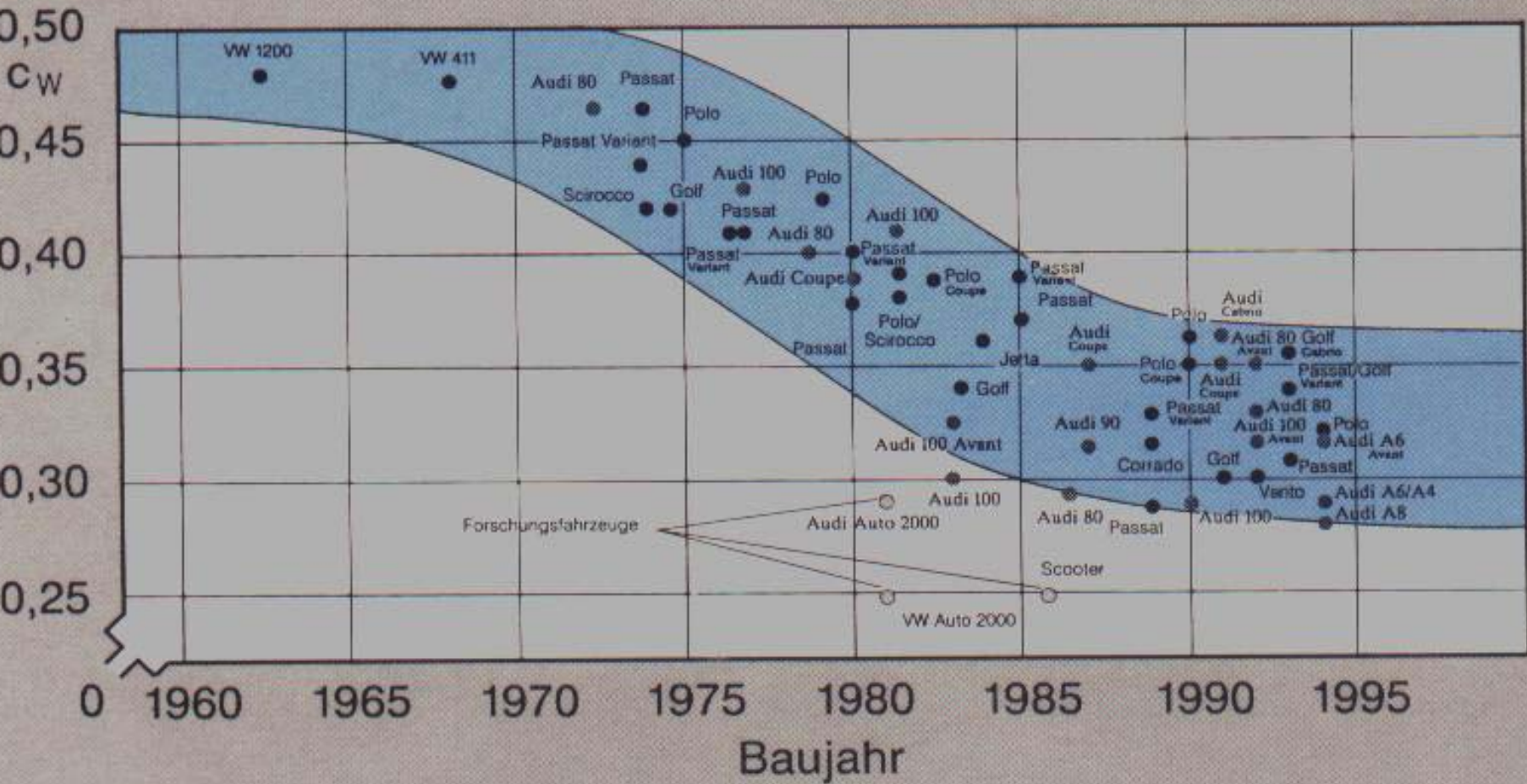


汽车



汽车

Luftwiderstandsbeiwert



2.4 自由沉降

1. 沉降速度 u_t

颗粒在重力、曳力、浮力达到平衡时的相对运动速度。

由力平衡：重力-浮力-曳力=0

可得
$$\frac{\pi}{6}d_p^3\rho_p g - \frac{\pi}{6}d_p^3\rho g - \zeta \frac{\pi}{4}d_p^2 \frac{\rho u_t^2}{2} = 0$$

$$u_t = \sqrt{\frac{4d_p g(\rho_p - \rho)}{3\rho\zeta}}$$

为一般计算式

Re<2时, 斯托克斯区
$$\frac{\pi}{6}d_p^3(\rho_p - \rho)g = 3\pi d_p \mu u_t$$

得
$$u_t = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho)g}{18\mu}$$

影响因素

u_t 是颗粒与流体的综合特性。

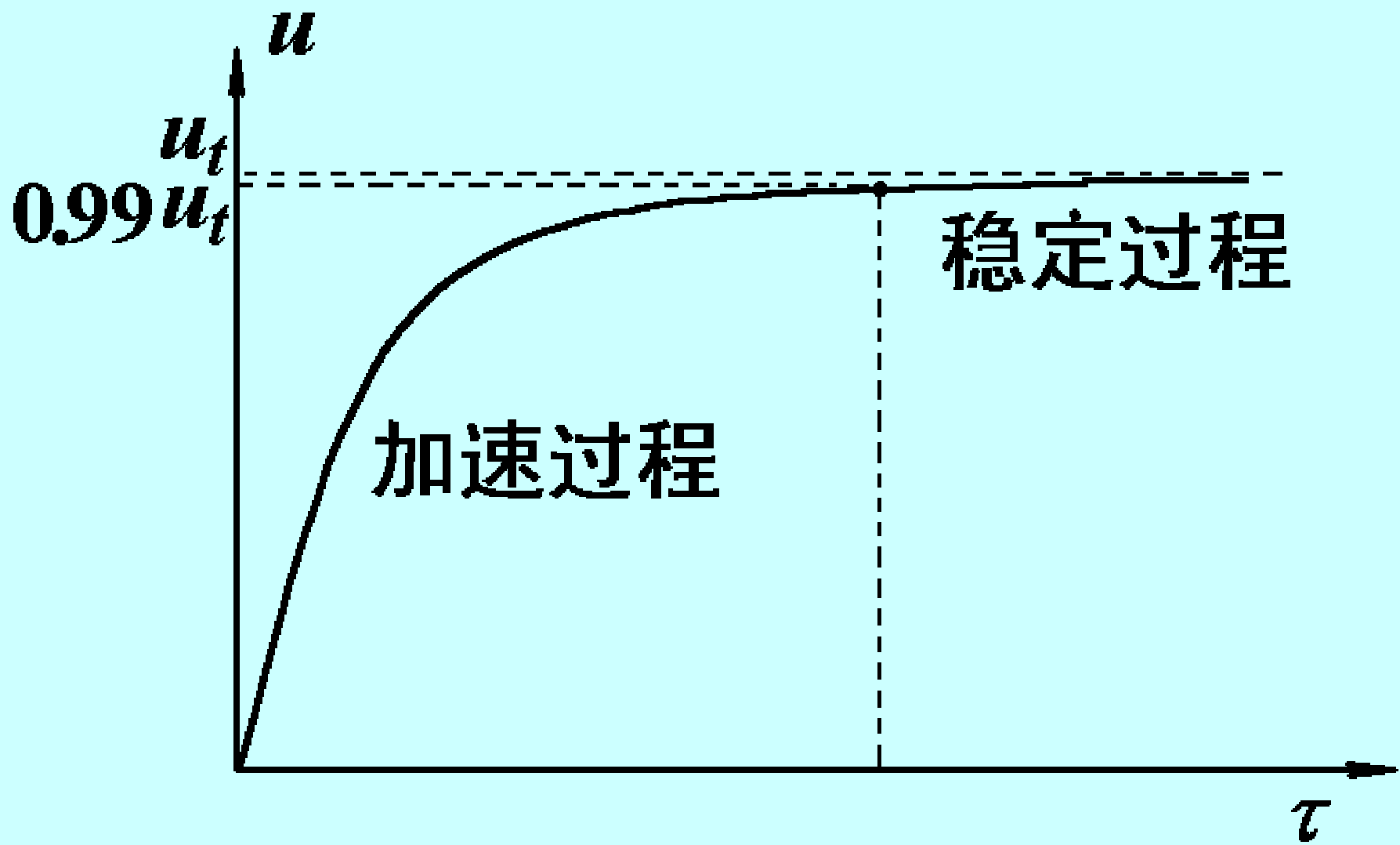
u_t 采用了极限处理方法

2. 加速过程的地位

是否重要, 要予以判断

大颗粒, 加速时间长, 走过距离长,
几乎一直在加速。

小颗粒, 加速时间短, 走过距离短,
加速段可忽略。



例1 斯托克斯区加速段

$$\text{由 } \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g - \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho g - \zeta \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{\rho u^2}{2} = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \frac{du}{d\tau}$$

及 $\tau=0, u=0$ 得

$$u = u_t \left[1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} \tau\right) \right]$$

$$s = \int_0^\tau u d\tau = u_t \int_0^\tau \left[1 - \exp\left(-\frac{18\mu}{d_p^2 \rho_p} \tau\right) \right] d\tau$$

当 $d_p=0.18\text{mm}$, $\rho_p=1600\text{kg/m}^3$ 的颗粒

在20 水中沉降,

加速到 $u=0.99u_t$ 所需时间为0.013秒,

所走距离0.11mm。

3.沉降计算

公式：
$$u_t = \sqrt{\frac{4d_p g(\rho_p - \rho)}{3\rho\zeta}}$$

$$\zeta = f\left(\frac{d_p u_t \rho}{\mu}\right)$$

分三段区域表达， $\frac{d_p u_t \rho}{\mu}$ 为判据

变量： $d_p, u_t, \mu, \rho_p, \rho, \zeta$ 共6个

待求变量为 d_p, u_t, μ 之一，都在判据中

计算：先设沉降区域，算完后再验证Re

试差原因：判据包含了待求变量

改进判据：

$$\text{由 } \text{Re} = \frac{d_p u_t \rho}{\mu} \text{ 和 } \zeta = \frac{4d_p(\rho_p - \rho)g}{3\rho u_t^2}$$

恰当组合，消去待求变量
组成新判据

ζRe^2 可消去 u_t

ζ/Re^2 可消去 d_p

例2 斯托克斯区判据值

$$\text{Re} < 2, \text{ 由 } \zeta = \frac{24}{\text{Re}} \text{ 得 } \zeta > 12$$

则 $\zeta \text{Re}^2 < 48, \zeta/\text{Re}^2 > 6$

2.5 实际沉降

1. 群体颗粒相互干扰,
器壁干扰

2. 分子运动

d_p 太小 ($< 0.5 \mu m$), 与分子
自由程可比, 粘度不再适用。

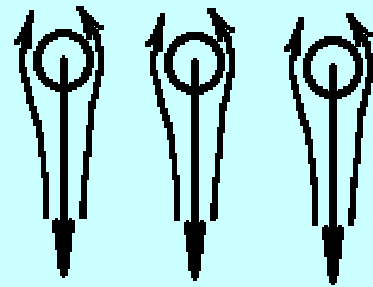
3. 非球形

实际速度偏小

等沉降速度当量直径 d_e

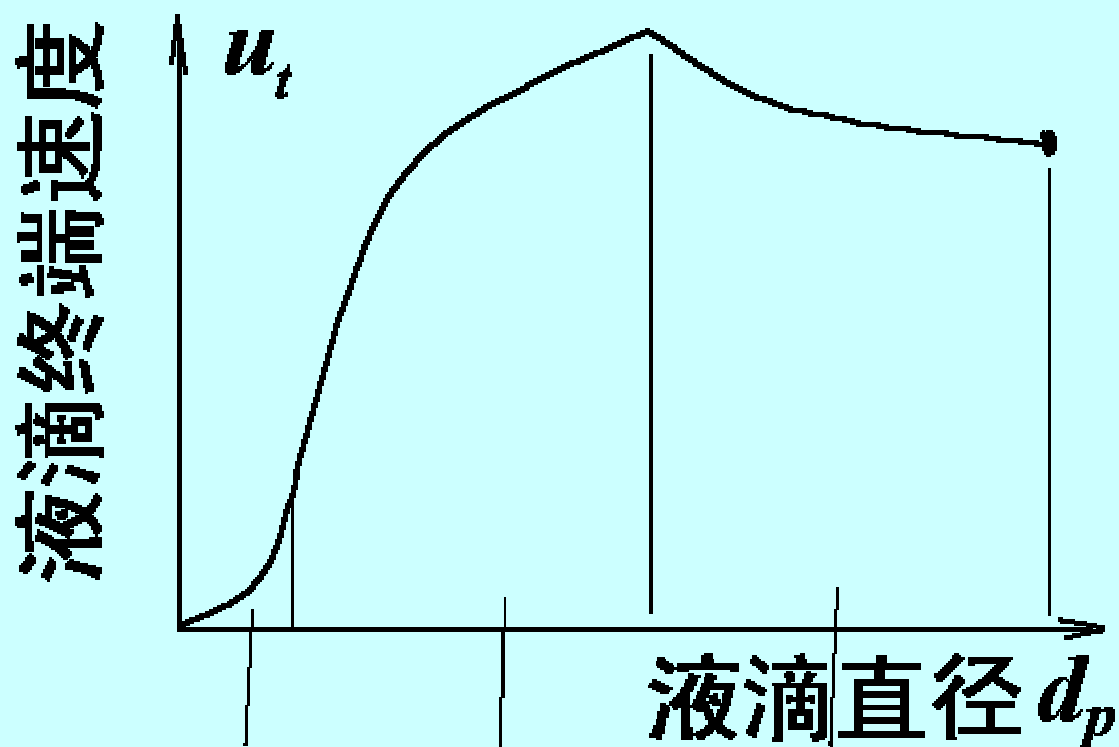
如斯托克斯区

$$u_t = \frac{d_e^2 (\rho_p - \rho) g}{18\mu}$$



4. 液滴或气泡

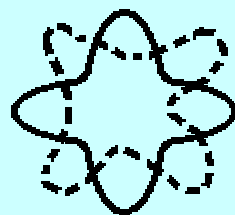
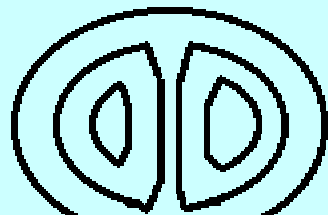
变形、内部环流、破碎



刚球液滴

环流液滴

摆动液滴



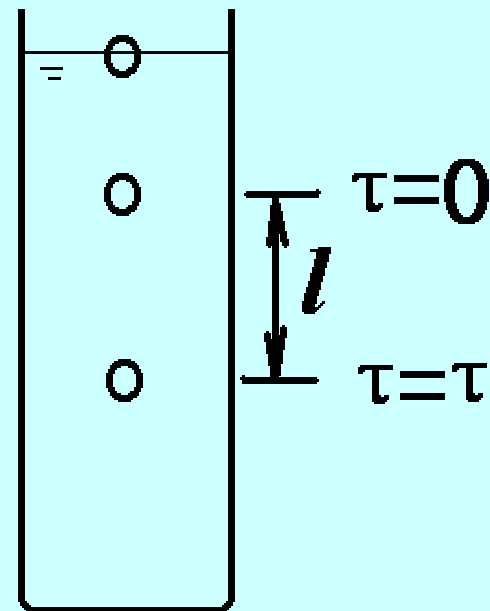
2.6 实际应用

1. 落球粘度计

已知： l, d_p, ρ_p, ρ ，

求： μ

$$u_t = \frac{l}{\tau}$$



先设在斯区,则

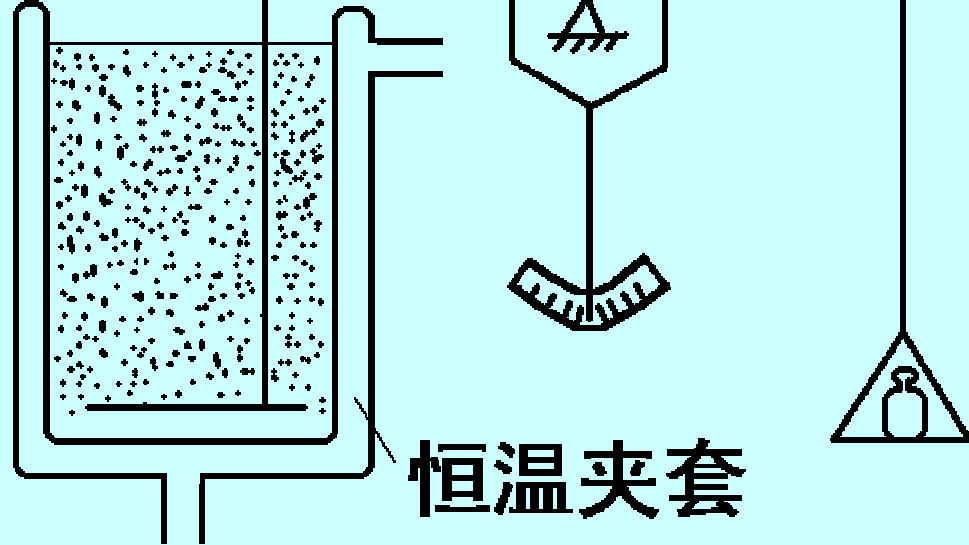
$$\mu = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g}{18 u_t}$$

再验

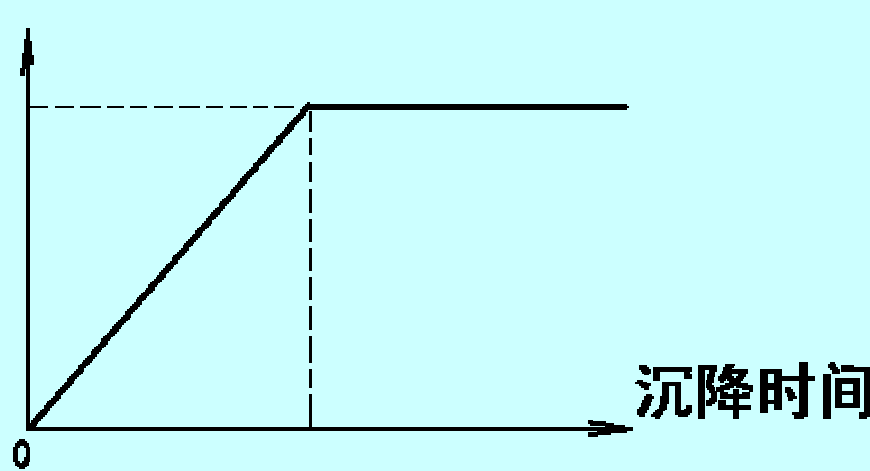
$$\text{Re}_p = \frac{d_p u_t \rho}{\mu} < 2$$

落球粘度计要求在斯托克斯区使用

2. 沉降天平



记录重量
沉降曲线

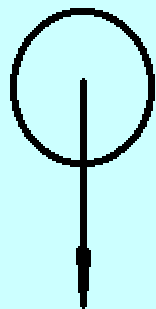


可以由已知的 μ , ρ_p , u_t 求: d_p

当沉降曲线为非直线时, 可用数学处理求得
颗粒大小分布

2.7 颗粒的绝对速度 u_p

$$u < u_t$$

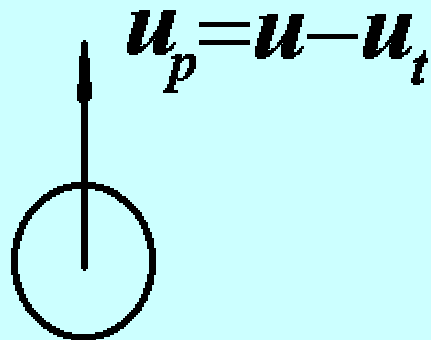


$$u_p = u_t - u$$



u

$$u > u_t$$



$$u_p = u - u_t$$



u

例3 $u_t = 0.1 \text{ m/s}$

$$u = 0, \quad u_p = \underline{\quad},$$

$$u = 0.05 \text{ m/s}, \quad u_p = \underline{\quad},$$

$$u = 0.1 \text{ m/s}, \quad u_p = \underline{\quad},$$

$$u = 0.15 \text{ m/s}, \quad u_p = \underline{\quad}。$$

3 沉降分离设备

3.1 重力降尘室

假设：入口气体均布

固体颗粒与气体同速前进

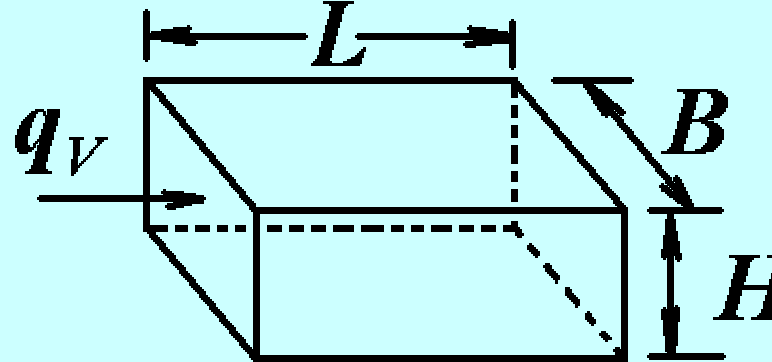
入口固体颗粒均布

$$u = \frac{q_V}{BH}$$

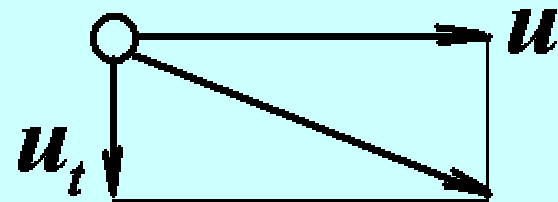
气体停留时间 $\tau = \frac{L}{u} = \frac{LBH}{q_V}$

颗粒沉降距离 $s = \tau u_t = \frac{LBH}{q_V} u_t$

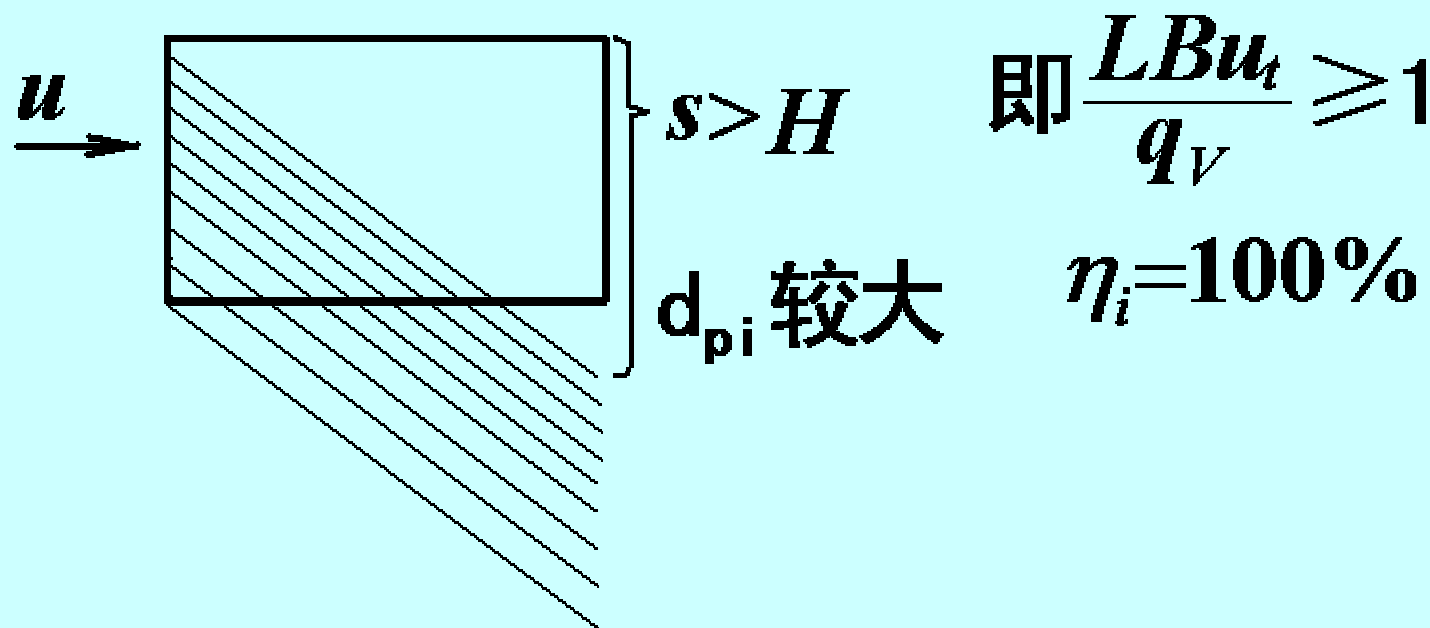
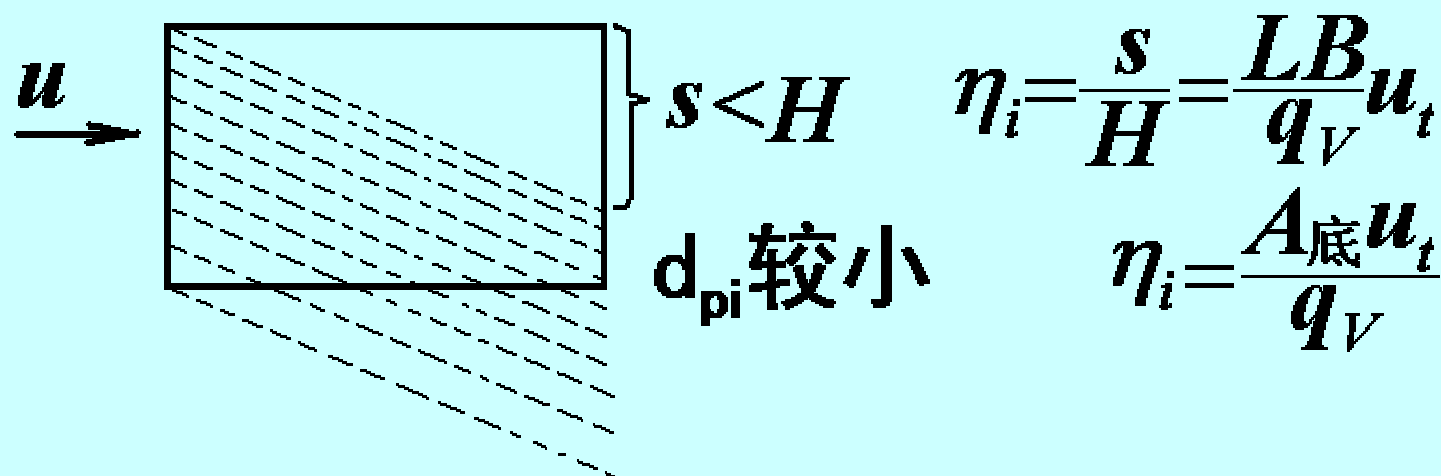
除尘效率 $\eta = \frac{C_{进} - C_{出}}{C_{进}}$

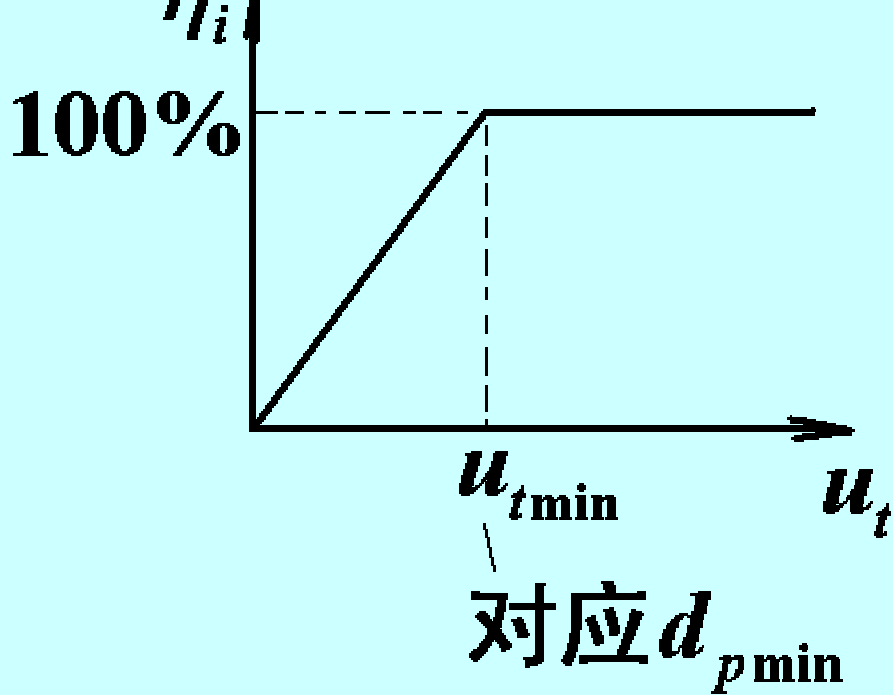


颗粒二维运动



粒级效率 $\eta_i = \frac{C_{进i} - C_{出i}}{C_{进i}}$





全部除去的最小颗粒 d_{pmin}
 降尘室的处理能力

$$q_V = A_{底} u_{tmin}$$

影响因素分析

与沉降面积成正比,与高度无关

若小颗粒在斯托克斯区沉降，则

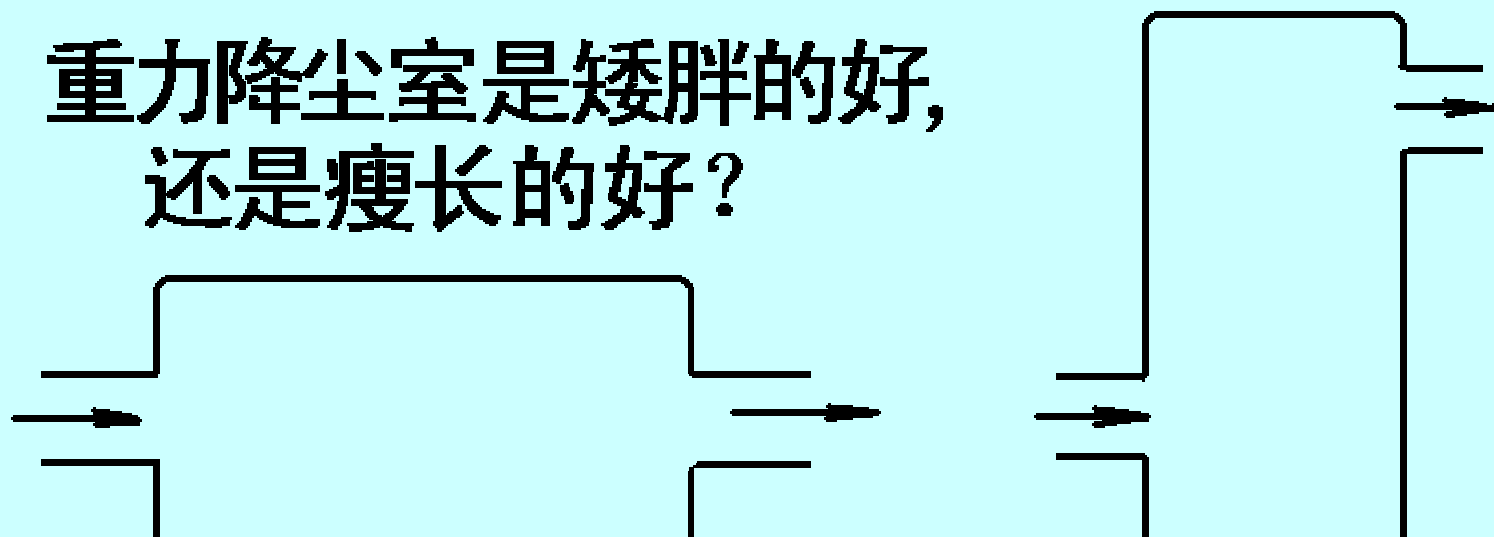
$$q_V = A_{\text{底}} \frac{d_{p\text{min}}^2 (\rho_p - \rho) g}{18\mu}$$

t ， $\mu_{\text{气}}$ ，故气体先除尘后加热比先加热后除尘好

当 $d_p < d_{p\text{min}}$ 时，若在斯区沉降

$$\eta_i = \frac{u_t}{u_{t\text{min}}} = \left(\frac{d_p}{d_{p\text{min}}} \right)^2$$

重力降尘室是矮胖的好，
还是瘦长的好？



设计型计算：

已知： q_V , 要100%除去的 d_{pmin} 求： A

操作型计算：

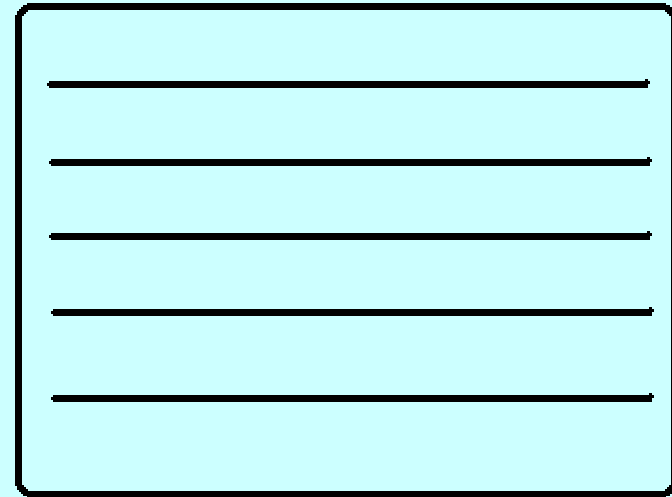
已知： q_V, A 求： d_{pmin} , $i(d_p < d_{pmin})$

重力降尘室加隔板

$$q_V = (n+1)A_{底}u_{tmin}$$

理论上增加至 $n+1$ 倍

q_V →



不利因素：实际隔板太多，速度太大，吹起板上颗粒，会重新带出

例1 现有一密度为 2500kg/m^3 ，直径为 0.5mm 的尼龙珠放在密度为 800kg/m^3 的某液体中自由沉降，测得 $u_t=7.5 \times 10^{-3}\text{m/s}$ ，试求此液体的粘度。

解：设 $Re < 2$, 则

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g}{18 u_t} = \frac{(5 \times 10^{-4})^2 \times (2500 - 800) \times 9.81}{18 \times 7.5 \times 10^{-3}} \\ &= 30.9 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}\end{aligned}$$

验 $Re = \frac{d_p u_t \rho}{\mu} = \frac{5 \times 10^{-4} \times 7.5 \times 10^{-3} \times 800}{30.8 \times 10^{-3}} = 0.097 < 2$

原设成立

例2 用降尘室除去含尘气体中的球形尘粒，尘粒密度 $\rho_p=4000\text{kg/m}^3$ ，降尘室长3m,宽2m,高1m。含尘气体 $\mu=2\times 10^{-5}\text{Pas}$ ，密度 $\rho=1.2\text{kg/m}^3$ ，流量为 $3000\text{m}^3/\text{h}$ 。

试求： 可被100%除下的最小粒径；
可被50%除下的粒径。

解：
$$u_t = \frac{q_V}{A} = \frac{3000/3600}{3 \times 2} = 0.139 \text{ m/s}$$

设 $Re < 2$, 则

$$d_p = \sqrt{\frac{18\mu u_t}{(\rho_p - \rho)g}} = \sqrt{\frac{18 \times 2 \times 10^{-5} \times 0.139}{(4000 - 1.2) \times 9.81}}$$
$$= 3.57 \times 10^{-5} \text{ m} = 35.7 \mu\text{m}$$

验 $Re = \frac{d_p u_t \rho}{\mu} = \frac{35.7 \times 10^{-6} \times 0.139 \times 1.2}{2 \times 10^{-5}} = 0.3 < 2$

$$\eta = \frac{u_t}{u_{t\min}} = \left(\frac{d_p}{d_{p\min}} \right)^2 = 0.5$$

$$d_p = d_{p\min} \sqrt{0.5} = 35.7 \times 0.707 = 25.2 \mu\text{m}$$

3.2 离心沉降

类似于重力场

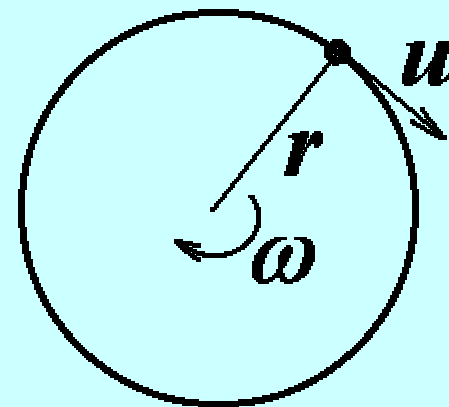
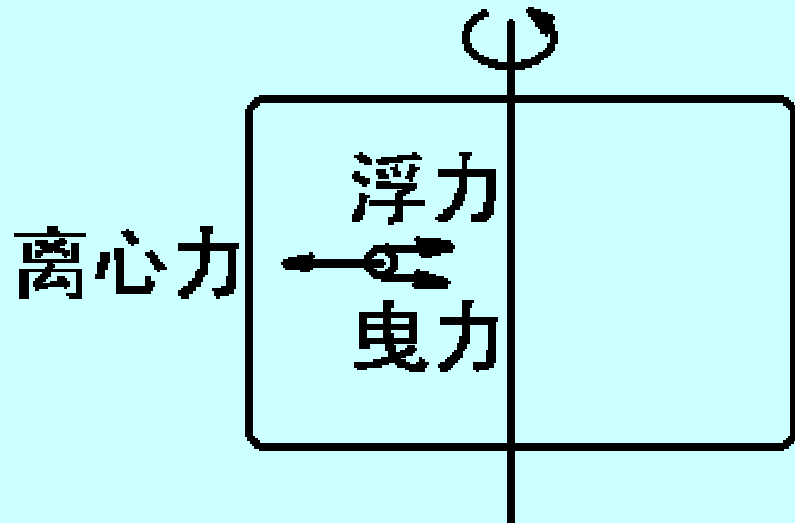
离心力 $\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p \omega^2 r$

浮力 $\frac{\pi}{6} d_p^3 \rho \omega^2 r$

曳力 $\zeta \frac{\pi}{4} d_p^2 \frac{\rho u^2}{2}$

离心分离因素 $\alpha = \frac{\text{离心力}}{\text{重力}} = \frac{\omega^2 r}{g}$

由于离心力 $\omega^2 r = \frac{u_c^2}{r}$



u 一定时,常减小半径 r 来提高离心力。

设备常为细长形。

沉降速度计算中,只要以 $\omega^2 r$ 代替 g 即可。

如斯托克斯区沉降

$$u_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho)}{18\mu} \omega^2 r$$

近似性：拟定态处理

原则上,离心力随半径是渐增的,沉降在加速。

旋风分离器(旋液分离器)

工作原理：

利用 u 产生旋转场，
颗粒被沉降至壁后滑下

1.评价性能的主要指标：

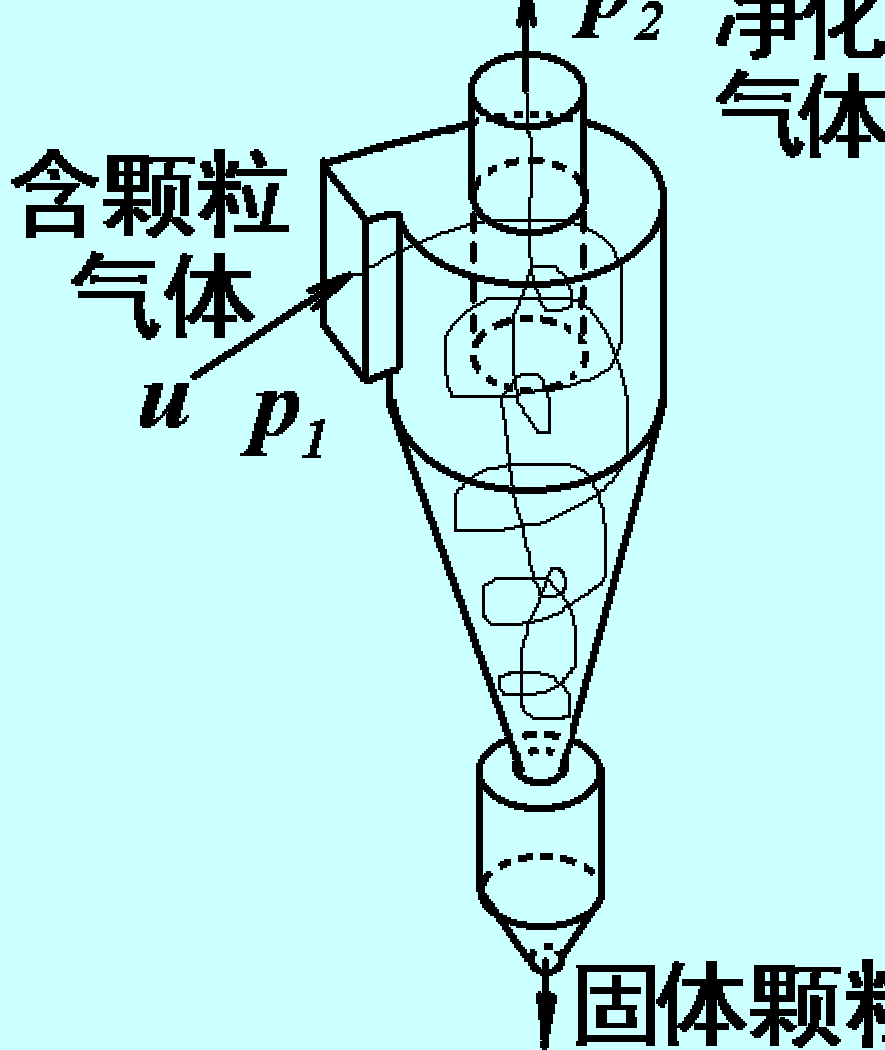
分离效率

总效率 $\eta_0 = \frac{C_{进} - C_{出}}{C_{进}}$

粒级效率

$$\eta_i = \frac{C_{进i} - C_{出i}}{C_{进i}}$$

分割直径 d_{pc} — $\eta_i=50\%$ 的颗粒直径



压降 ΔP

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho u^2}{2}$$

u , 沉降有利, 但 P

2. 操作中的两个问题:

不得欠负荷运转 u , r , u_t ,

一组旋风分离器并联, 负荷不足时关闭几个。

锥底料封要严密

按 $mu_1r_1=mu_2r_2$, 即使 p_1, p_2 均为正压,

锥底 r 小, u 大, p 小, 会出现负压。

锥底若漏气, 会重新卷起颗粒。

3 . 影响性能的主要因素：

操作气速 u ，停留时间 $\tau(= \frac{V_{\text{旋}}}{q_V})$ ，
设备半径 r ，物性 μ

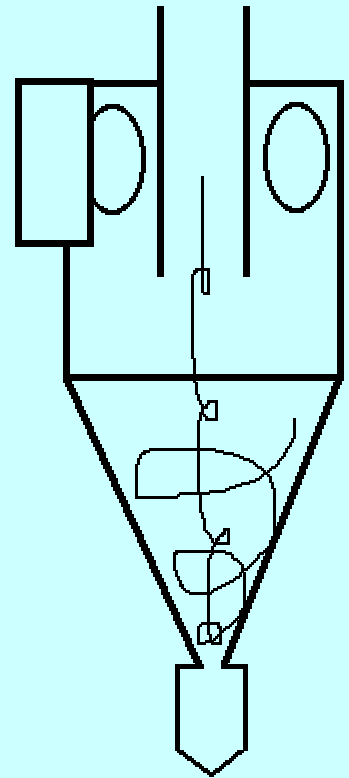
4 . 不利因素：

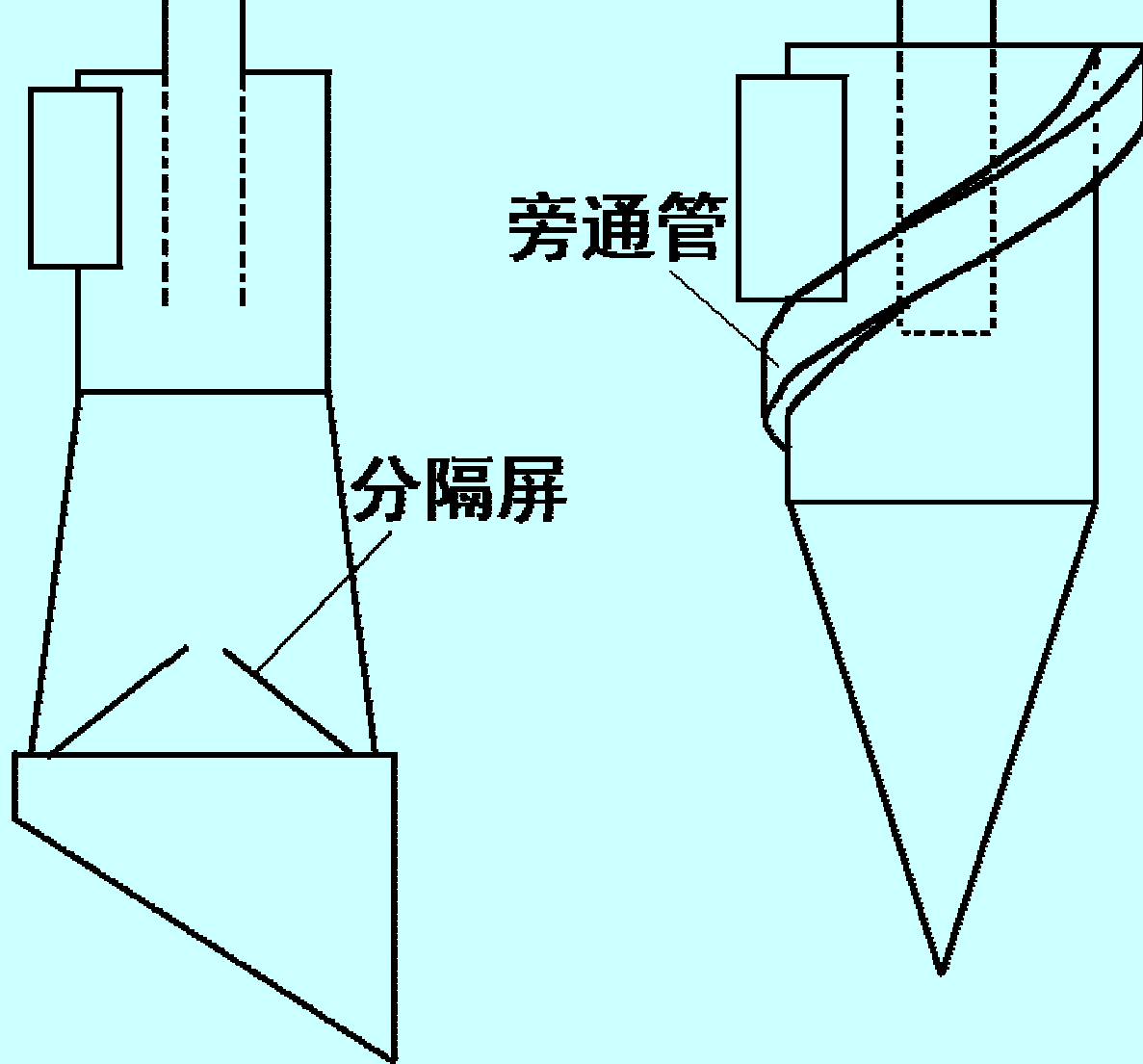
气流上升时,部分颗粒的卷起

—改进：扩散式旋风分离器

上部粉尘环，有时会被气体带出

—改进：旁通式旋风分离器





扩散式
旋风分离器

旁通式
旋风分离器

3.3 分离过程的选择

1. 颗粒的大小

种类	水泥	石灰	滑石	面粉	颜料	烟草
μm	40	1~50	10	15	2	0.2

2. 粒径和粒度分布的测定方法

方法	筛分	光学显微镜	电子显微镜
μm	>45	0.5~100	0.001~10

方法	重力沉降	离心沉降	光衍射	X线衍射
μm	2~50	0.05~10	0.001~10	0.001~0.1

3. 力学分离过程的选择

>2 μm ,	常规方法和设备	不困难
<2 μm ,	特殊方法和设备	较困难

4. 颗粒大小外的影响因素：

1) 分离的目的：是回收固相还是回收液相，或是两者都回收；

2) 物性：液固密度差，液体黏度，含固体浓度；

3) 处理量大小。

例：液体中颗粒浓度 $<0.1\%$ (wt)，深层过滤器完成澄清分离。

液固：

颗粒 $>50\ \mu\text{m}$ ，可用重力沉降器

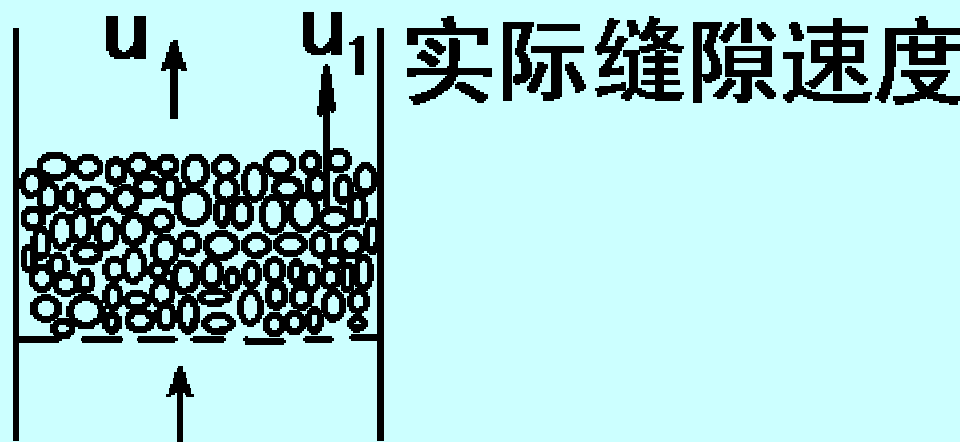
颗粒 $>3\ \mu\text{m}$ ，用旋液分离器(原理同旋风分离器)

颗粒 $>0.5\ \mu\text{m}$ ，可用离心碟式分离机

颗粒太细时，可考虑先作絮凝、凝聚处理。

4 固体流态化

4.1 流化床的操作分析



1. 当 $u_1 < u_t$ 时，固体颗粒不动—固定床
2. 当 u_1 刚大于 u_t 时，固体颗粒被吹动，
使 $u_1 = u_t$ ，但 $u < u_t$ ，颗粒被吹起而不飞走—流化床
3. $u = u_t$ ，吹走颗粒 1，
—载流床，颗粒输送(广义流态化)

起始流化速度 u_{mf} —固定床向流化床转变点气速
带出速度 u —床内颗粒被吹走的速度

4.2 流化床的操作范围

1. 操作流速 u

流化床 $u_{mf} < u < u_t$

载流床 $u > u_t$

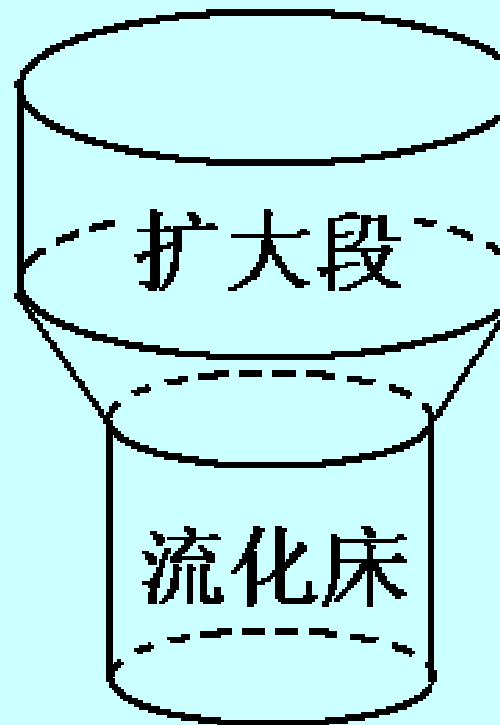
固定床 $u < u_{mf}$

$\frac{u_t}{u_{mf}}$ 表示流化床可操作范围大小

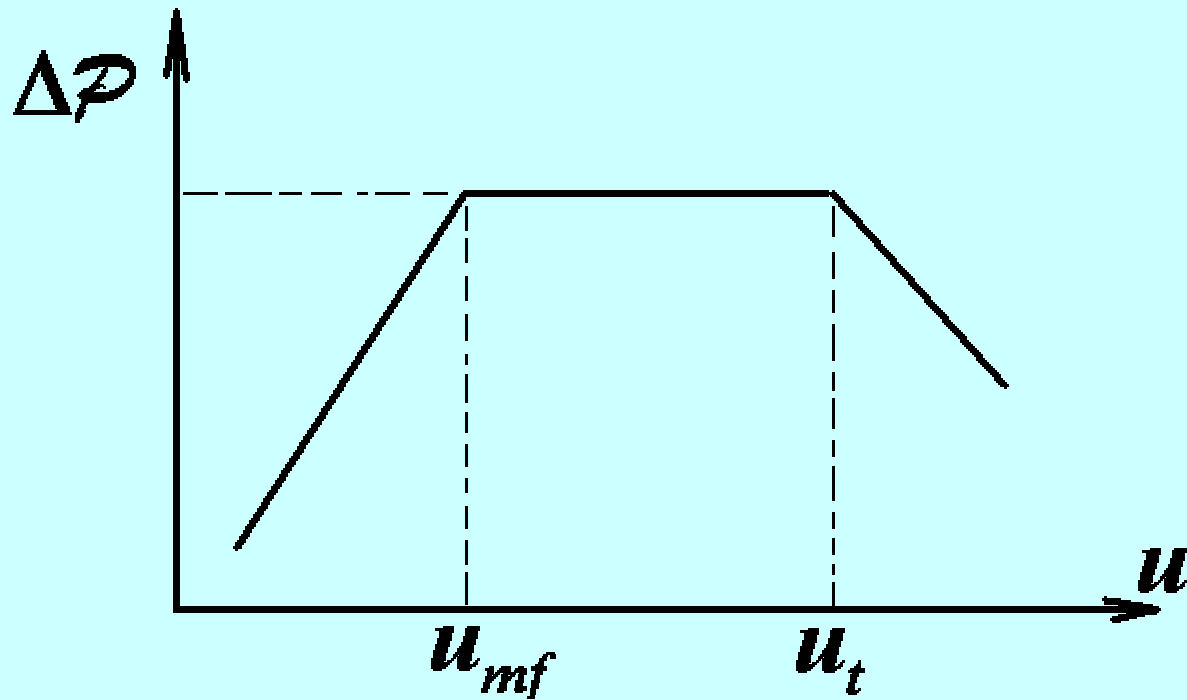
大颗粒 $\frac{u_t}{u_{mf}} = 8.61$

小颗粒 $\frac{u_t}{u_{mf}} = 91.6$ (范围大)

流化数 $= \frac{u}{u_{mf}}$ 反映实际操作状态

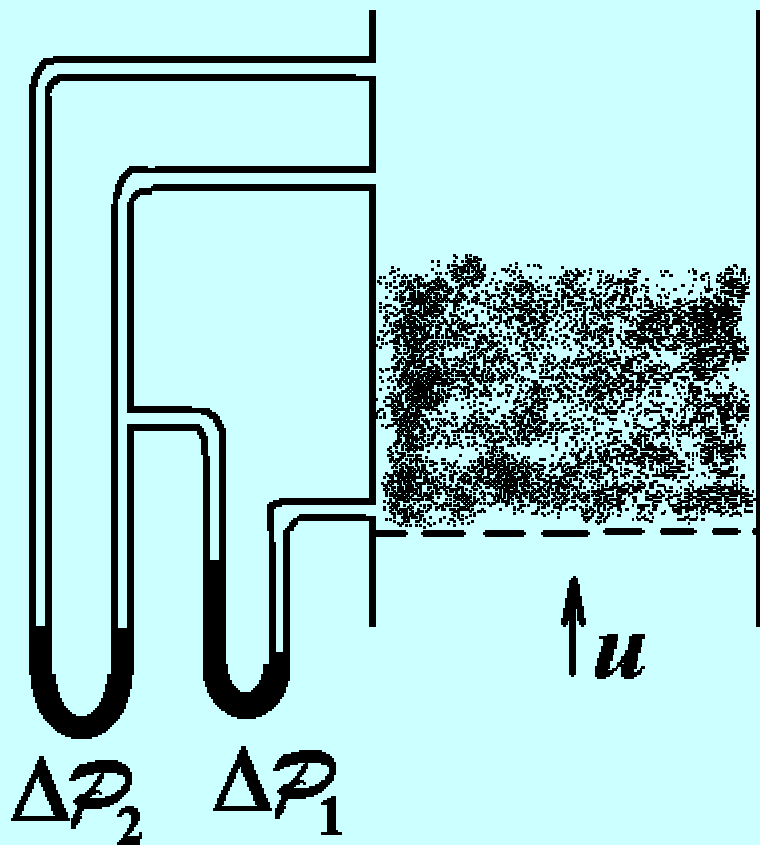


2. 操作压降



$$\Delta P = \frac{mg(1 - \frac{\rho}{\rho_p})}{A} = L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho)g$$

ΔP 与流速 u 无关



测取 ΔP_1 可以监控操作情况, 颗粒少了, 加颗粒
测取 ΔP_2 可以测定床高是否超过预定范围

3. 实际流化床

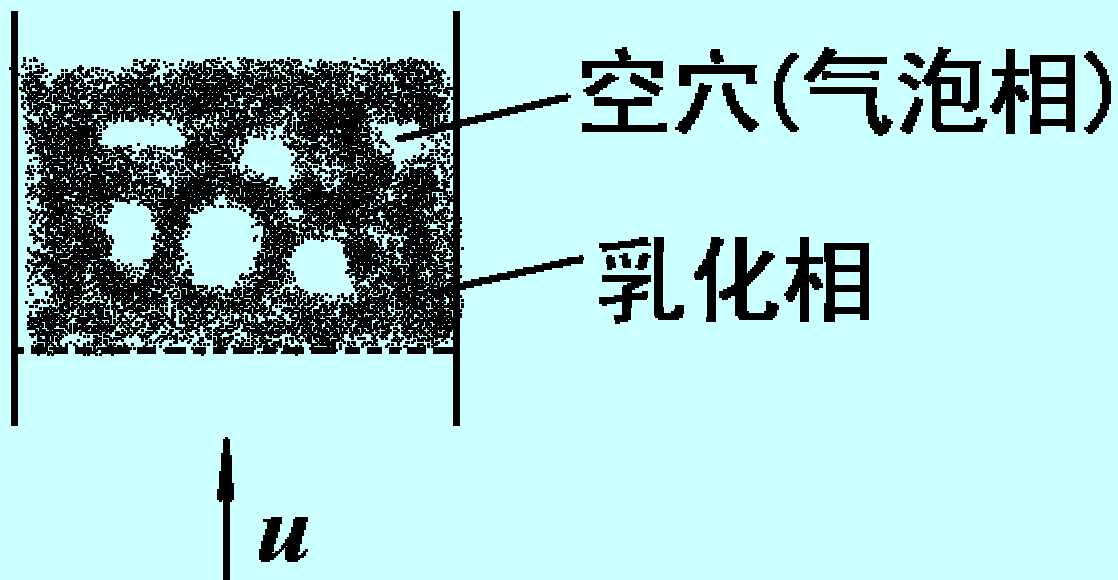
两种流化现象

散式流化—常见于液固系统

聚式流化—常见于气固系统

两者区别在于：

是否会出现空穴(不同于气泡)



4.3 流化床的主要特性

1. 液体样特性 会流动, 会喷射出来

2. 固体混合均匀

温度均匀 适用于强放热催化反应

3. 恒定的压降

$$\Delta P = L(1 - \varepsilon)(\rho_p - \rho)g$$

L , ε , 但 $L(1 - \varepsilon)$ 不变

膨胀比 $R = \frac{L}{L_{mf}}$

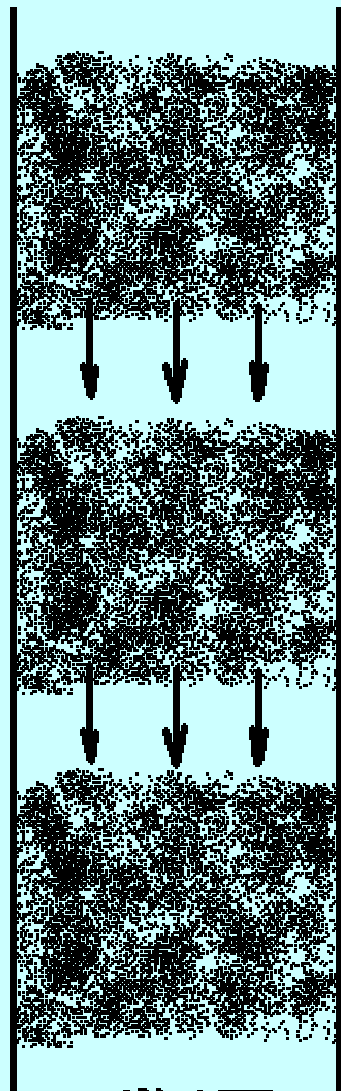
4. 气固接触的不均匀性

空穴(气泡相)中气速快, 乳化相中气速慢

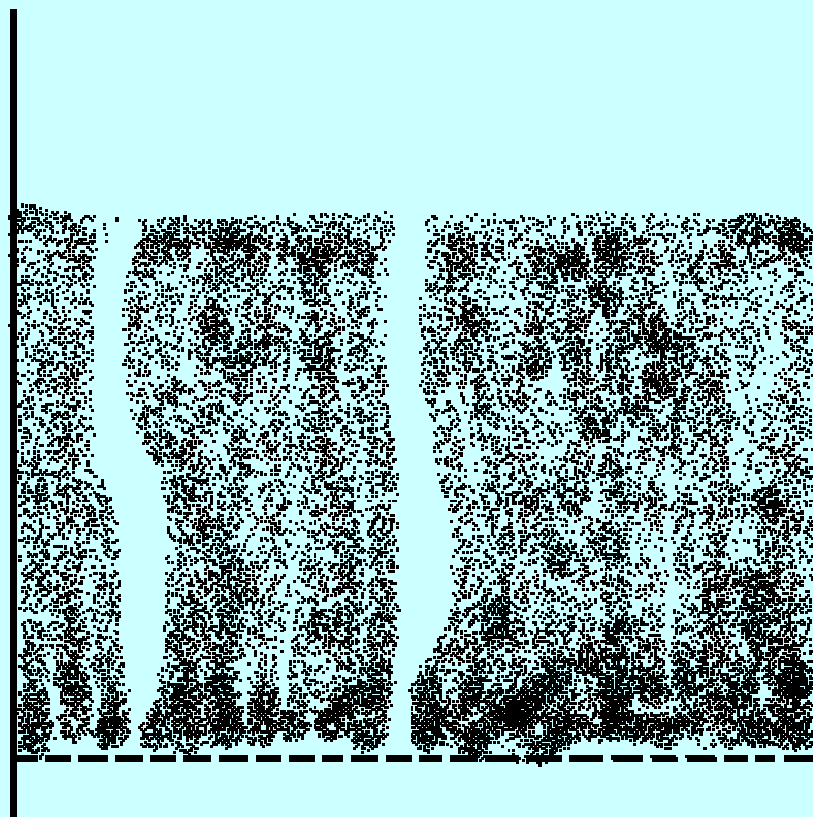
可导致不正常现象 腾涌 沟流

腾涌—空穴占领整个床截面

沟流—气流短路，与内生不稳定有关



腾涌



沟流

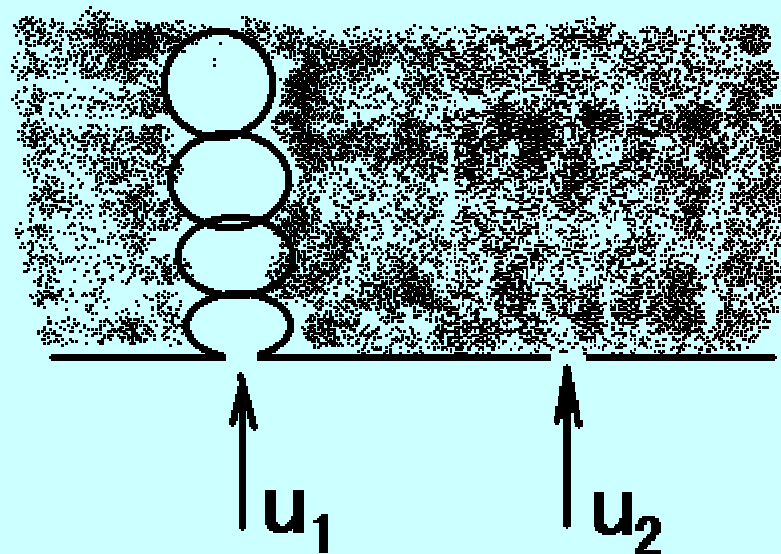
4.4 提高流化质量的措施

破空穴—加内部构件,挡板等;

采用细颗粒、宽分布的颗粒(捕捉细颗粒)

抑制沟流—增加分布板阻力,影响范围0.5m区域

以能耗为代价



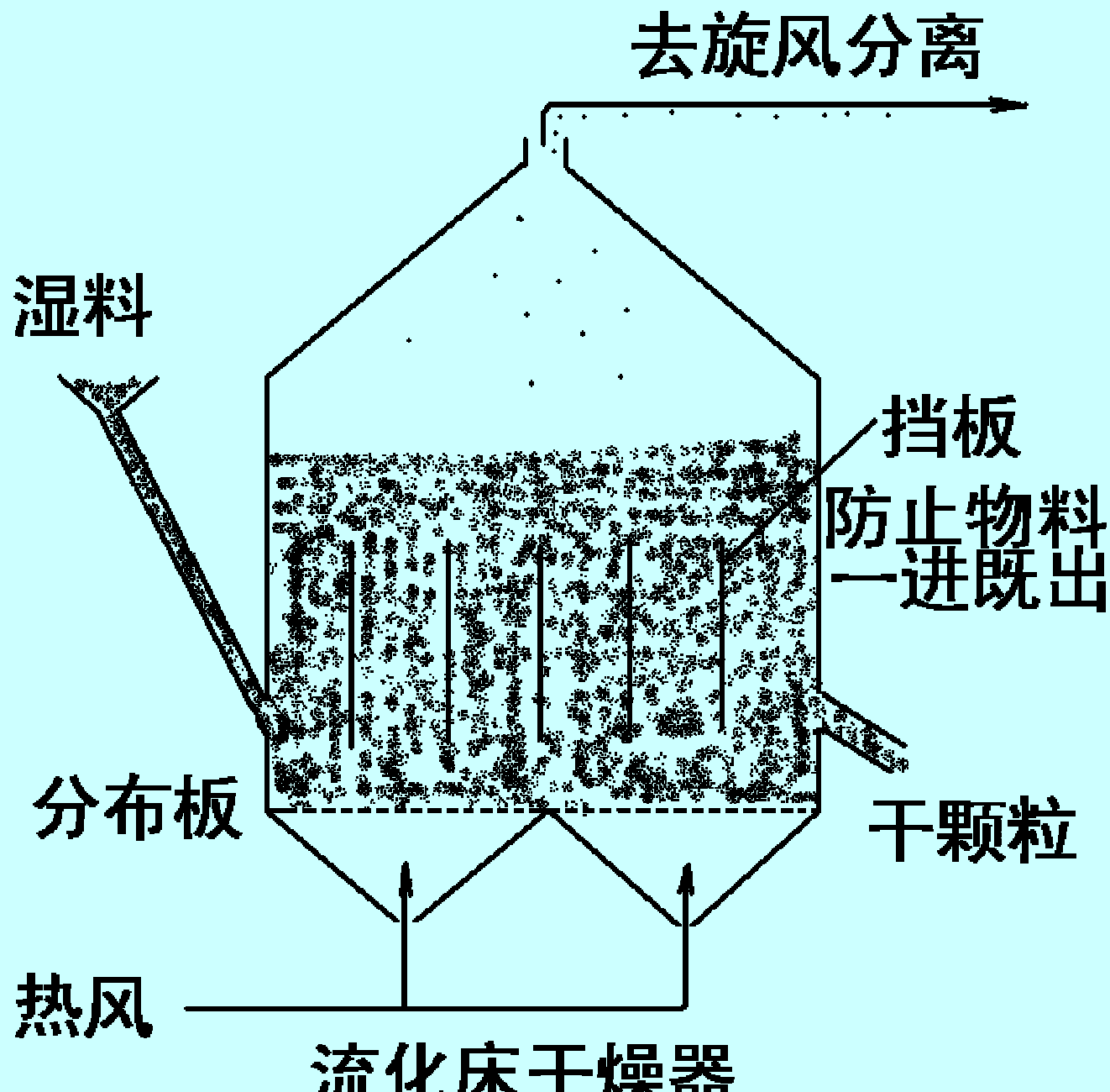
$$\zeta \frac{u_1^2}{2g} = \zeta \frac{u_2^2}{2g} + \zeta_2 \frac{u_2^2}{2g}$$

$$\frac{u_1}{u_2} = \sqrt{\frac{\zeta + \zeta_2}{\zeta}}$$

$$\zeta \rightarrow \infty, \quad \frac{u_1}{u_2} \rightarrow 1$$

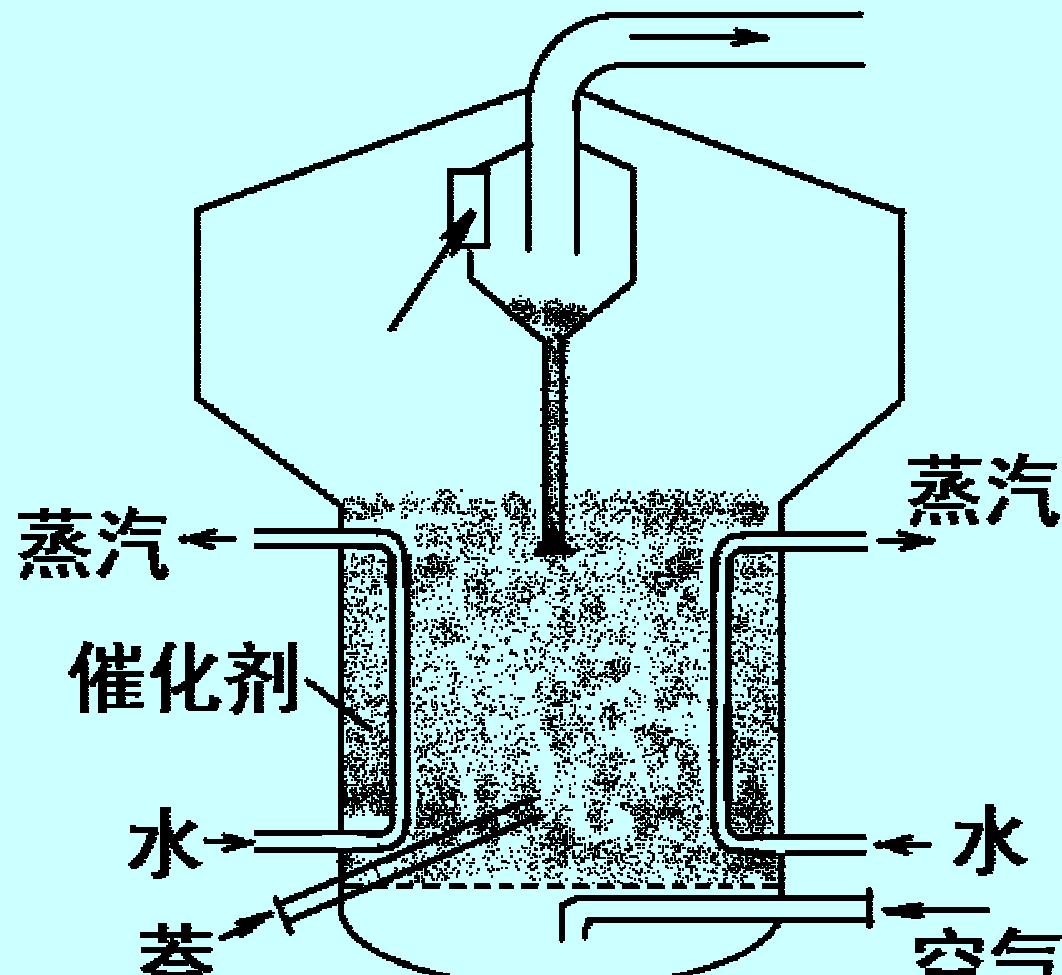
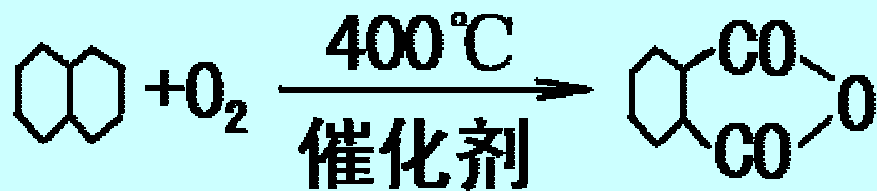
4.5 工业应用

干燥

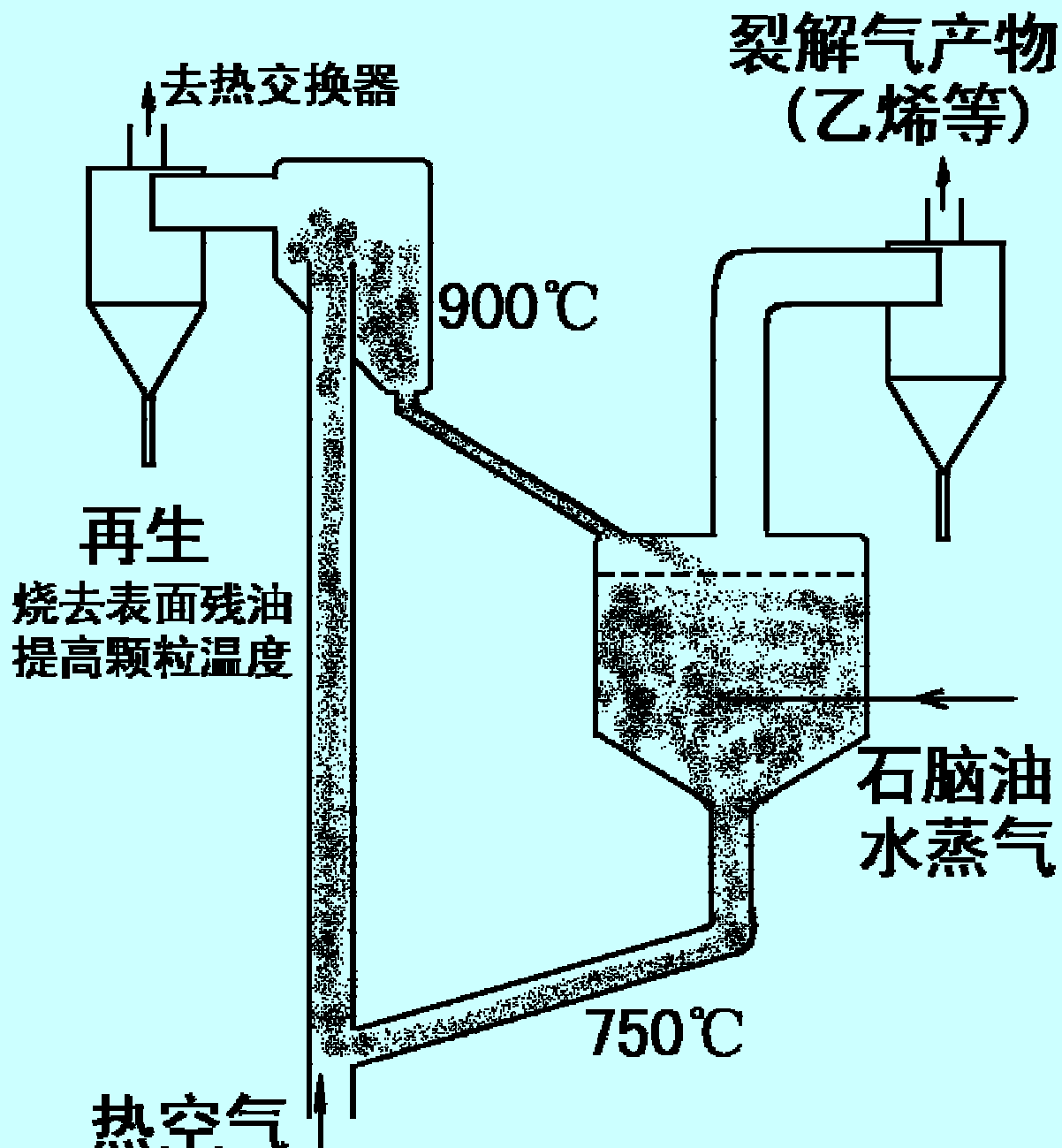


强放热反应

如：萘氧化制苯酐



沙子炉石油热裂解



5 气力输送

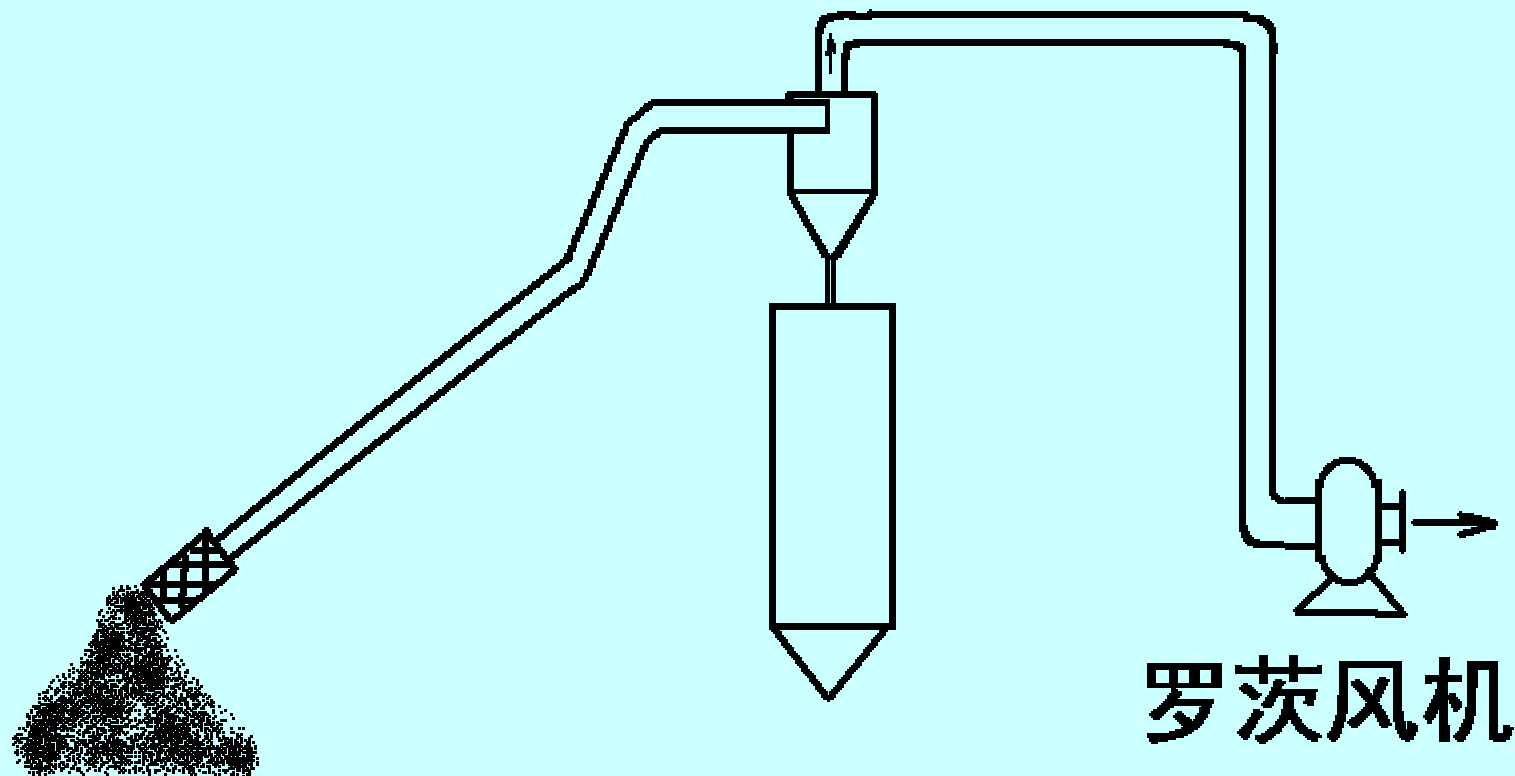
1. 优点：
 - 密闭
 - 不受地形的限制
 - 连续化
 - 结合其它操作

稀相输送：固气比小

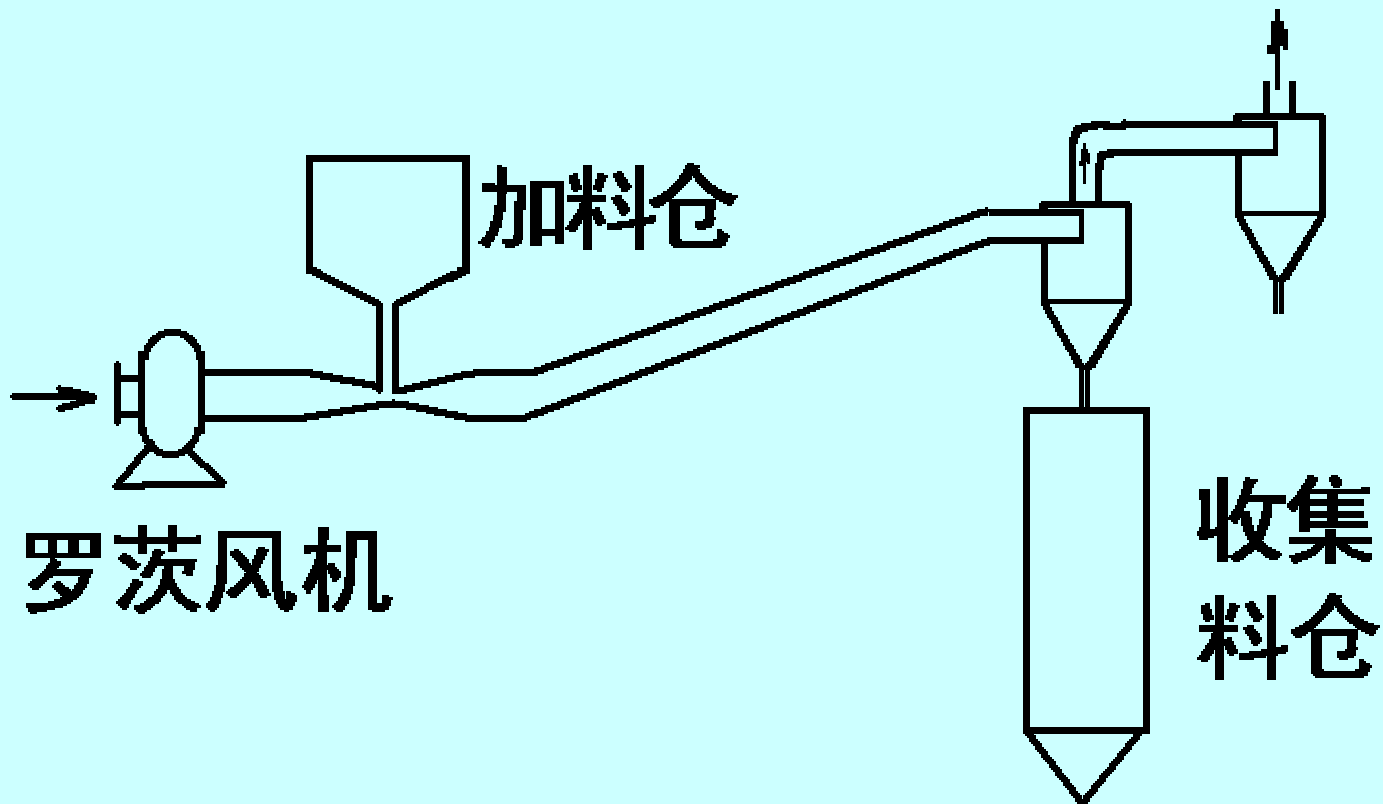
密相输送：固气比大

2. 输送装置

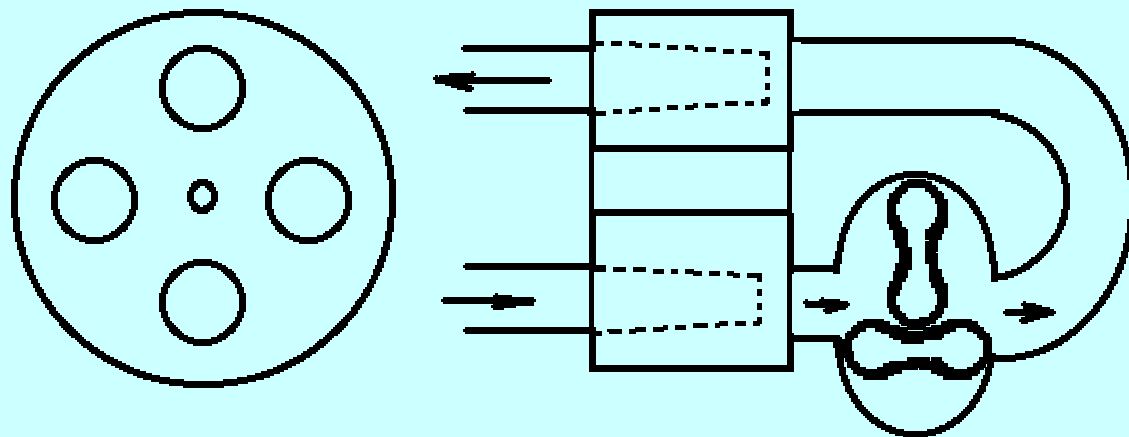
真空吸引式



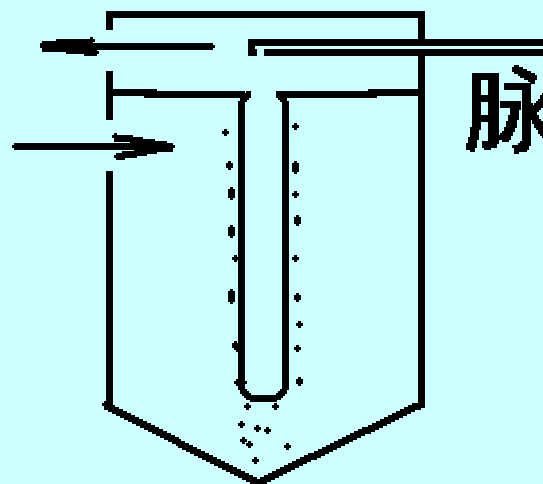
压送式



吸-压回转式



粉粒捕捉
袋滤器



脉冲反吹