习题：1，2，4，5

# 5 颗粒沉降和流态化

## 5.1 概述

### 5.1.1 研究的物系

—固体颗粒与流体间的相对运动

### 5.1.2 内容

沉降：重力、离心力

流态化(流化床规律)

固体颗粒对流体的相对运动规律与物理学中的自由落体运动规律根本区别：

自由落体运动规律不考虑流体与固体运动的阻力，由于 $a=\dfrac{6}{\psi d_e}$ 。

*自由落体*：固体尺寸较大，a 很小，阻力远小于重力，因而可以略去。

相对运动颗粒尺寸较小或流体为液体时，阻力较大，不容忽略。

## 5.2 颗粒的沉降运动

### 5.2.1 两种曳力

—表面曳力和形体曳力

以前各章中讨论了固体壁面对流体流动的阻力及由此而产生的流体的机械能损失。

本节将讨论流体与固体颗粒相对运动时流体对颗粒的作用力。

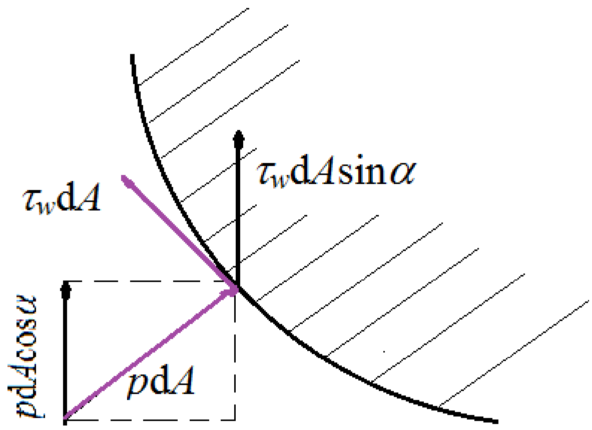
两者的关系是作用力和反作用力的关系。

流体对固体颗粒的绕流

表面力

压力 $\left\{\begin{array}{l} p \\ \tau_w \end{array}\right.$

剪力




$\mathscr{P}=p+h\rho g$

∴压力 pdA 在流动方向上的分力 pdAcosα

$$\oint_A p\cos\alpha dA=\oint_A \mathscr{P}\cos\alpha dA-\oint_A \rho ghdA$$

形体曳力　　浮力

（流动引起）

α：所取微元面积与流动方向成夹角

当静止时　　形体曳力=0

则压力=浮力（方向相反）

总曳力=表面曳力+形体曳力

$$F_D=\oint_A \tau_w\sin\alpha dA+\oint_A \mathscr{P}\cos\alpha dA$$

讨论：1、曳力与阻力比较

| | 曳力 | 阻力 |
|---|---|---|
| 对象 | 固体 | 流体 |

概念　　　　　　　力　　　　　力

两者关系：1、方向相反，大小相同

2、$F_D$=表面曳力 + 形体曳力

摩擦造成　流动压差造成

影响 $F_D$ 因素很多，如受颗粒的形状与定向影响。$F_D$ 值通过实验解决。

对爬流，绕圆球曳力可获得理论计算值

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

总曳力与流体的密度$\rho$，黏度$\mu$，流动速度 $u$ 有关，而且受颗粒的形状与定向的影响。

一般流动条件下的球形颗粒及其它形状的颗粒，曳力的数值尚需通过实验来解决。

5.2.2 曳力系数 $\zeta$

对光滑圆球：　$F_D=F(d_p,\mu,\rho,u)$

量纲分析：

$$\frac{F_D}{d_p^2 u^2 \rho} = f\left(\frac{\mu}{\rho u d_p}\right)$$

$$\frac{F_D}{(\frac{\pi}{4} d_p^2)(\frac{1}{2}\rho u^2)} = \Phi\left(\frac{\rho u d_p}{\mu}\right)$$

Ap—流动方向上颗粒的最大投影面积。

对球形　$A_p = \dfrac{\pi}{4} d_p^2$

令曳力系数 $$\zeta = \frac{F_D}{A_p(\frac{1}{2}\rho u^2)} = \Phi(\mathrm{Re}_p)$$

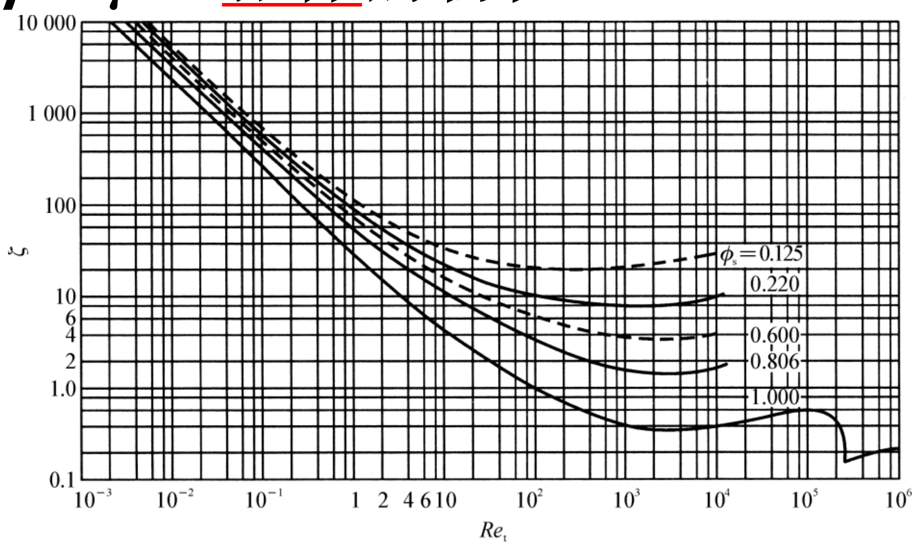
即 $$F_D = \zeta A_p \cdot \frac{1}{2}\rho u^2$$

其中：$\zeta$ 与 $\mathrm{Re}_p$ 关系由实验确定

$$\mathrm{Re}_p = \frac{\rho u d_p}{\mu}$$

$d_p$—颗粒直径　　$u$—颗粒流动速度

$\rho$，$\mu$—流体的物性




球形颗粒：

1、stokes(斯托克斯)区　　$\mathrm{Re}_p \leqslant 2$

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

2、Allen(阿仑)区　　$2 < \mathrm{Re}_p < 500$

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

3、牛顿区　　$500 < \mathrm{Re}_p < 2\times10^5$

$\zeta=0.44$

曳力与流速的平方成正比，服从平方定律

4、$Re_p > 2\times10^5$ 后　　　$\zeta=0.1$

原因：边界层内的流动自层流转为湍流

非球形颗粒：

$\psi$不同，对应于不同的 $\zeta$　图 5-2

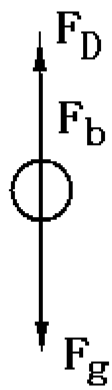
$\psi$越小，与球形偏差越大

注意：　$A_p$ 取颗粒的最大投影面积

$d_p$：取等体积球形颗粒的当量直径

5.2.3 自由沉降速度

1. 受力分析




a. 场力(体积力)$F$

重力场　　　$F_g=mg$

离心力场　　$F_c=mr\omega^2$

b.浮力　$F_b$

重力场　　$F_b = \frac{m}{\rho_p}\rho g$

离心力场　$F_b = \frac{m}{\rho_p}\rho r\omega^2$

c. 曳力 $F_D$(形体曳力+表面曳力)

$$F_D = \zeta A_p(\frac{1}{2}\rho u^2)$$

根据牛顿第二定律:

$$(F-F_b) \quad - \quad F_D \quad = \quad m\frac{du}{d\tau}$$

净重力　　曳力　　重力×加速度

$$mg-\frac{m}{\rho_g}\rho g-\zeta A_p(\frac{1}{2}\rho u^2)=m\frac{du}{d\tau}$$

$$\therefore \frac{du}{d\tau}=\underbrace{\frac{(\rho_p-\rho)}{\rho_p}g}_{(1)}-\underbrace{\frac{\zeta A_p}{2m}\rho u^2}_{(2)}$$

当 $u=0$ 时,(2)项为 0

$\rho_p>\rho$, 产生加速度

随着 $u\uparrow$,(2)项逐渐增大,直至$\frac{du}{d\tau}=0$,即进入等速运动阶段.

对于小颗粒,颗粒沉降初期的加速度阶段很短暂,可以忽略.

近似认为颗粒始终以恒定不变沉降速度

—相对匀速速度，$u_t$ 匀速下降。对单颗粒称为自由沉降。

2、沉降速度 $u_t$ 计算

$$\frac{\rho_p-\rho}{\rho_p}g=\frac{\zeta A_p}{2m}\rho u^2$$

球形：$A_p=\frac{1}{4}\pi d_p^2 \qquad m=\rho_p\cdot\frac{1}{6}\pi d_p^3$

代入得：$u_t=\sqrt{\dfrac{4(\rho_p-\rho)gd_p}{3\rho\zeta}}$ （通式）

原则上：对于确定的流固系统，物性 $\rho$ 和 $\rho_p$，$\mu$ 都是定值，$u_t$～$d_p$ 存在一一对应关系。

但$\zeta=\Phi(\dfrac{\rho u d_p}{\mu})$是非线性的，因此要用试差求解。对于斯托克斯区：

以$\zeta=\dfrac{24}{\mathrm{Re}_p}$代入通式，则

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

$u_t$ 计算推荐方法：

首先假定 Stokes 区，再校核 $\mathrm{Re}_p\leqslant 2$,如不行，设 $\zeta$＝0.44，即牛顿区，验算 $\mathrm{Re}_p>500$,再不行，必然就是阿仑区.

**5.3 沉降分离设备**

沉降分离的基础：

　悬浮系中的颗粒在外力作用下的沉降运动.

沉降分离的前提：两相的密度差.

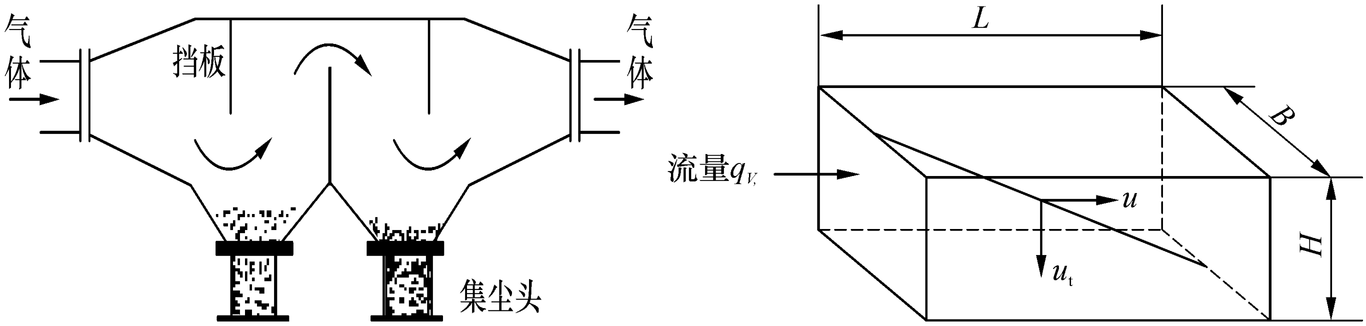
　悬浮颗粒的直径越大，两相的密度差越大，效果越好.

　根据作用于颗粒上的外力不同，可分为重力

沉降和离心沉降两大类.

**5.3.1 重力沉降器**

**1.降尘室**




容积一般较大，$u$<1m/s，除大于 50μm 粗颗粒。

$$\tau_r(\text{停留时间})=\frac{\text{设备内的流动容积（持留量）}}{\text{流体通过设备的流量}}$$

$$=\frac{AH}{q_V}$$

其中：$A$:降尘室的底面积（BL）

$H$：降尘室的高度

$$\tau_t(\text{沉降时间})=\frac{H}{u_t}$$

为满足除尘要求：

$\tau_r \geq \tau_t$　　至少 $\tau_r=\tau_t$

$$\therefore \frac{AH}{q_V}=\frac{H}{u_t}$$

即　　$q_V=Au_t$

讨论：

**1、$q_V$ 与 $H$ 无关，降尘室设计成扁平型。**

**2、当 $q_V$ 一定时，对操作型而言，$A$ 一定**

$$u_t = \frac{q_v}{A}$$

**对应 $d_p=d_{pmin}$ 能 100%除去颗粒直径**

**3、对处理 $d_p$ 一定时，为提高 $q_v$，设计时采用多层隔板，增加 $A$，n 块隔板有(n+1)$A$ 面。**

**例：用降尘室除去含尘气中球形尘粒。颗粒在气流中均匀分布，尘粒密度为 4000kg/m$^3$。降尘室长 4m，宽 2m，高 1m.含尘气体黏度为 3×10$^{-5}$Pa.s,密度 1.2 kg/m$^3$,流量为 3600m$^3$/h.试求：(1)可被 100%除下的最小粒径，(2) 可被 50%除下的最小粒径**

**解：$q_v=u_t$A**

$$u_t = \frac{q_v}{A} = \frac{3600}{3600 \times 8} = 0.125 m/s$$

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

$$0.125 = \frac{d_p^2(4000 - 1.2) \times 9.81}{18 \times 3 \times 10^{-5}}$$

**$d_p$=4×10$^{-5}$m=41.5μm**

$$\mathrm{Re}_p = \frac{d_p u_t \rho}{\mu} = \frac{41.5 \times 10^{-6} \times 0.125 \times 1.2}{3 \times 10^{-5}} = 0.2 < 2$$

(2) $\eta = \frac{h}{H} = \frac{u_{tp}}{u_t} = (\frac{d_{pB}}{d_{pA}})^2$

$\therefore d_{pB} = \sqrt{\eta} d_{pA} = \sqrt{0.5} \times 41.5 = 29.3\mu m$