

# 沉降分离

---

**沉降:在外力作用下,利用非均相混合物中分散相和连续相之间密度的不同,发生相对运动而实现的分离操作**

**沉降分离的前提条件是:两相有密度差。悬浮颗粒的直径越大、两相的密度差越大,沉降分离的效果就越好。**

**本节涉及:**

**固体颗粒与流体间的相对运动规律**

**相关操作:重力沉降、离心沉降**

**相关设备:降尘室、旋风分离器**

## 颗粒的沉降运动

---

流体与固体颗粒间的相对运动：

- 颗粒不动，流体动；
- 颗粒动，流体不动；
- 两者均动，但相对速度不为零。

相对速度一样时，三种情况并无本质区别。

**两种曳力：**表面曳力和形体曳力—分别来自于剪应力和压强。

总曳力为表面曳力与形体曳力之和。粘性流体对球体的低速绕流，总曳力的理论计算式是**Stokes' Law**：

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

---

实际情况很复杂：

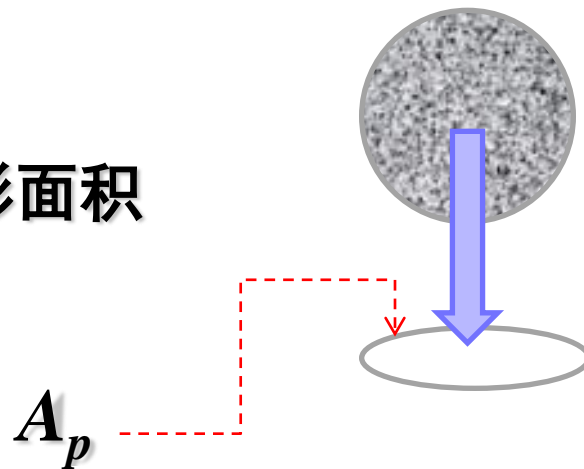
对光滑圆球  $F_D = f(u, \rho, \mu, d_p)$

因次分析  $\frac{F_D}{A_p \cdot \frac{1}{2} \rho u^2} = \phi\left(\frac{d_p u \rho}{\mu}\right)$

$\zeta$  曳力系数： $\zeta = \phi(\text{Re}_p)$   $\text{Re}_p = \frac{d_p u \rho}{\mu}$

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

$A_p$  是颗粒在运动方向上的最大投影面积



## ζ 曳力系数

---

$d_p$  等体积球形颗粒的当量直径

对球形颗粒( $\psi=1$ )而言:

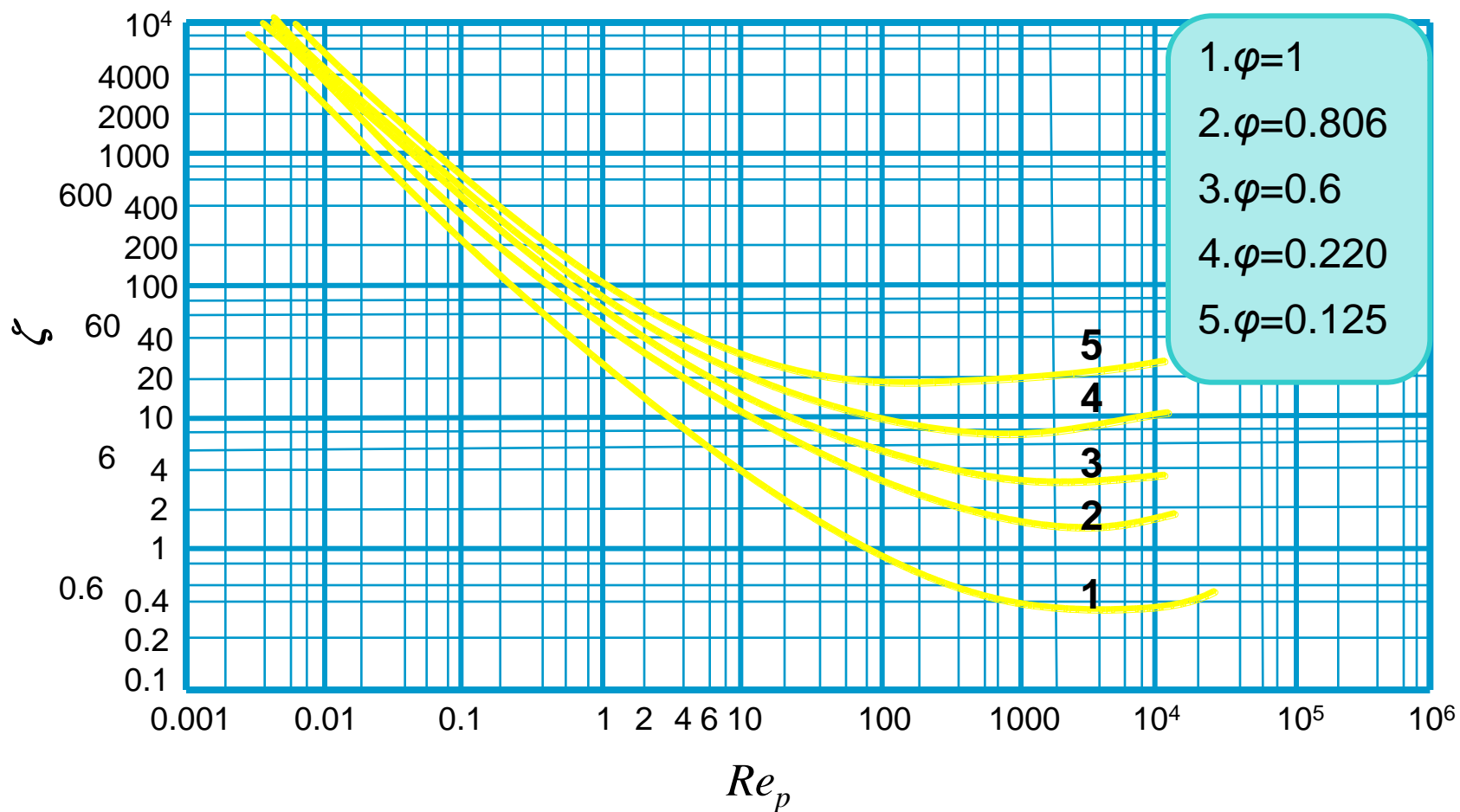
Stokes Region:  $\zeta = \frac{24}{\text{Re}_p}$      $\text{Re}_p < 1$      $F_D \propto u^1$

Allen Region:  $\zeta = \frac{18.5}{\text{Re}_p^{0.6}}$      $1 < \text{Re}_p < 1000$

Newton Region:  $\zeta \approx 0.44$      $1000 < \text{Re}_p < 2 \times 10^5$      $F_D \propto u^2$

对非球形颗粒( $\psi \neq 1$ )而言, 其 $\zeta$ 取值见P<sub>100</sub>图3-13。

# 曳力系数 $\zeta$ 与颗粒雷诺数的关系



## 静止流体中颗粒的自由沉降

沉降的加速阶段：

颗粒在场力（重力或离心力）的作用下，将沿场力方向作沉降运动。设颗粒的初速度为零，颗粒的密度大于流体的密度，则在外力作用下，颗粒将产生加速运动，但流体对颗粒的曳力随即出现。故沉降过程中颗粒的受力情况为：

①场力 $F$       重力场       $F_g = mg$

                  离心力场  $F_c = mr\omega^2$

②浮力 $F_b$       重力场       $F_b = m\rho g / \rho_p$

                  离心力场  $F_b = m\rho(r\omega^2) / \rho_p$

## 静止流体中颗粒的自由沉降

③ 曳力  $F_D = \zeta A_p \left( \frac{1}{2} \rho u^2 \right)$

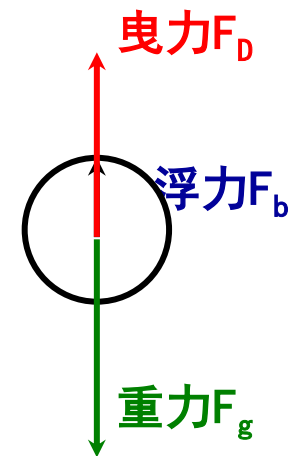
以重力场为例，根据牛顿第二定律有：

$$F_g - F_b - F_D = m \frac{du}{d\tau}$$

$$\frac{du}{d\tau} = \left( \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) g - \frac{\zeta A_p}{2m} \rho u^2$$

对球形颗粒：

$$\frac{du}{d\tau} = \left( \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \right) g - \frac{3\zeta}{4d_p \rho_p} \rho u^2$$



# 沉降速度

---

## 沉降的等速阶段

当曳力的作用使 $du/d\tau=0$ 时，颗粒将作匀速运动，此时颗粒的速度称为沉降速度或终端速度，以 $u_t$ 表示。

※对小颗粒而言，加速段很短，所经历的距离很短，加速段可以忽略。

## 颗粒的沉降速度

当 $du/d\tau=0$ 时，

$$u_t = \sqrt{\frac{4(\rho_p - \rho)gd_p}{3\rho\zeta}} \quad \text{其中 } \zeta = \phi(\text{Re}_t), \text{Re}_t = \frac{d_p u_t \rho}{\mu}$$

对于确定的流-固系统，物性参数均为定值，颗粒的沉降速度只与粒径有关，即 $u_t$ 与 $d_p$ 一一对应关系。

计算沉降速度需用试差法！



# 沉降速度

---

## Stokes' Law:

$$\zeta = \frac{24}{\text{Re}_p} \quad \text{Re}_p < 1$$

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

## Allen's Law:

$$\zeta = \frac{18.5}{\text{Re}_p^{0.6}} \quad 1 < \text{Re}_p < 1000$$

$$u_t = 0.27 \sqrt{\frac{d_p(\rho_p - \rho)g}{\rho}} \text{Re}_t^{0.6}$$

## Newton's Law:

$$\zeta \approx 0.44 \quad 1000 < \text{Re}_p < 2 \times 10^5$$

$$u_t = 1.74 \sqrt{\frac{d_p(\rho_p - \rho)g}{\rho}}$$

# 影响沉降速度的因素

---

## 非球形

同一种物质，颗粒的球形度越小，非球形颗粒的形状、投影面积对沉降速度影响越显著，沉降阻力越大，沉降速度越小。

## 干扰沉降

颗粒相互干扰、有效密度和粘度比纯流体的高。干扰沉降速度较自由沉降速度小。

## 壁效应

在近壁处，颗粒受到的曳力较大，使此处的颗粒沉降速度较自由沉降时的为小。