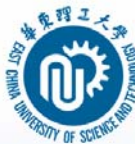




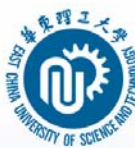
## 第三章 场分离技术

### 离心分离

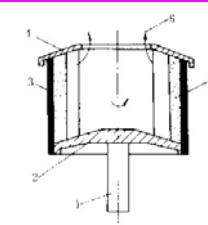
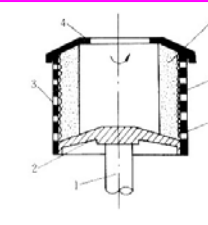


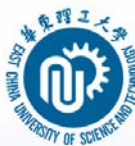
### 高速离心机及1926年诺贝尔化学奖

- 离心机定义：利用离心力分离非均相混合物（液-液、液-固、液-液-固、液-气、液-气-固）的通用机械。发明第一台高速离心机，斯维伯格获诺贝尔化学奖，斯维伯格数也成为非均相体系的分离难度的主要判据。
- **高速离心机**，1926年诺贝尔化学奖，斯维伯格[瑞典]，转速15000 r/min，分离因素15000，发明高速离心机，并用于高分散胶体上的研究。
- **离心沉降**：在**离心力场**中，利用分散相和连续相之间的密度差异，使之发生相对运动而实现分离、浓缩和提纯的操作过程。



## 离心过滤与离心沉降对比

离心机	沉降机（分离机）	过滤机
转鼓示意图  柱型 锥型 锥柱型	 <p>图 5-1 1—转鼓回转轴; 2—转鼓底; 3—转鼓壁; 4—拦液板; 5—滤渣; 6—滤液</p>	 <p>图 5-3 1—转鼓回转轴; 2—转鼓底; 3—转鼓壁; 4—拦液板; 5—滤渣; 6—滤液; 7—滤网</p>
转鼓结构	回转轴、转鼓（底、壁、拦液板）	
液流方向	轴向进出	轴向进 径向出
转鼓壁	无孔 无滤网 固相沉降 液相经过	有孔 有滤网 固相滞留 液相排出
转鼓内	卸料装置（沉降机） 旋转碟片组（分离机）	卸料装置 （刮刀、螺旋等）



## 离心力场的基本特性

### 离心力

**离心力：**由于做圆周运动的物体运动的方向或速度发生改变而产生的，是一种惯性力。它与向心力大小相等，方向相反。离心力的作用方向是沿旋转半径从圆心指向圆外，其大小可表示为：

$$F_r = mr\omega^2 = \frac{mu^2}{r} = mr(4\pi^2n^2) \quad (3-125)$$

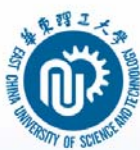
式中：  $m$  — 颗粒质量

$r$  — 颗粒质心在离心场中所处的回转半径

$\omega$  — 离心场的旋转角速度

$n$  — 转速

- 离心力  $F_r$  随着颗粒质量  $m$ 、颗粒所处回转半径  $r$ 、旋转角速度  $\omega$  的增大而增大；离心力与重力场无关。



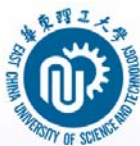
## 离心力场的基本特性

### 分离因数

- 分离因数：固体颗粒在离心力场中所受的离心力与重力之比称为分离因数。

$$f = \frac{F_r}{F_g} = \frac{mr\omega^2}{mg} = \frac{r\omega^2}{g} = \frac{4\pi^2 rn^2}{g} \quad (3-126)$$

- 分离因数是表示离心机分离性能的主要指标之一， $f$ 值越大，物料受的离心力愈大，分离效果也越好。
- 分离因数 $f$ 与转鼓半径 $r$ 成正比且与转速 $n$ 的2次方成正比，因此提高转速时分离因数增长的很快。
- 高速离心机的结构都是转速高，直径小，分离因数大。
- **重力沉降与离心沉降的主要区别**：重力场可以认为是均匀的，重力场的强度是固定不变的；而离心力场强度是以分离因数表示的，分离因数可通过改变转鼓半径和转速来调节，离心力场是变化的。



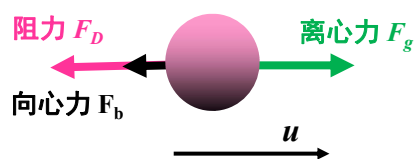
## 离心场中的沉降分离

### 离心沉降分离的力平衡分析

离心力：  $F_r = mr\omega^2 = \frac{\pi d^3 \rho_s}{6} r\omega^2$

流体向心力：  $F = \frac{\pi d^3 \rho_L}{6} \omega^2 r$

阻力：  $F_D = C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_L u^2}{2}$

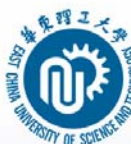


- 当颗粒所受作用力与阻力达到平衡时， $u$  达到恒定，即可得到最终径向速度 $u$ ：

$$u = \sqrt{\frac{4dr\omega^2(\rho_s - \rho_L)}{3\rho_L C_D}}$$

$$u_t = \sqrt{\frac{4d_p g (\rho_s - \rho_L)}{3\rho_L C_D}}$$

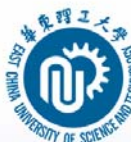




## 离心力场中的沉降分离

### 离心、重力场沉降速度比较

	重力场	离心力场
层流区	$u_g = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_L) g}{18\mu}$	$u = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_L) r \omega^2}{18\mu}$
过渡区	$u_g = 0.1528 \left[ \frac{d_p^{1.6} (\rho_s - \rho_L) g}{\mu^{0.6} \rho_L^{0.4}} \right]^{1/1.4}$	$u = 0.1528 \left[ \frac{d_p^{1.6} (\rho_s - \rho_L) r \omega^2}{\mu^{0.6} \rho_L^{0.4}} \right]^{1/1.4}$
湍流区	$u_g = 1.741 \left[ \frac{d_p (\rho_s - \rho_L) g}{\rho_L} \right]^{1/2}$	$u = 1.741 \left[ \frac{d_p (\rho_s - \rho_L) r \omega^2}{\rho_L} \right]^{1/2}$
区别	颗粒沿重力方向等速沉降	颗粒沿径向加速沉降



## 离心力场中的沉降分离

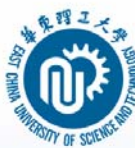
### 离心沉降的分离极限

- 离心沉降5μm以下颗粒相当困难，1μm以下的胶体颗粒更难分离。由于颗粒布朗运动（与温度有关）引起的扩散作用，颗粒将长期保持悬浮状态而不能被分离，这种现象称为离心沉降分离的极限，这种颗粒直径称为极限颗粒直径，即 $(d_p)_{cr}$ ：

$$(d_{cr}) = 1.732 \left[ T / (\rho_s - \rho_L) r \omega^2 \right]^{1/4} \quad (3-130)$$

式中：  $T$ —绝对温度， $K$   
 $r$ —颗粒所处的回转半径  
 $\omega$ —旋转角速度  
 $\rho_L, \rho_s$ —液、固密度





## 离心沉降设备的 $\Sigma$ 理论

### 离心机生产能力理论

**沉降离心机的生产能力：**能将所需分离的最小固相粒子沉降在转鼓内，而不随着分离液带出的最大悬浮液流量；这样，分离因数一定的同一离心机对不同的物料要求生产能力也将不同。

$\Sigma$ —当量沉降面积，是另一个表示离心沉降设备分离性能的指标，是1952年Ambler提出的计算离心机生产能力的理论

对于柱形（管式高速离心机）转鼓：

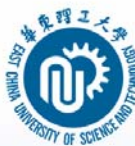
$$Q = u_o \frac{\omega^2 r}{g} \pi D L (1 - \lambda + \frac{\lambda^2}{4}) = u_o f A = u_o \Sigma \quad (3-138)$$

式中  $Q$ —离心沉降设备的生产能力

$u_o$ —沉降速度

$D$ —转鼓直径

$L$ —转鼓长度



## 离心沉降设备的 $\Sigma$ 理论

### 离心机生产能力理论

$A$ —表示随半径变化而变化的沉降面积的修正面积

$$A = \pi D L (1 - \lambda + \frac{\lambda^2}{4})$$

式中：  $\lambda$ —系数，一般工业离心机取0.1-0.3

对于柱形转鼓， $\Sigma$ 值：

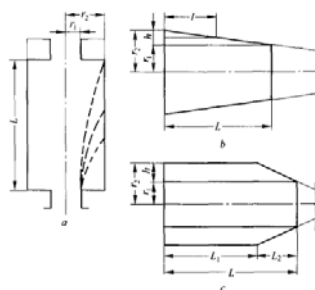
$$\Sigma = f \pi D L (1 - \lambda + \frac{\lambda^2}{4}) \quad (3-139)$$

对于锥形转鼓， $\Sigma$ 值：

$$\Sigma = f \pi D L (\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \lambda + \frac{\lambda^2}{4}) \quad (3-140)$$

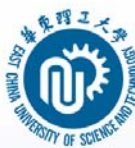
对于柱锥形转鼓， $\Sigma$ 值：

$$\Sigma = f \pi D L [(\frac{1}{2} - \frac{2}{3} \lambda + \frac{\lambda^2}{4}) + \frac{L_1}{L} (\frac{1}{2} - \frac{1}{3} \lambda + \frac{\lambda^2}{12})] \quad (3-141)$$



不同形式转鼓几何尺寸





## 分离效率 $E_T$

物料平衡：悬浮液中的固相质量  $M$  等于沉渣中固相质量  $M_c$  和分离液中固相质量  $M_f$  之和，即：

$$M = M_c + M_f$$

分离总效率定义为：

$$E_T = \frac{M_c}{M} = 1 - \frac{M_f}{M}$$

如果已知悬浮液中固相质量的百分浓度为  $C_o\%$ ，分离液中固相质量的百分浓度为  $C_f\%$ ，沉渣含湿量（质量，湿基）为  $W_o\%$

则：

$$E_T = \frac{1 - (C_f - C_o)}{1 - \frac{C_f}{100 - W_o}}$$

当沉渣含湿量和分离液中含固量都较小时，可按下列式计算：

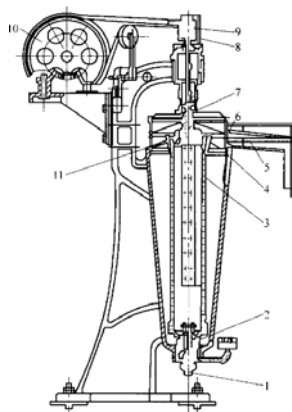
$$E_T = 1 - \frac{C_f}{C_o} = \frac{C_o - C_f}{C_o}$$



## 典型离心沉降机

### 管式离心机

- ◆ 结构：细长无孔转鼓（直径40 -150mm,长径比4-8），悬挂于离心机上端的橡胶挠性驱动轴上，下部与空心轴连接。
- ◆ 用途：管式离心机可用于液—液分离和液—固分离。
- ◆ 优点：1、平均允许停留时间要比同体积的转鼓式离心机的长；2、分离能力大；3、结构紧凑和密封性好。
- ◆ 缺点：1、容量小；2、分离能力较碟片式的低；3、固—液分离只能是间歇操作。
- ◆ 使用范围：为避免过分频繁清洗，管式离心机通常用于处理含固量小于1%的悬浮液。



1—进料管；2.8—轴承装置；3—转鼓；4—机壳；  
5—重液出口；6—轻液出口；7—转鼓轴颈；  
9—皮带；10—电机；11—分离头



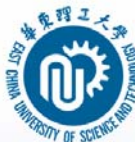
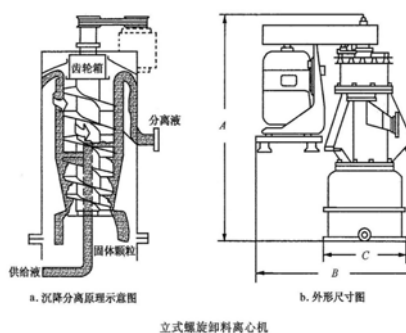


## 螺旋卸料式离心机

### 立式螺旋卸料离心机

螺旋卸料式离心机根据主轴方位分为卧式和立式两类，其中卧式螺旋卸料离心机应用最为广泛。

- ◆ 结构：整个机体为立式，上部驱动，下面进料、排渣，上面排液
- ◆ 特点：澄清区和干燥区长度可通过环形溢流堰调节，沉渣可洗涤
- ◆ 使用范围：适用于固相颗粒粒度大于 $5\mu\text{m}$ 以上的悬浮液的脱水和固相含量少的悬浮液的澄清，特别是固体颗粒浓度及粒度变化范围较大，相对密度较大的悬浮液的分离

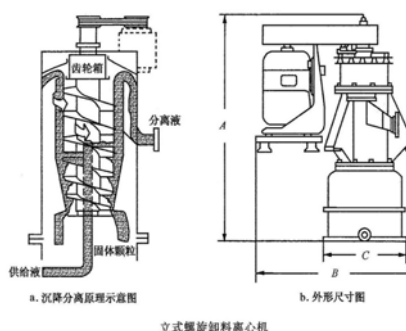


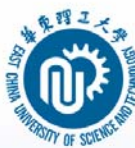
## 螺旋卸料式离心机

### 立式螺旋卸料离心机

螺旋卸料式离心机根据主轴方位分为卧式和立式两类，其中卧式螺旋卸料离心机应用最为广泛。

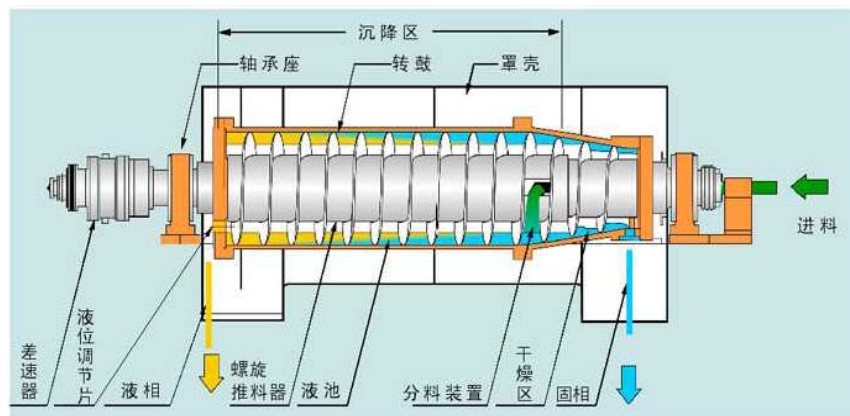
- ◆ 结构：整个机体为立式，上部驱动，下面进料、排渣，上面排液
- ◆ 特点：澄清区和干燥区长度可通过环形溢流堰调节，沉渣可洗涤
- ◆ 使用范围：适用于固相颗粒粒度大于 $5\mu\text{m}$ 以上的悬浮液的脱水和固相含量少的悬浮液的澄清，特别是固体颗粒浓度及粒度变化范围较大，相对密度较大的悬浮液的分离



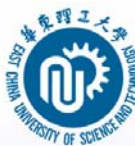


## 卧式螺旋卸料离心机

结构简图



卧式螺旋卸料离心机结构简图



## 卧式螺旋卸料离心机

主要结构部件

- 转鼓——转鼓的结构形状和技术参数体现了这种离心机的特点和使用效果。
- 螺旋输送器——卧螺离心机重要的部件之一，最常用的是连续式整体螺旋叶片。
- 差速器——卧螺离心机最重要最复杂的部件，其性能的高低决定了整台机器能否正常运行。
- 卧螺离心机过载保护机构——防止进料量或进料浓度突然增大，导致差速器损坏的保护结构。
- 主轴承及润滑、密封系统。







## 卧式螺旋卸料式离心机

### 主要特点

- 应用范围广
- 对物料适应性较大
- 能自动、连续，长期运转，维修方便，能够进行封闭操作
- 单机生产能力大，结构紧凑，占地小，操作费用低
- 固相沉渣的含湿量一般比过滤离心机高，大致接近于真空过滤机
- 固相沉渣洗涤效果不好
- ◆ 最大的优点：  
结构紧凑、体积小、自动连续操作、处理量大，应用范围广



## 卧式螺旋卸料式离心机

### 主要技术参数

#### ➤ 转鼓内径与有效工作长度

转鼓内径越大，其处理量也越大，但转鼓内径增大时，离心机的转速必然降低，分离因数也降低

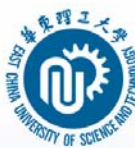
目前使用较多的是转鼓内径为200-600mm的卧螺离心机，通常固相浓度高、粒子粗的物料常选用 $L/D < 2$ 的卧螺离心机，分离难分离的物料时常选用 $L/D > 3$ 的卧螺离心机

#### ➤ 转鼓半锥角

转鼓半锥角是指转鼓椎体部分母线与轴线之间的夹角。锥角大有利于固相脱水，但螺旋的推料功率会增大。

对易分离物料时，转鼓半锥角一般选 $10^\circ \sim 11^\circ$ ，而分离难分离的物料时，半锥角一般选 $6^\circ \sim 8^\circ$ ，可使沉渣的输送效果提高。





## 卧式螺旋卸料式离心机

### 主要技术参数

#### ➤ 转鼓转速与分离因数

分离因数与转鼓转速的平方成正比，转速越高，分离因数越大，离心机的分离效果也越好，但一般大直径的卧螺离心机分离因数都较低。

#### ➤ 转速差

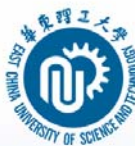
卧螺离心机的转速差是指转鼓的绝对转速与螺旋输送器的绝对转速之差。转速差大，螺旋的输渣量大，但转速差过大会使机内流体的扰动加剧，增大沉渣的含湿量。

分离易分离物料时，转速差一般取50~60r/min，分离难分离物料时转速差取5~20r/min为宜。

#### ➤ 溢流内径

#### ➤ 沉降区长度和干燥区长度

#### ➤ 螺旋头数



## 碟式离心机

### 概述

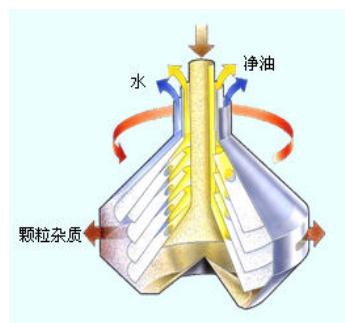
- ◆ 碟式离心机分离因数一般大于3500，转鼓转速为4000—12000 r/min，常用于高度分散物系的分离。

- ◆ 历史：1878年瑞典首创，并首先应用于牛奶分离；1888年艾尔显首先发现通过把转鼓分成若干分离区可大大提高分离效率；1896年瑞典阿法-拉伐公司研制出世界上第一台喷嘴排渣碟式离心机。

- ◆ 对于碟式离心机， $\Sigma$ 值：

$$\Sigma = \frac{2\pi Z \omega^2 (r_{\max}^3 - r_{\min}^3)}{3g}$$

- ◆ 原理：碟式离心机是利用“面积原理（浅池原理）”通过碟片把转鼓分割成若干个分离室来提高分离效率和处理量的



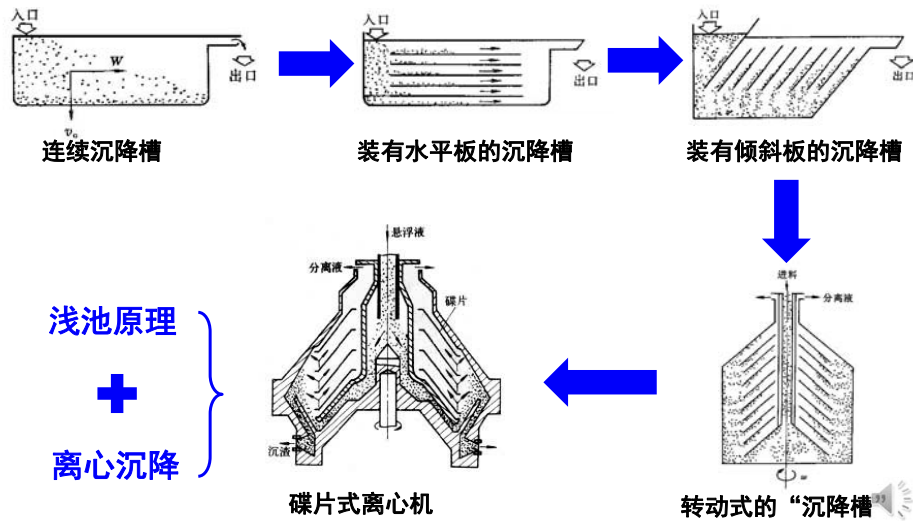
碟式离心机结构图



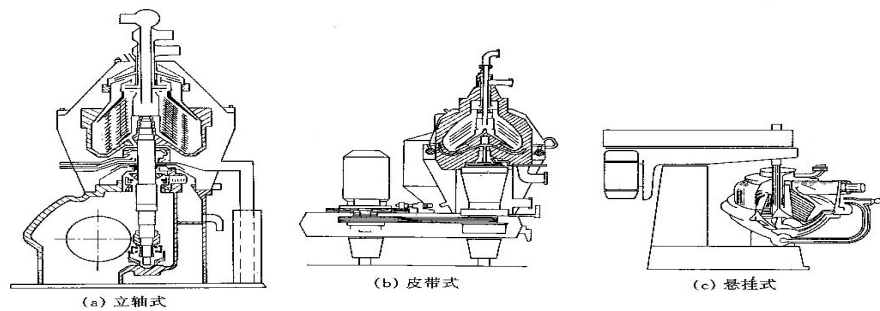


## 碟式离心机

发展“进化”史



## 碟式离心机



□ 主要结构部件

碟式离心机机壳形式

- ◆ 机壳
- ◆ 传动系统
- ◆ 转鼓组件—碟式离心机进行物料分离的主要部件
- ◆ 自动控制

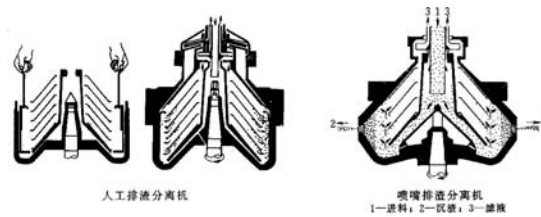


## 碟式离心机

分类

➤ 按排渣方式分类：

- 人工排渣碟式离心机
- 喷嘴排渣碟式离心机
- 活塞排渣碟式离心机



不同碟式离心机的基本技术参数

碟式离心机排渣形式	转鼓直径/mm	转鼓转速/(r/min)	当量沉降面积/cm <sup>2</sup>
人工排渣型	200 ~ 550	5 000 ~ 7 000	$6 \times 10^7 \sim 90 \times 10^7$
喷嘴排渣型	315 ~ 500	4 000 ~ 7 000	$7 \times 10^7 \sim 50 \times 10^7$
环网排渣型	315 ~ 560	4 000 ~ 7 500	$7 \times 10^7 \sim 70 \times 10^7$



## 翻袋离心机

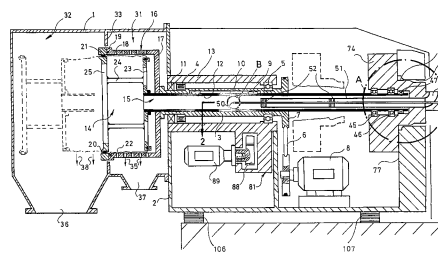
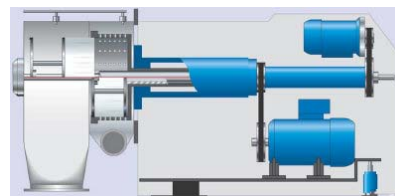


Figure 3a: A horizontal inverting bag centrifuge in 'invert closed' mode.



Figure 3b: Horizontal inverting bag centrifuge in 'invert open' mode.

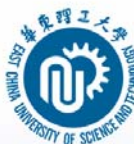




## 脱水过程中离心机的选型

### ◆ 离心机的选型

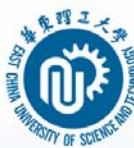
序号	物料性质及要求	选用的离心机型号
1	固相浓度较高，固相颗粒是刚体或晶体，且粒径较大	离心过滤机
2	颗粒允许被破碎	刮刀离心机
3	颗粒不允许被破碎	活塞推料或离心力卸料离心机
4	固相浓度较低，颗粒粒径很细，或是无定型的菌丝体	没有滤网的三足式沉降离心机或卧式螺旋沉降离心机
5	悬浮液中固液二相的密度差接近，颗粒粒径在0.05mm以上	过滤离心机



## 脱水过程中离心机的选型

### ◆ 离心机的选型

序号	物料性质及要求	选用的离心机型号
1	固相浓度较高，固相颗粒是刚体或晶体，且粒径较大	离心过滤机
2	颗粒允许被破碎	刮刀离心机
3	颗粒不允许被破碎	活塞推料或离心力卸料离心机
4	固相浓度较低，颗粒粒径很细，或是无定型的菌丝体	没有滤网的三足式沉降离心机或卧式螺旋沉降离心机
5	悬浮液中固液二相的密度差接近，颗粒粒径在0.05mm以上	过滤离心机



## 澄清过程中离心机的选型

**澄清**是指大量的液相中含有少量的固相，希望把少量的固相从液相中除去，使液相得到澄清。

### ◆ 物性参数

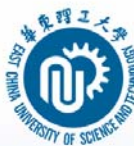
澄清前液相中的固相含量、固相颗粒的大小、形状和性质，以及液相的温度、pH值，粘度和液-固二相的密度差等

### ◆ 澄清后的液相要求

液相的含固量和固相的含湿量

### ◆ 离心机的选型

序号	物料性质及要求	选用的离心机型号
1	大量液相、少量固相且固相粒径很小或是无定型的菌丝体	卧螺，碟式或管式离心机
2	固相含量<1%，粒径<5 $\mu$ m	管式或碟式人工排渣分离机
3	固相含量 $\leq$ 3%，粒径<5 $\mu$ m	碟式活塞排渣分离机



## 浓缩过程中离心机的选型

**浓缩过程**是使悬浮液中的少量固相得到富集，如原来悬浮液中的固相含量为0.5%，通过浓缩使其增加到6%-8%，这个过程就是浓缩过程。

### ◆ 物性参数

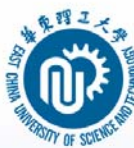
浓缩前悬浮液中的固相含量、液—固密度差、粘度、固相性质和颗粒粒径及分布范围、悬浮液pH值

### ◆ 浓缩要求

浓缩后的固相浓度及液相澄清度要求（即液相中允许的含固量）

### ◆ 离心机的选型

序号	物料性质及要求	选用的离心机型号
1	固—液密度差较小的物料	碟式外喷嘴排渣分离机或卧式螺旋卸料沉降离心机
2	排出固相含水率要求较低	卧式螺旋卸料离心机



## 分级过程中离心机的选型

**分级过程**是把固相颗粒配成一定浓度的溶液（并加适量的分散剂），在一定的分离因数下，使大于粒径 $d_{kp}$ 的颗粒沉降，小于 $d_{kp}$ 真的颗粒不沉降，从而得到大于 $d_{kp}$ 和小于 $d_{kp}$ 的二组颗粒。

### ◆ 物性参数

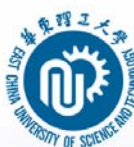
分级前悬浮液中的固相含量、固相颗粒的粒径及分布，固液二相密度差、粘度，pH值等

### ◆ 分级要求

要求分级颗粒的分割粒径 $d_{kp}$ ，以及分级效率（即 $\leq d_{kp}$ 颗粒的得率）

### ◆ 离心机的选型

序号	物料性质及要求	选用的离心机型号
1	常规处理量	卧式螺旋卸料离心机
2	处理量很小的颗粒分级	三足式沉降离心机



## 液-液、液-液-固分离过程中离心机的选型

**液-液，液-液-固分离**是指二种或三种不相溶相的分离，分离的原理是**利用密度差**，常见的有食物油的油-水分离，燃料油和润滑油的油-水-固分离净化等

### ◆ 物性参数

液-液或液-液-固的各相组分含量、密度差、粘度、pH值以及乳化状态

### ◆ 分离要求

液-液分离时，应确保一相纯度，而另一相纯度可稍低一些。液-液-固分离时，要求与上述相同，但需按固体含量多少考虑选用人工排渣还是自动排渣的机型

### ◆ 离心机的选型

序号	物料性质及要求	选用的离心机型号
1	小处理量	管式分离机
2	大处理量	碟式人工排渣或活塞排渣分离机