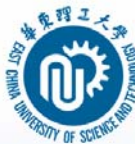




第三章 场分离技术

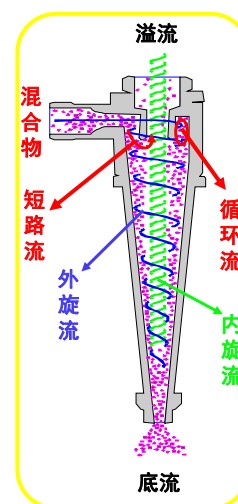
旋流分离技术



旋流分离原理及流动场

旋流器工作原理

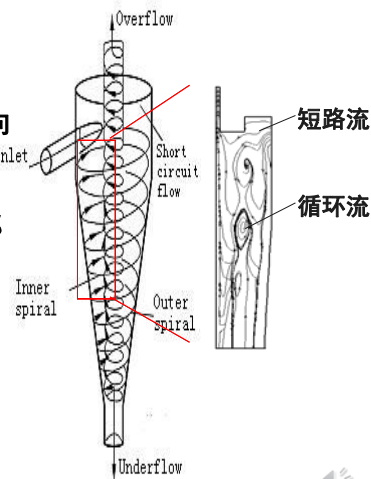
- 非均相混合物，在压力差推动下，在旋流器的进口处，由直线运动转变为旋转运动，密度较轻的组分向轴心移动并从溢流口排出，密度较重组分向边壁移动，并从底流口排出，实现轻相与重相之间的分离。
- 液-液、液-固、液-气-固、液-液-固等非均相体系的密度差分离。
- 两相密度差大于 0.05g/cm^3 ，分散相颗粒当量直径大于 $2\mu\text{m}$ ，粘度一般在 1cp 左右。





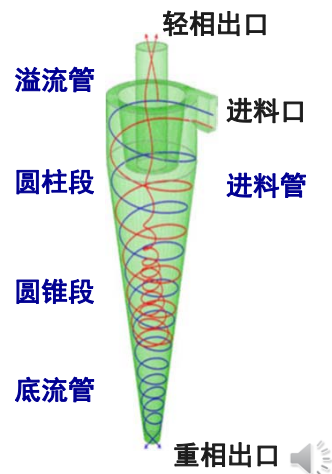
旋流分离原理及流动场

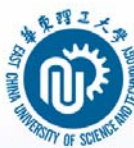
- 外旋流、内旋流、短路流、循环流、空气柱
- 外旋流与内旋流，旋转方向相同，流动方向基本相反；外旋流做分离、内旋流做分流。
- 短路流的流量占进口流量 10%~20%，这部分原料没有分离直接从溢流口排出。



旋流分离器原理及流场

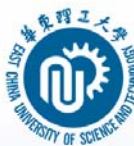
- 旋流分离器包括进料管、溢流管、底流管、圆柱段、锥段五个部分
- 一般有1个进口、2个出口
 - 180° 对称双入口
 - 2个或多个底流口
 - 2个或多个溢流口
- 固-液分离类，石蜡/油-催化剂(催化)、结晶液
- 液-液分离类，油脱水、水脱油、LPG脱胺
- 液-液-固分离类，油田采出液处理
- 固-液分离类，1个圆柱、1个圆锥
- 液-液分离类，2个圆柱、2个圆锥
- 液-液-固分离类，结构更复杂



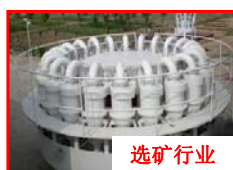


旋流器分类

分类方法	种类	说明
按分散相类型	固-液旋流器 液-液旋流器	连续相液体，分散相固体 两相均为液体
按混合物组分密度	轻质分散相旋流器 重质分散相旋流器	分散相的密度低 分散相的密度高
按旋流器结构	单锥旋流器 双锥旋流器 圆柱形旋流器	用于固-液分离和液-液分离 主要用于液-液分离 用于重介质分选
按分散相浓度	普通旋流器 分离浓稠介质用旋流器	分散相浓度 $\leq 10\%$ 分散相浓度约为 $20\% \sim 50\%$
按有无运动部件	静态 动态	旋流器器壁高速旋转
按用途分类	澄清、增稠 固体颗粒分级、分选 颗粒冲洗 油水分离 液体脱气	



旋流器应用



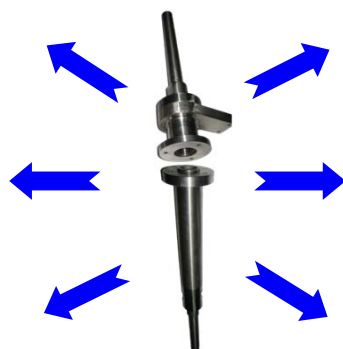
选矿行业



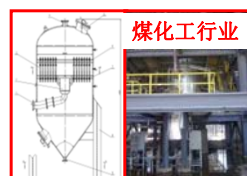
食品加工行业



污水处理行业



◆ 旋流器广泛应用于分离、澄清、浓缩、逆流洗涤、颗粒分级、强化传质、分选等方面。



煤化工行业



石油工业



造纸行业

A、澄清

水力旋流器用以完成澄清操作的应用很多，其中包括：

石油和化学工业中催化剂的回收；
机械密封系统中的液体除砂；
蔗糖汁除砂；
轧钢厂中轧辊喷水和冷却水中鳞屑的去除；
核能工业的循环系统中腐蚀产物的分离；
机械制造业中金属加工冷却液、润滑油及循环冲洗水中金属屑的去除；
井水中泥砂的去除；
气体洗涤器循环水的净化；
汽车清洗系统用水的净化；
低浓度污水(含固量1%—2%)的预处理；
换热器、锅炉及密封装置等系统的水中砂粒、鳞屑及其他无机的和有机的颗粒的去除；
盐液中盐的回收；
洗煤厂及选矿厂中冲洗水的净化；
石灰乳的除砂；
淀粉生产中去除砂粒及清洗淀粉乳；
植物籽油的澄清；
深度钻孔及钻探时钻机用冷却浆的钻屑的去除；
纤维洗涤污水的预处理；
石油采出液中的油脱水、海上采油平台上油水分离过程中向海中排放水的脱油；
其他含水悬浮液或非水悬浮液中细颗粒的去除。



B、浓缩

水力旋流器用作浓缩设备时的典型用途是对真空过滤机、筛分设备、脱水离心机以及浓缩设备的进料进行预浓缩。下面列举的是水力旋流器用于浓缩作业的一些常见的应用：

用旋流器代替成本昂贵的重力沉降槽对烟道气脱硫系统的废水进行浓缩；
矿山矿坑回填料的脱水；
重介质分选中再生介质的增稠；
氢氧化铁絮团的脱水；
氢氧化铝晶体、氯化铵晶体、碳酸氢钠的浓缩；
冶金渣的脱水；
河床和港口淤泥的浓缩；
石油采出液中油水的预分离以及油脱水。



C、颗粒分级

用于分级作业的水力旋流器的应用十分广泛，其中包括：

磨矿分级回路中矿物颗粒的分级；

矿物颗粒在浮选之前脱泥(以使浮选过程更充分并且所需浮选药剂剂量减少)；

颗粒浸析前脱泥(以提高提取系数)颗粒过滤前脱泥(以降低滤饼比阻和提高过滤速度)；

地下水进泵前除砂；

水泥粗料进窑烧之前的分级(这种物料通常具有宾汉塑性流体特性)；

白垩中杂质和未磨颗粒的去除；

磷矿石的脱泥；

将铁矿石分级为粗粒级产品(烧结给料和细粒级产品(球团给料)；

砂粒按大小分级；

助滤剂的回收；

高岭土行业中的分级；

表征和处理被污染物料过程中的分级；

钛白粉的分级；

钴泥的脱砂；

为了控制密度而从钴泥中的重晶石中分离出黏土。



D、颗粒分选

(1)按密度分选

在工业中对矿物颗粒按密度进行分选的旋流器可分为两类，一类是重介质水力旋流器，另一类是水介质旋流器。

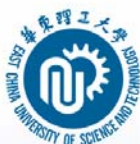
(2)按形状分选

用水力旋流器对固相物按形状进行分选的作业，在造纸行业纸浆的净化中用得最多。水力旋流器可以将天然的和无机杂质如砂、二氧化钛、黏土、亚麻皮、树皮和灰垢等从纤维中分离出来，因为旋流器内液流中的剪切力能使纤维团中夹带的颗粒被释放出来。

短锥型旋流器具有对固相颗粒按形态进行分选的能力。可用于马铃薯和谷物淀粉工业中对球形淀粉颗粒和片状杂质进行分离等。

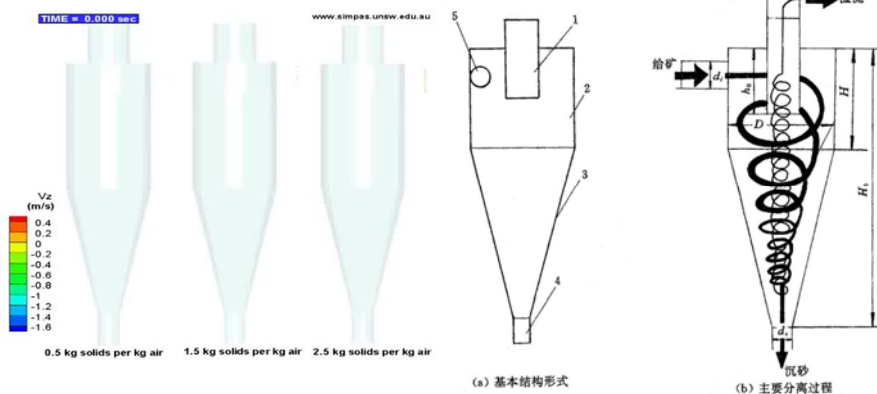
还可用于：液—液分离、气—液分离、三相同时分离





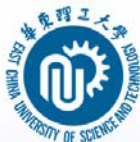
3.2 旋流分离

旋流分离器结构参数



旋流分离器的基本结构形式和主要分离过程

1-溢流(旋涡溢流)管; 2-筒体; 3-锥体; 4-沉砂管; 5-给矿管

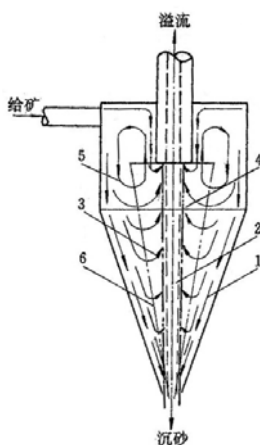


3.2 旋流分离

旋流分离器流场

➤ 流体运动基本形式:

- 1-**外旋流**; 携带重相
- 2-空气柱, 负压区; $d_a = 0.5d_o + 0.83 \frac{d_o^2}{D}$
- 3-**内旋流**; 携带轻相
- 4-最大切线速度轨迹面; $r_m = \frac{2}{3}r_o$
- 5-循环流;
- 6-零轴速包络面, 循环流的中心线
- 7-短路流, 占进料的10%~20%



$$r_m = \frac{2}{3}r_o \text{ 或 } d_m = \frac{2}{3}d_o \text{ 最大切向速度面为溢流管径的 } \frac{2}{3}$$

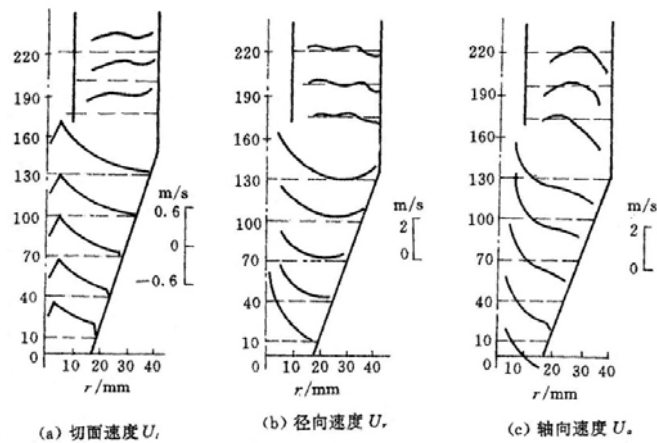
零轴速包络面是锥形表面, 锥底直径 $2.3d_o$,
锥高为溢流管入口至底流口的距离



3.2 旋流分离原理

旋流分离器流场

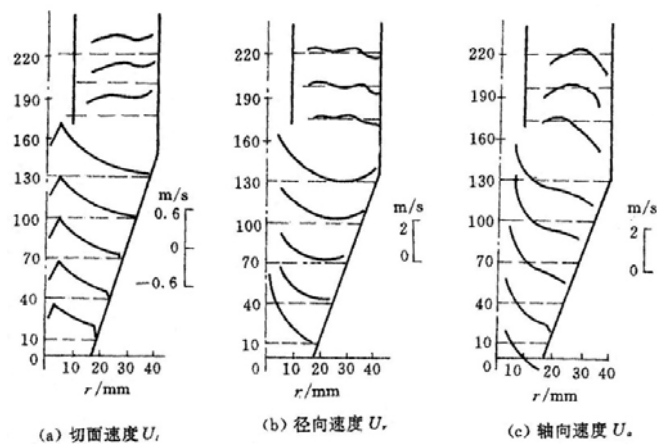
➤ 旋流器中流体运动为三维旋转湍流流动，流型非常复杂，100年来也没有完全研究清楚。

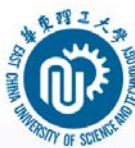


3.2 旋流分离原理

旋流分离器流场

➤ 旋流器中流体运动为三维旋转湍流流动，流型非常复杂，100年来也没有完全研究清楚。



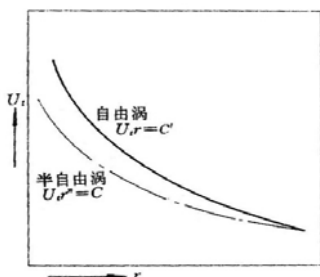


3.2 旋流分离

旋流分离器流场

➤ 旋流器中因为器壁摩擦阻力和射流阻力，切向速度要低于进料管中的平均速度 V_i ，正常分离时， $r < \frac{2}{3}r_o$ 属强制涡， $r > \frac{2}{3}r_o$ 属准自由涡， $r = \frac{2}{3}r_o$ 属于强制涡与准自由涡过渡态，此刻具有最大的切向速度。

$$u_t = \varphi u_i \left(\frac{R}{r} \right)^n$$



自由涡 $n=1$ 和半自由涡运动的速度分布 $0 < n < 1$

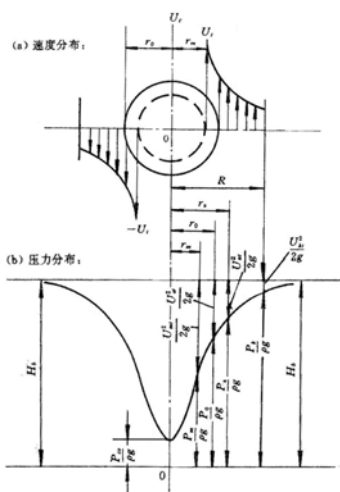
表 2-1 不同学者提出的 n 、 φ 值

学 者	n	φ	备 注
凯尔萨尔	0.75~0.84	0.69~0.81	光学法
布拉德里 (D. Bradley)	0.53~0.84	0.46~0.76	测压法
达尔扬* (G. Tarjan)	0.67	0.69	旋转测速法
特拉斯斯基 (H. Trawinski)	0.50~0.90		平均值 $n \rightarrow 0.64$
里尔奇	0.50~0.70		
姚晓卡	0.80~0.82	0.55~1.06	旋转测速法
徐继润等 ⁽¹³⁾	0.70~0.90		
顾方岳等 ⁽⁶⁾	0.843		普通旋流器
作者 ⁽¹⁰⁾	0.630		高旋器
	0.690		重介质旋流器
	0.640		



3.2 旋流分离

旋流分离器流场的压力分布



P_k 、 P_z 、 P_o 、 P_m 、 P_{co} —分别为旋流器器壁 ($r=R$)、零速包络面 ($r=r_z$)、溢流管等径处 ($r=r_o$)、最大切线速度轨迹面 ($r=r_m$) 和轴心 ($r=0$) 的压力；

U_{kt} 、 U_z 、 U_{ot} 、 U_{mt} —分别表示旋流器器壁 ($r=R$)、零速包络面 ($r=r_z$)、溢流管等径处 ($r=r_o$) 和最大切线速度轨迹面 ($r=r_m$) 的切线速度；

R 、 r_z 、 r_o 、 r_m —分别表示旋流器半径、零速包络面半径、溢流管半径和最大切线速度轨迹面半径





3.2 旋流分离

旋流分离器流场-粒度分布

- 旋流器中离心加速度是重力加速度的几十到几百倍，离心力与曳力平衡，推导出颗粒沿径向的离心沉降速度 u_{or} 与切向速度的关系：

$$u_{or} = 0.724 \sqrt{\frac{d_p \Delta \rho u_t^2}{\phi \rho_L}}$$

$$u_{or} = \sqrt{\frac{\omega^2 r}{g}} u_g$$

$$d_p = 1.91 \frac{\phi \rho_L}{\Delta \rho} \left(\frac{u_{or}}{u_t} \right)^2 r$$

上式中， ϕ 阻力系数； u_g 为重力沉降速度

$$u_t = 1.741 \sqrt{\frac{d_p (\rho_s - \rho_L) g}{\rho_L}} = 1.741 d_p^{1/2} (\rho_s - \rho_L)^{1/2} \rho_L^{-1/2} g^{1/2}$$



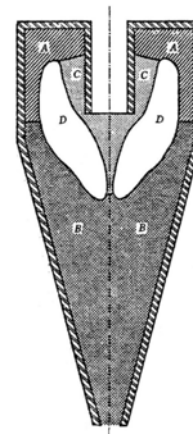
理想条件下旋流器中的粒度分布



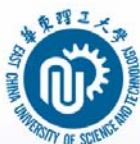
3.2 旋流分离

旋流分离器流场

- A区，未经分离的进料区，粒度基本与进料一致
- B区，粗粒级为主，类似于底流粒度组成
- C区，细粒级为主，类似于溢流粒度组成
- D区，中间粒级为主，随径向距离减小而减小，粗细颗粒有效分离，是旋流分离的关键区域



150mm旋流器中
相似粒度分布

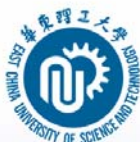
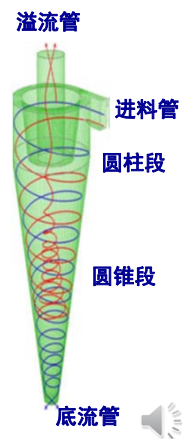


3.2 旋流分离

旋流分离器设计

基本结构参数

- 进口部分
 - 进口截面形状：圆、方、长方、椭圆、其它？
 - 进口流动通道形状：切线、渐开线、螺旋线
 - 进口管个数：1/2/4
 - 进口截面当量尺寸
- 圆柱段部分
 - 圆柱段的直径、长度
 - 溢流管的直径与插入深度
 - 溢流管与旋流器直管段内部间隙
- 锥段
 - 锥段的个数
 - 锥段的锥角
 - 底流口直径
- 尾管段及其长度



3.2 旋流分离

旋流器设计-主要参数

- 物性参数：
 - 分散相粒径及分布
 - 两相的密度和粘度
 - 两相的表面张力(液-液)

$$u_i = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_L) g}{18\mu}$$

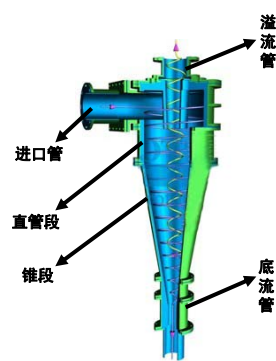
- 性能参数：
 - 分离效率
 - 压力降 ΔP
 - 分离精度 d_{50}

$$\Delta P = \frac{21.64 \rho^{1.3748} Q_i^{2.3748}}{\mu^{0.3748} D^{4.3744}}$$

$$d_{50}^2 = 0.1918 D^{0.842} \frac{\mu^{1.158}}{\Delta \rho} \sqrt{\frac{\rho^{0.842}}{\Delta P^{1.158}}}$$

- 操作参数：

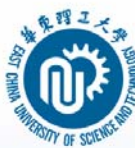
温度 t 、
 进料流量 Q_i 和分散相浓度 C_i 和压力 P_i ;
 分流比(溢流/底流)、压差



旋流器的结构

$$Q_i = 0.274 \mu^{0.1578} D^{1.842} \frac{\Delta P^{0.4211}}{\rho^{0.5789}}$$

$$D = 220.3 \frac{(\frac{\rho_s \Delta \rho}{18\mu})^{1.188}}{\mu^{0.1874}} \sqrt{\frac{\Delta P^{1.375}}{\rho}}$$



3.2 旋流分离

旋流器设计-分离效率 ε

分离效率 ε ：被旋流器分离出来的分散相量占进料中分散相总量的比率

➤ **液-固分离**，习惯上用**被分离物料的质量**来表示分离效率：

$$\varepsilon = \frac{m_u}{m_i} \quad (3-4)$$

式中， m_u —底流口的分散相(固体颗粒)的质量流率，kg/s

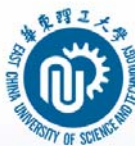
m_i —进口的分散相(固体颗粒)的质量流率，kg/s

也可以写成：

$$\varepsilon = \frac{c_u G_u}{c_i G_i} \quad (3-5)$$

式中， c_u 、 c_i —底流口、进口处分散相的质量浓度；

G_u 、 G_i —底流口、进口处的总质量流率



3.2 旋流分离

旋流器设计-分离效率 ε

➤ 根据物料衡算得：

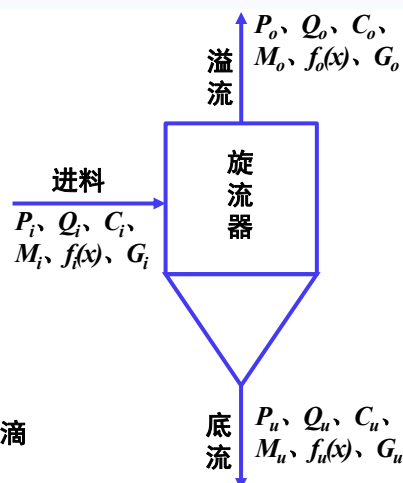
$$G_i = G_u + G_o \quad (3-6)$$

$$c_i G_i = c_u G_u + c_o G_o \quad (3-7)$$

即可得：

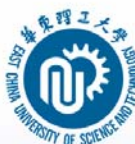
$$\varepsilon = \frac{c_u G_u}{c_i G_i} = \frac{c_u (G_i - G_o)}{c_i G_i} \quad (3-8)$$

➤ 对液-液分离，常用被分离(分散相)液滴的体积流量来表示分离效率



旋流器的质量平衡





3.2 旋流分离

旋流器设计-分离效率 ε

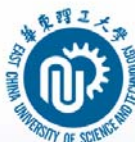
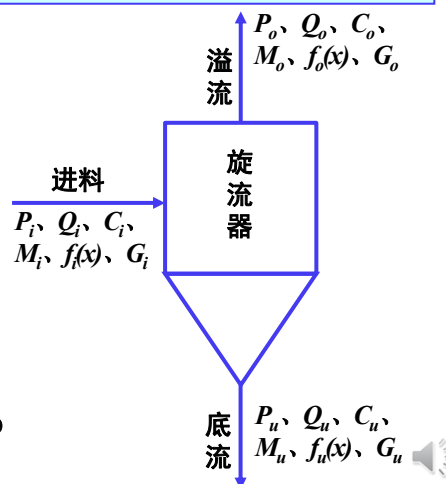
➤ 分流比 S : 旋流器的溢流流量 G_o /底流流量 G_u

$$s = \frac{G_o}{G_u} \quad (3-9)$$

$$1 + s = \frac{G_o + G_u}{G_u} = \frac{G_i}{G_u}$$

$$\frac{1}{1 + s} = \frac{G_u}{G_i}$$

$$\varepsilon = \frac{c_u}{c_i} \frac{1}{1 + s} \quad (3-8)$$



3.2 旋流分离

旋流分离器的压力降

压降: 指进口处压力与两个出口处静压力之差

$$\Delta p = (p_i - p_o) \propto \left(\frac{Q_i}{Q_*} \right)^2, Q_* \text{ 是旋流器的额定流量}$$

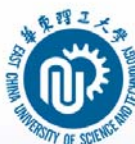
➤ 对液-固旋流器, 由于底流流量与溢流流量相比小得多, 加之底流的动能无法回收, 所以:

$$\Delta P = p_i - p_o \quad (3-12)$$

➤ 对液-液旋流器, 底流与溢流流量都不可忽略, 所以通常包括两个压降:

$$\Delta P_{iu} = p_i - p_u \quad (3-13)$$

$$\Delta P_{io} = p_i - p_o \quad (3-14)$$

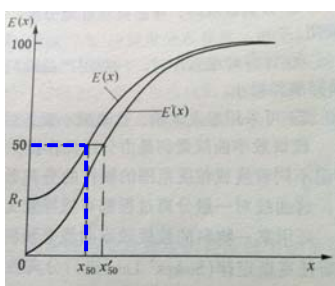


3.2 旋流分离

旋流器设计-分割尺寸 d_{50} (x_{50})

分割尺寸：旋流分离效率为50%时对应的颗粒尺寸，记为 d_{50}

d_{50} 也称为等概率粒度，表示这种粒度的颗粒从底流口与溢流口排出旋流器的几率各占50%，分基本分离粒度 d_{50cb} 和应用分离粒度 d_{50cp}



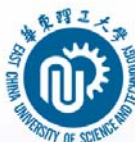
级效率曲线

$$d_{50cp} = C_1 C_2 C_3 d_{50cb}$$

$$C_1 = \left(\frac{53 - \varphi_f}{53} \right)^{-1.43} \quad C_2 = 3.27 (\Delta P)^{-0.28} \quad C_3 = \left(\frac{1.65}{\rho_s - \rho_w} \right)^{0.5}$$

$$d_{50cb} = 2.84 D_c^{0.66}$$

$$Q = 0.15645 \sqrt{\Delta p} D_c^2$$

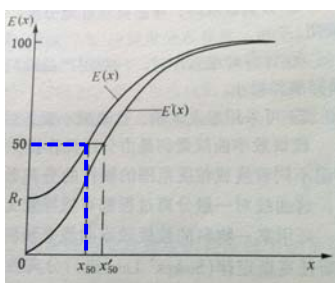


3.2 旋流分离

旋流器设计-分割尺寸 d_{50} (x_{50})

分割尺寸：旋流分离效率为50%时对应的颗粒尺寸，记为 d_{50}

d_{50} 也称为等概率粒度，表示这种粒度的颗粒从底流口与溢流口排出旋流器的几率各占50%，分基本分离粒度 d_{50cb} 和应用分离粒度 d_{50cp}



级效率曲线

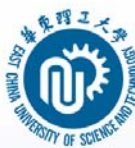
$$d_{50cp} = C_1 C_2 C_3 d_{50cb}$$

$$C_1 = \left(\frac{53 - \varphi_f}{53} \right)^{-1.43} \quad C_2 = 3.27 (\Delta P)^{-0.28} \quad C_3 = \left(\frac{1.65}{\rho_s - \rho_w} \right)^{0.5}$$

$$d_{50cb} = 2.84 D_c^{0.66}$$

$$Q = 0.15645 \sqrt{\Delta p} D_c^2$$





3.2 旋流分离

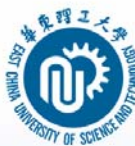
旋流器设计-数学模型

数学模型

- 林奇(Lynch)液-固水力旋流器数学模型
- 普利特(L. R. Pritt)液-固水力旋流器数学模型
- 克雷布斯(Krebs)液-固水力旋流器数学模型
- Thew液-液水力旋流器数学模型

分离理论

- 平衡轨道理论
- 停留时间理论
- 两相流湍流理论
- 颗粒拥挤理论



3.2 旋流分离

旋流器设计-平衡轨道理论

一定粒度的颗粒在某一轨道上是在离心力和曳力间处于平衡状态，因此，不同粒径的颗粒具有不同的平衡轨道或半径位置。**零轴速包络面**以外的颗粒全部被分离，而零轴速包络面以内的颗粒则从溢流口逃逸。对应的分割粒径 x_{50} 就是其轨迹处于零轴速包络面上的颗粒尺寸。

Bradley方程

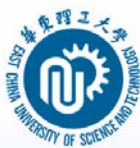
$$d_{50} = \frac{3 \times 0.38^n}{\alpha} \left(\frac{d_i}{D} \right)^2 \sqrt{\frac{D^3 \mu (1-s) \tan \frac{\theta}{2}}{Q_i \Delta \rho}} \quad (3-15)$$

式中， θ 为旋流器的锥角； n 和 α 决定于旋流器结构和流体性质； s 为底流流量/溢流流量； μ 为粘度； D 和 d_o 及 d_i 为圆柱段、溢流和进口的公称直径；对于Bradley结构的旋流器($\theta=9^\circ$, $d_i/D=1/7$, $d_o/D=1/5$), $\alpha=0.45$, $n=0.8$

- 若底流流量忽略，则上式可简化为：

$$\frac{x_{50}}{D} = 1.76 \times 10^{-3} \sqrt{\frac{\mu D}{Q_i \Delta \rho}} \quad (3-16)$$





3.2 旋流分离

旋流器设计-停留时间理论

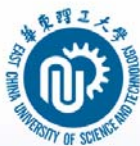
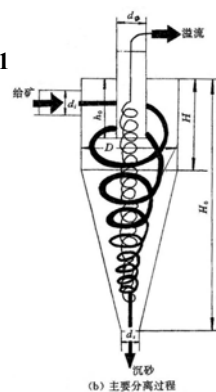
➤ 考虑颗粒从进料口到器壁所需时间，Rietema认为 x_{50} 这样尺寸的颗粒，从进料口中央进入旋流器，在旋流器允许停留时间内，正好完成沉降到旋流器壁

$$\text{Rietema} \quad x_{50} = \sqrt{\frac{H_{y50} \mu_L \rho_L Q_i}{H_o (\rho_s - \rho_L) \Delta P}} \quad (3-1)$$

式中，

H_o 为旋流器长度，

H_{y50} ：基于 x_{50} 的旋流器数，取决于旋流器的结构参数，与旋流器的操作参数没有关系。



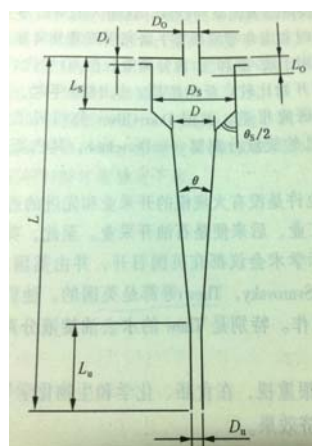
3.2 旋流分离

旋流器设计-停留时间理论

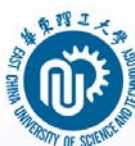
Rietema 在试验条： $\theta=20^\circ$ ， $L/D=2.8\sim 5.1$ ，无背压，用低浓度石英砂/水的悬浮液做试剂，通过结构因素试验得到了旋流器的最佳结构： $L/D=5$ ， $L_o/D=0.4$ ， $D_i/D=0.28$ ， $D_o/D=0.34$ ；且对应于这个最佳结构， H_{y50} 达到最小值3.5

在雷诺数满足下式条件

$$\text{Re} = \frac{Du\rho}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\mu\pi D} > 1400 \quad (3-19)$$



典型旋流器结构图



3.2 旋流分离

旋流器设计-停留时间理论

Rietema 的最佳结构下旋流器流量为：

$$Q = 0.274 \mu^{0.1578} D^{1.842} \frac{\Delta P^{0.4211}}{\rho^{0.5789}} \quad (3-20)$$

或

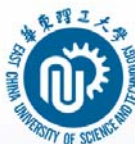
$$\Delta P = \frac{21.64 \rho^{1.3748} Q_i^{2.3748}}{\mu^{0.3748} D^{4.3744}} \quad (3-21)$$

代入式 (3-18) 得：

$$x_{50}^2 = 0.1918 D^{0.842} \frac{\mu^{1.158}}{\Delta \rho} \sqrt{\frac{\rho^{0.842}}{\Delta P^{1.158}}} \quad (3-22)$$

或

$$D = 220.3 \frac{\left(\frac{x_{50}^2 \Delta \rho}{18 \mu}\right)^{1.188}}{\mu^{0.1874}} \sqrt{\frac{\Delta P^{1.375}}{\rho}} \quad (3-23)$$



3.2 旋流分离

旋流器设计-Thew模型

➤ Thew在实验数据基础上的关联式是迄今为止轻质分散相液-液水力旋流器分离性能中最详细、最方便引用的经典模型，其适用范围为切向双进口的Thew型旋流器、分流比在5%~10%之间，计算公式为：

$$H_{y75} = 0.011 R_c^{-0.15}$$

➤ H_{y75} 为按 d_{75} 计算的旋流器数，即：

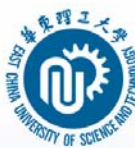
$$H_{y75} = \frac{Q_i \Delta \rho d_{75}^2}{D^3 \mu}$$

H_{y75} 是单个旋流器结构放大设计的重要参数

➤ 赵庆国也定义了液-液旋流器的旋流器数 H_{y50} ，即：

$$H_{y50} = \frac{Q_i \Delta \rho d_{50}^2}{36 \pi \mu R_0^3}$$





3.2 旋流分离

旋流器设计- Rietema型

旋流器的设计模型有多个。**Rietema 的模型**相对具有比较完善的理论和经验数据，以 Rietema 最佳结构为例介绍旋流器的常规设计。

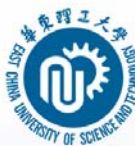
一般设计问题：已知**物性参数**、要求的**分割粒径 x_{50}** 和**处理量**及能提供的**压降范围**，来确定旋流器的**结构参数**(旋流器直径 D)和操作参数（**压降 ΔP** 、**流量**、**个数**）等。

➤ 具体步骤如下：

1、在常用压力(或经济压差)范围内初步选取某一压力降值；

2、计算并圆整得到旋流器直径 D ；

$$D = 220.3 \frac{\left(\frac{x_{50}^2 \Delta \rho}{18 \mu}\right)^{1.188}}{\mu^{0.1874}} \sqrt{\frac{\Delta P^{1.375}}{\rho}} \quad (R_e > 1400)$$



旋流器设计- Rietema型



3、计算单个旋流器处理量(3-20) Q'_i ；

$$Q'_i = 0.274 \mu^{0.1578} D^{1.842} \frac{\Delta P^{0.4211}}{\rho^{0.5789}}$$

4、计算满足总处理量 Q 所需的旋流器个数 N (向下圆整)；

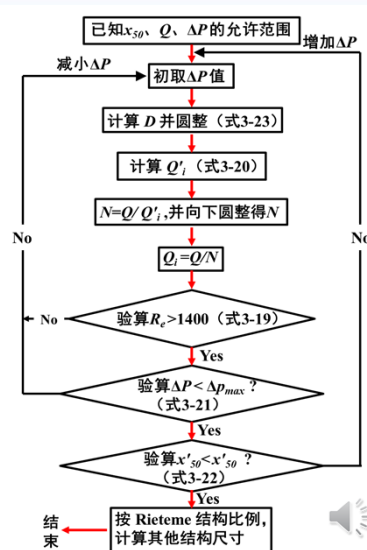
$$N = Q / Q'_i$$

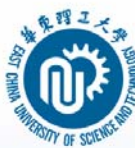
5、再确定旋流器个数为 N 时，单个旋流器处理量 Q_i

$$Q_i = Q / N$$

6、验算旋流器雷诺数是否满足条件：

$$Re = \frac{Du\rho}{\mu} = \frac{4\rho Q}{\mu\pi D} > 1400$$





3.2 旋流分离

旋流器设计- Rietema型

若满足这个条件，则继续以下步骤，否则回到第1步，减小 ΔP 后，重复上述步骤。

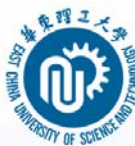
7、验算压力降值是否满足给定的压力降值范围：
$$\Delta P = \frac{21.64 \rho^{1.3748} Q_i^{2.3748}}{\mu^{0.3748} D^{4.3744}}$$

若满足，则继续以下步骤，否则回到第1步，减小 ΔP 后，重复上述步骤。

8、验算分割粒度
$$x_{50}^2 = 0.1918 D^{0.842} \frac{\mu^{1.158}}{\Delta \rho} \sqrt{\frac{\rho^{0.842}}{\Delta P^{1.158}}}$$

若满足，则执行下步，否则回到第(1)步，增大 ΔP 后，重复上述步骤。

9、按Rietema旋流器澄清结构比例 $L/D=5, L_o/D=0.4, d_i/D=0.28, d_o/D=0.34$ 确定其他结构尺寸



3.2 旋流分离

旋流器设计的简要方法

1、物性(沉降速度与粒度分布)及分离精度或浓度要求；
$$u_g = \frac{d_p^2 (\rho_s - \rho_L) g}{18 \mu}$$

粒度分布曲线、澄清液浓度或效率确定旋流器的分离精度 d_{95} 和 d_{50}

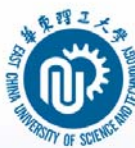
2、选择旋流器的类型，Krebs或Thew或Young，根据相应的 d_{50} 和压力降计算拟合式求旋流器的公称直径 D ，反复圆整 D 并校核 d_{50} ；

$$d_{50}^2 = 0.1918 D^{0.842} \frac{\mu^{1.158}}{(\rho_s - \rho_L)} \sqrt{\frac{\rho^{0.842}}{\Delta P^{1.158}}}$$

3、按各类旋流器推荐尺寸比例 $L/D=5, L_o/D=0.4, d_i/D=0.28, d_o/D=0.34$ 确定底流和溢流口、柱锥体的结构尺寸与相对位置

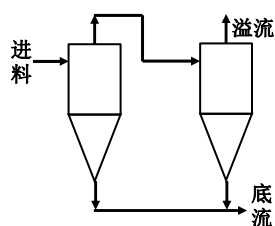
4、计算出单根旋流器的流量及压力降，选择旋流器的根数及并联方法，根据压力降选择泵等加压和输送设备。



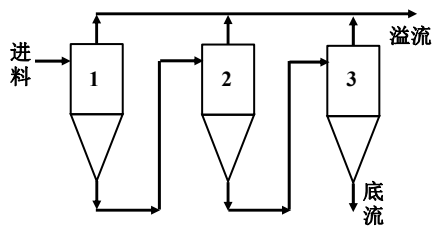


旋流器的串联

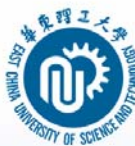
➤ 固-液旋流器，“级”是指溢流产品通过净化设备的次数，水力旋流器的多级分离是通过水利旋流器的溢流串联系统来实现的；“段”指底流物料通过净化设备的次数，水力旋流器的多段分离则需要旋流器底流串联系统来实现



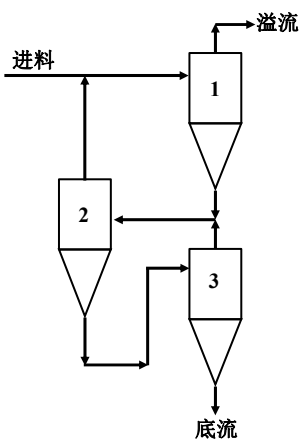
二级一段筛选
流程示意图



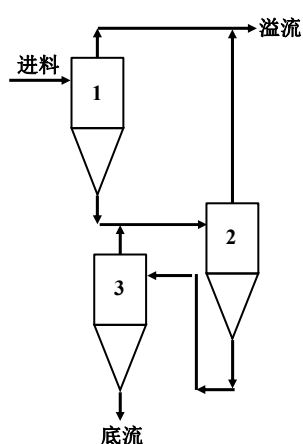
溢流合流的一级
三段流程示意图



旋流器的串联



溢流回流的一级三段流程示意图



一级三段混合分离流程示意图

