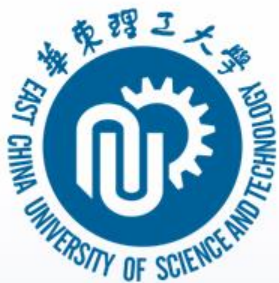




第三章 场分离技术

重力沉降分离



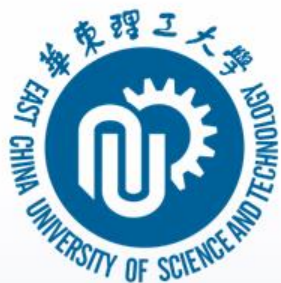


本节主要内容

- ◆ 自由沉降、干涉沉降的物理概念及其沉降速度计算
- ◆ 沉降速度的主要影响因素
- ◆ 间歇沉降曲线及非稳态沉降四个阶段特点
- ◆ 道尔重力沉降槽的设计及重力沉降设备

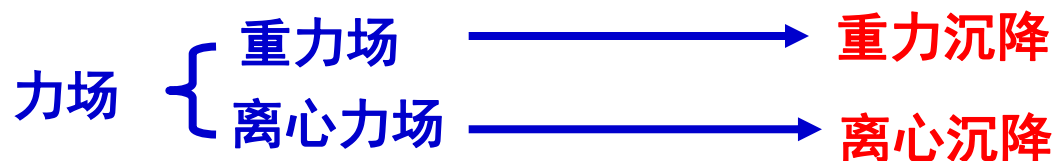
重点： 沉降槽的不同区域沉降速度的计算及沉降槽的设计

难点： 重力沉降槽的设计



3.1 重力沉降分离

◆ **沉降分离**——在某种**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**的操作过程



◆ 由地球引力作用而发生的颗粒沉降过程，称为重力沉降
风选、冲积平原/都江堰

序号	类型	目的	实例
一	澄清	回收溶液	湿法冶金中浸取后矿浆的沉降分离
二	浓密	回收固体	电解液中阳极泥的回收
三	分离	固体与溶液分离	湿法冶金中的固液分离沉降作业

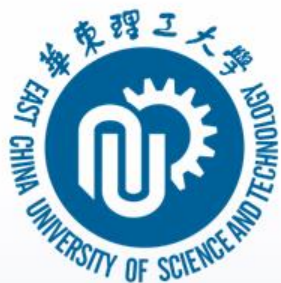


3.1 重力沉降分离

分散相（固体）和连续相（流体）之间的相对运动

- 固体颗粒静止，流体对其作绕流；
- 流体静止，颗粒作沉降运动；
- 两者都运动但保持一定的相对速度。

颗粒相会受到流体作相对运动时的阻力，曳力。



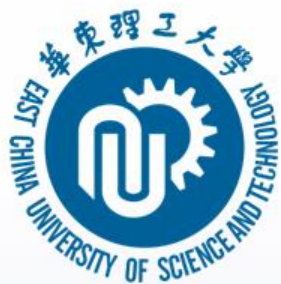
3.1.1自由沉降及其理论基础

自由沉降(含固 $<0.2\%$)速度计算

分析假定

- ◆ 颗粒为球形
- ◆ 自由沉降(沉降过程中颗粒的大小、形状、重量等不变，非球形忽略了固粒自转)。
- ◆ 颗粒只在重力作用下沉降，不受器壁($d_p/D < 100$)和其他颗粒影响(含固浓度 $<0.2\%$)。

◆ 静水中悬浮颗粒开始沉降时，因受重力作用产生加速运动，经过很短的时间后，颗粒所受的合力为零时，颗粒即成等速下沉。



球形颗粒的自由沉降过程分析-1

自由沉降速度计算

设颗粒的密度为 ρ_s ，直径为 d ，流体的密度为 ρ_L

◆ 重力 $F_g = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s g$

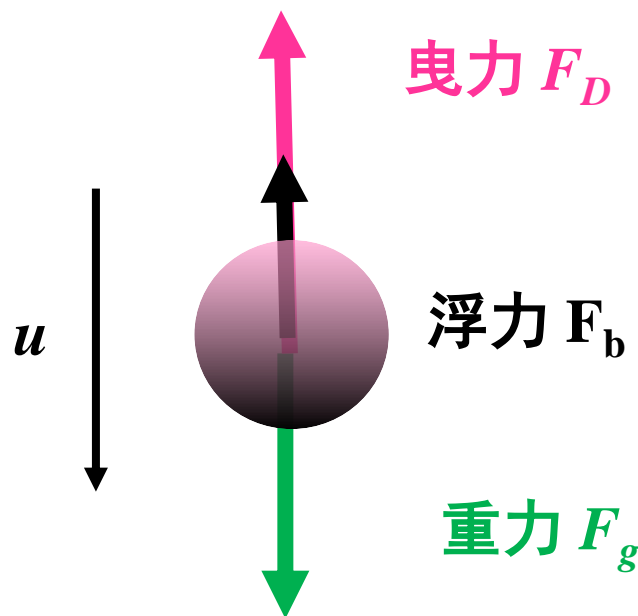
◆ 浮力 $F_b = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_L g$

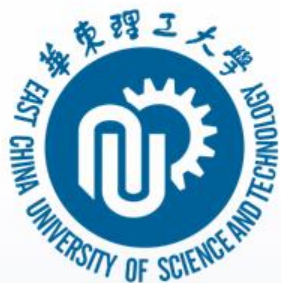
◆ 曳力 $F_D = C_D \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{u^2 \rho_L}{2}$

颗粒投影面积：A

E：流体的动能

C_D ：曳力系数





球形颗粒的自由沉降过程分析-2

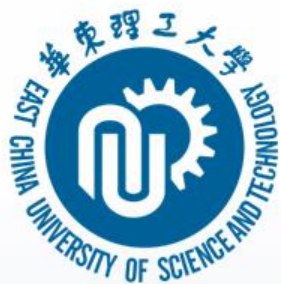
颗粒沉降过程中 $F_g - F_b - F_D = m a$

$$\text{即} \quad \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s g - \frac{\pi}{6} d^3 \rho_L g - C_D \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\rho_L u^2}{2} = \frac{\pi}{6} d^3 \rho_s a \quad (1)$$

颗粒开始沉降的瞬间，速度 $u=0$ ，因此曳力 $F_D=0$ ， a 最大数值 $a = \frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_s} g$

➤ 颗粒开始沉降后， $u \uparrow \rightarrow F_D \uparrow \rightarrow a \downarrow$ **加速阶段**

➤ $u \rightarrow u_t$ 时， $a = 0$ **匀速阶段**



球形颗粒的自由沉降过程分析-3

等速阶段中颗粒相对与流体的运动速度 u_t 称为沉降速度

当 $a = 0$ 时, $u = u_t$, 代入 (1) 式

则
$$\frac{\pi}{6}d^3\rho_s g - \frac{\pi}{6}d^3\rho_L g - C_D \frac{\pi}{4}d^2 \frac{\rho_L u_t^2}{2} = 0 \quad (2)$$

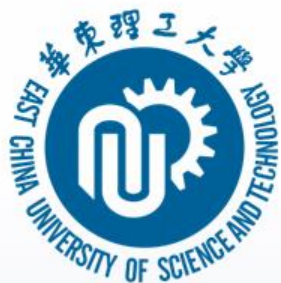
解得

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

——沉降速度表达式, C_D 与 Re 曲线实验方法

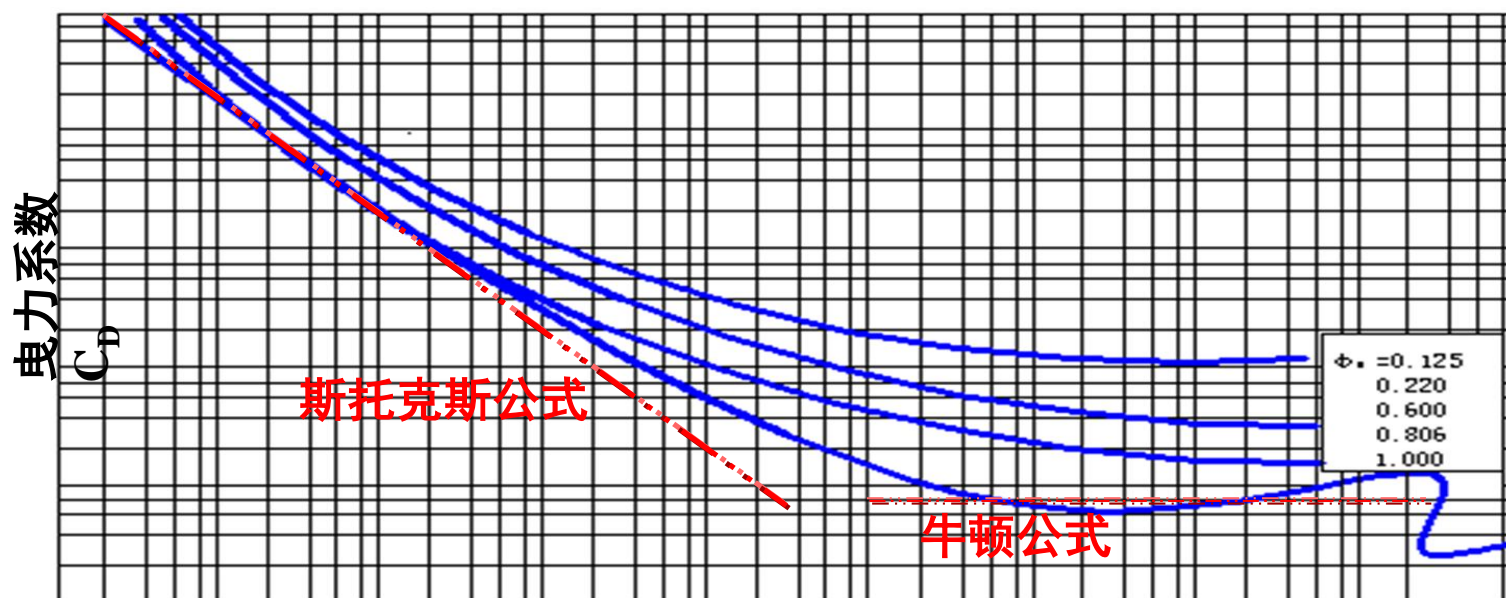
$$u_t^2 = \frac{4d_p g(\rho_s - \rho_L)}{3\rho_L C_D}$$

$$C_D = \frac{4d_p g(\rho_s - \rho_L)}{3u_t^2 \rho_L}$$



曳力系数 C_D

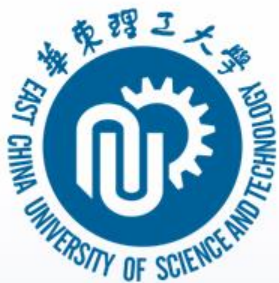
- 因次分析法获得， C_D 值是颗粒和流体相对运动时的雷诺数 R_e 的函数



$$C_D = \frac{4d_p g (\rho_s - \rho_L)}{3u_t^2 \rho_L}$$

雷诺数 R_e

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



球形颗粒的自由沉降速度-1

➤ 对于球形颗粒的自由沉降速度，按 Re_p 值大致分为三个区

1) 层流区或托克斯斯(stokes)定律区 ($10^{-4} < Re_p < 1$)

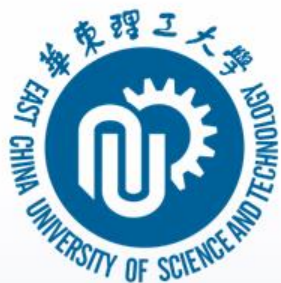
$$C_D = \frac{24}{Re_p}$$



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

——斯托克斯公式

层流区：由流体粘性引起的表面摩擦力占主要地位



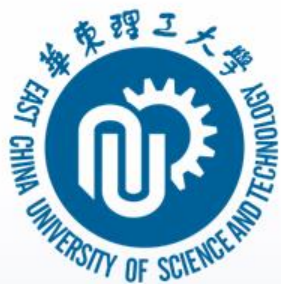
球形颗粒的自由沉降速度-1

➤ 对于球形颗粒的自由沉降速度，按 Re_p 值大致分为三个区

2) 过渡区或艾伦定律区 (Allen) ($1 < Re_p < 50000$)

$$C_D = \frac{18.5}{Re_p^{0.6}} \quad \longrightarrow \quad u_t = 0.271 \sqrt{\frac{d_p (\rho_s - \rho_L) g}{\rho_L}} Re_e^{0.6} \quad \text{——艾伦公式}$$

过渡区：表面摩擦阻力和形体阻力二者都不可忽略。随 Re 的增大，表面摩擦阻力的作用逐渐减弱，而形体阻力的作用逐渐增长



球形颗粒的自由沉降速度-2

➤ 对于球形颗粒的自由沉降速度，按 Re_p 值大致分为三个区

3) 湍流区或牛顿定律区 ($Re \geq 50000$)

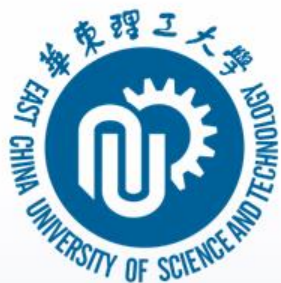
$$C_D = 0.44$$



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

——牛顿公式

湍流区：流体粘性对沉降速度已无影响，由流体在颗粒后半部出现的边界层分离所引起的形体阻力占主要地位。



影响沉降速度的因素-1

1) 流体的粘度

$\mu \downarrow \rightarrow R_e \uparrow \rightarrow u_t \uparrow$ (滞流和过渡区)

如：浓饮料中添加增稠剂，使 $\mu \uparrow \rightarrow u_t \downarrow$ ，不易分层

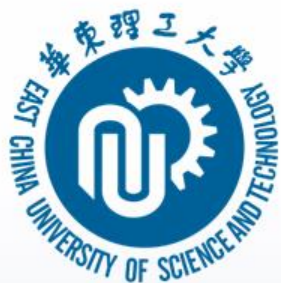
2) 颗粒直径

$d_p \uparrow \rightarrow u_t \uparrow$

自来水中加絮凝剂、啤酒生产采用絮状酵母， $d \uparrow \rightarrow u_t \uparrow$

3) 颗粒的体积浓度

当颗粒的体积浓度小于0.2%时，理论计算值的偏差在1%以内，但当颗粒浓度较高时，由于颗粒间相互作用明显，便发生干涉沉降，自由沉降的公式不再适用



影响沉降速度的因素-2

4) **器壁效应**:当颗粒在靠近器壁的位置沉降时, 由于器壁的影响, 沉降速度较自由沉降速度小, 这种影响称为壁效应。当器壁尺寸远远大于颗粒尺寸时(例如在100倍以上), 容器效应可忽略, 否则需加以考虑。

➤ 颗粒在有限静止液体中沉降, 如沉降槽或是量筒中沉降实验, 器壁就会对颗粒的沉降产生影响。需引入校正系数

令 $u_W = \eta_L u_t$

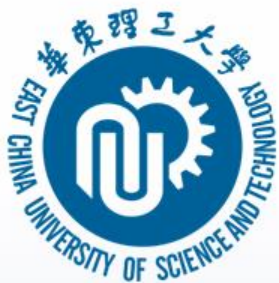
u_W ——考虑器壁影响的自由沉降速度

η_L ——影响系数

层流区 $\eta_L = \{[1 - d_p/D_T]/[1 + 0.475 d_p/D_T]\}$

过渡区 $\eta_L = 1/[1 + 2.35(d_p/D_T)]$

湍流区 $\eta_L = [1 - 2.35(d_p/D_T)^{1.5}]$



影响沉降速度的因素-2

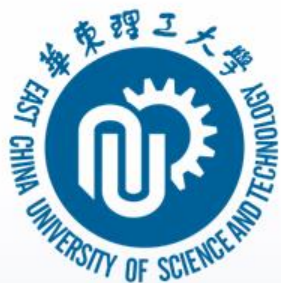
5) 颗粒形状的影响

球形度 $\phi_s = \frac{S}{S_p}$ $\frac{\text{(等体积球的表面积)}}{\text{(颗粒表面积)}}$

$$\phi_s \downarrow \rightarrow C_D \uparrow \rightarrow u_t \downarrow$$

同一种固体物质，球形或近球形颗粒比同体积非球形颗粒的沉降快一些

对非球形颗粒， R_e 中的直径用当量直径 d_e 代替 $d_e = \sqrt[3]{6V_p / \pi}$



干涉沉降

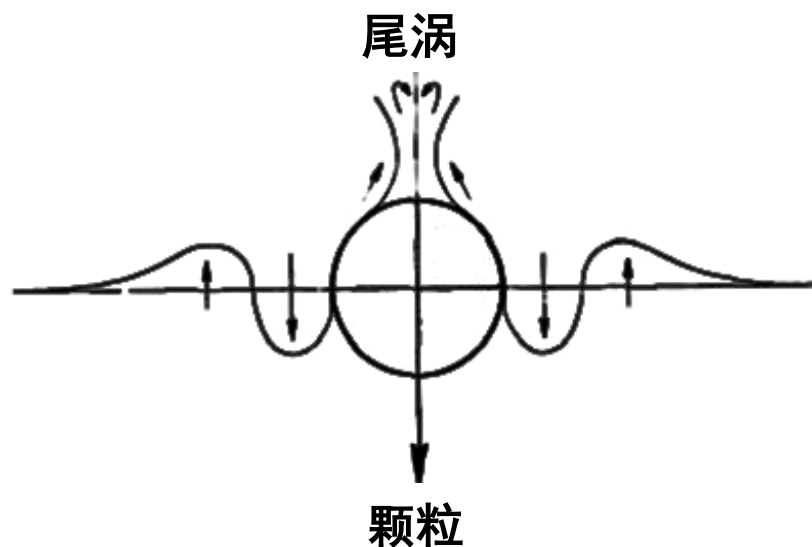
➤ 当悬浮液中的颗粒的浓度增大 ($>0.2\%$) 后, 这种由于颗粒间的干扰对颗粒运动的影响, **降低颗粒的沉降速度** (相对于器壁而言) 的沉降即称为**干涉沉降**。

干涉沉降速度 $u_{\varphi} = \eta u_t$

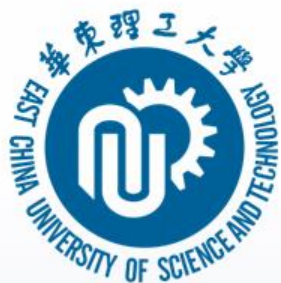
其中: $\eta = (1 - \varphi)^n$

$$n = f(d_p/D_T, R_e)$$

φ : 悬浮液中固体粒子的
体积浓度

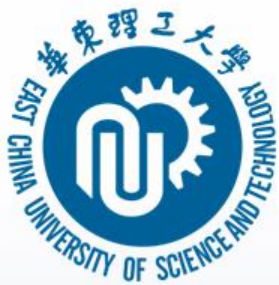


单颗粒沉降的流场



颗粒干涉沉降的经验关联式

研究者	方程式	浓度范围	流动域
孙启才	$\eta = (1 - \varphi)^{5.5}$	$\varphi < 0.5$	$Re < 2$
Lewis et al	$\eta = (1 - \varphi)^{4.65}$		$1.1 < Re \leq 26$
Richardson and Zaki	$\eta = (1 - \varphi)^n$ $n = 4.65 + 19.5d_p / D_r$ $n = (4.35 + 17.5d_p / D_r)Re^{0.03}$ $n = (4.45 + 18d_p / D_r)Re^{-0.1}$ $n = 4.45Re^{0.01}$ $n = 2.39$		$Re < 0.2$ $0.2 < Re < 1$ $1 < Re < 200$ $200 < Re < 500$ $500 < Re$
白 井	$\eta = (1 - \varphi)^{4.65}$ $\eta = (1 - \varphi)^3 / 6\varphi$	$\varphi \leq 0.5$ $0.25 \leq \varphi \leq 0.7$	$Re < 1$



3.1.2 重力沉降理论及相关模型

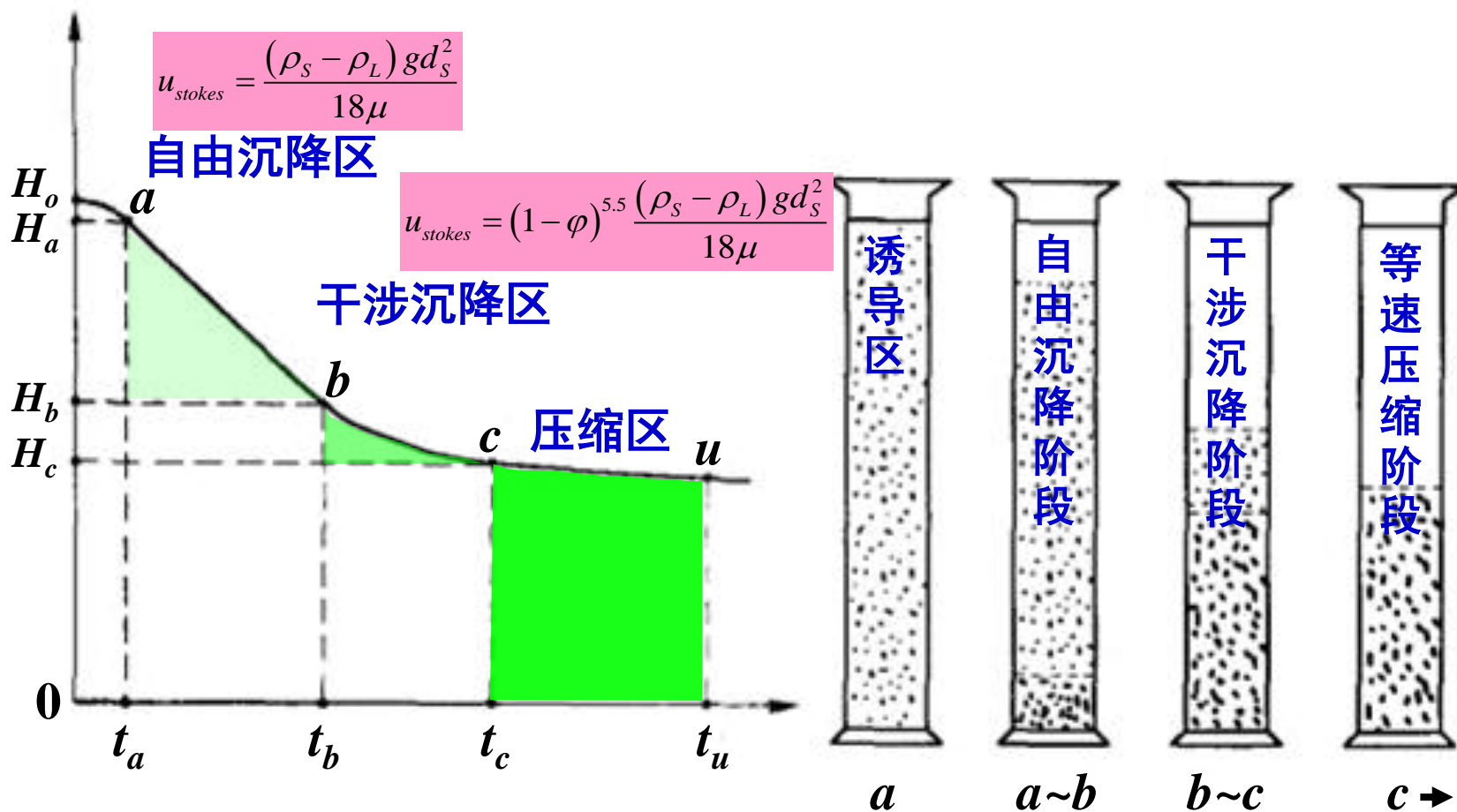
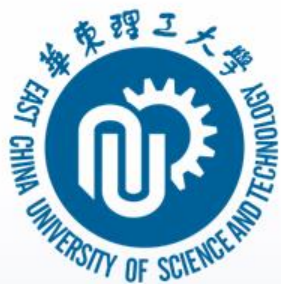
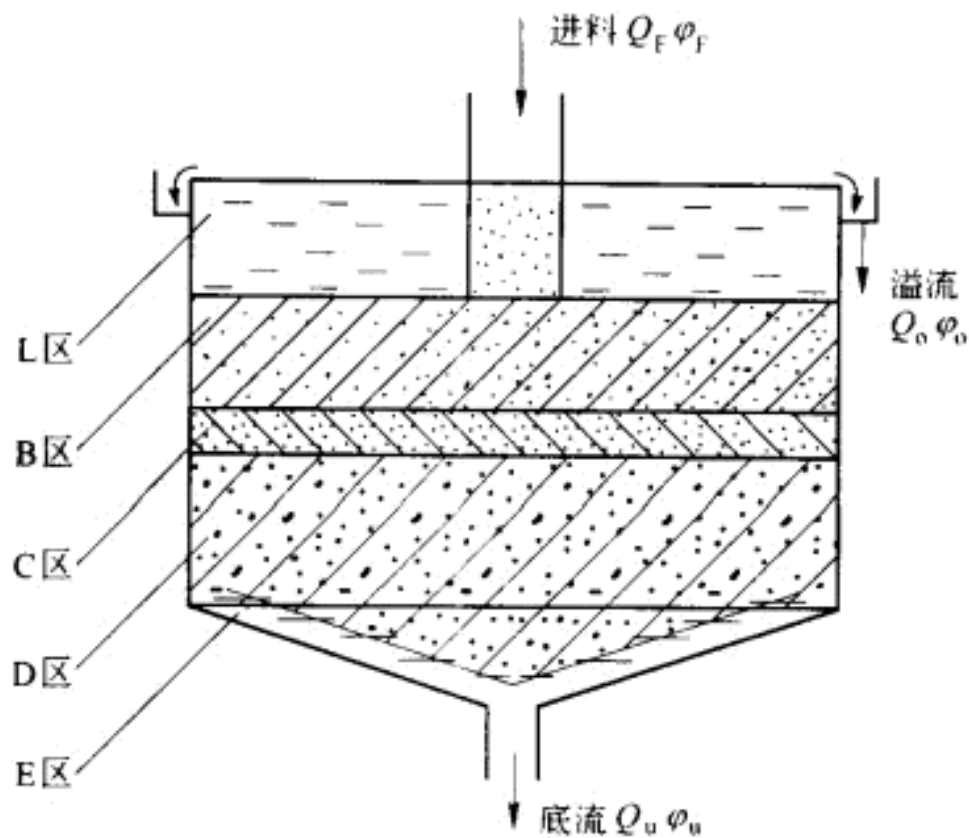


图3-3 间歇沉降曲线及沉降过程的实验图解



连续生产的浓密机



L—澄清区

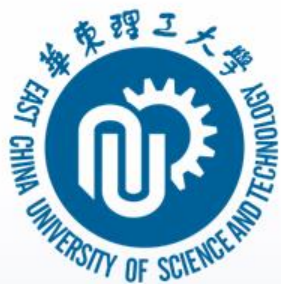
B—等速沉降区

C—干涉沉降区

D—压缩区

E—底流收集区

道尔沉降槽



浓密机物料平衡

➤ 总物料 $Q_F = Q_u + Q_o$

➤ 固体 $\varphi_F Q_F = \varphi_u Q_u + \varphi_o Q_o$

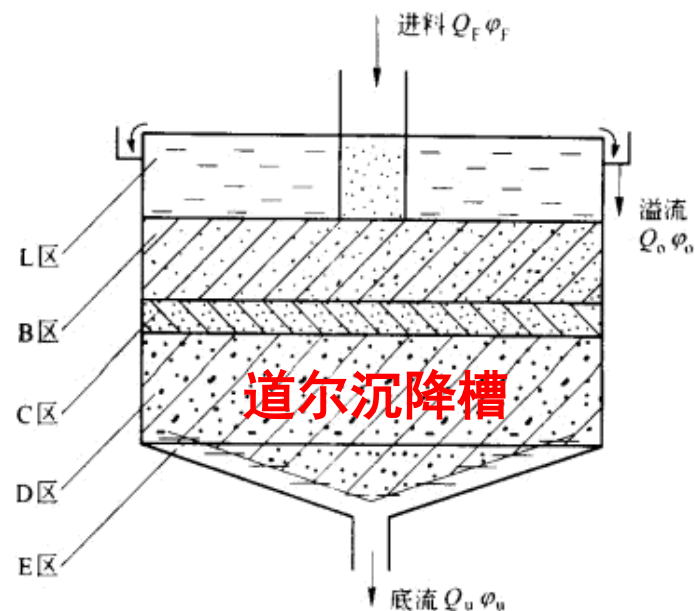
➤ 液体 $Q_F (1 - \varphi_F) = Q_u (1 - \varphi_u) + Q_o (1 - \varphi_o)$

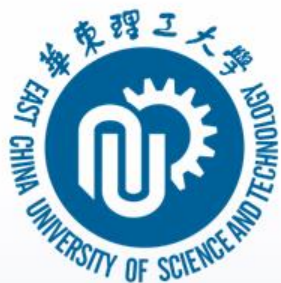
➤ 若溢流不含固体 $\varphi_F Q_F = \varphi_u Q_u$

$$Q_F (1 - \varphi_F) = Q_u (1 - \varphi_u) + Q_o$$

式中 Q_F 、 Q_u 、 Q_o ——进料、底流及溢流的体积流量

φ_F 、 φ_u 、 φ_o ——进料、底流及溢流中固体的体积浓度





科克莱文杰 (Coe-Clevenger) 模型

- ◆ 等速沉降区，即B区沉降速度：

$$u_B = \Delta H / \Delta t = (H_a - H_b) / (t_b - t_a)$$

- ◆ 干涉沉降区，即C区沉降速度：

$$u_c = f(\varphi) \quad u_C = (1 - \varphi)^{5.5} u_B$$

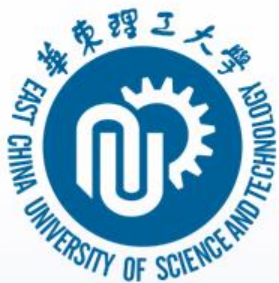
- ◆ 在稳态下操作的浓密机，为保证溢流液中不含固体，首先需满足的条件为：

$$Q_F / A \leq u_B$$

- ◆ C-C模型认为，当浓密机的进出料处于稳态，且溢流不含固体时，应有：

固体流量 Q_φ :

$$Q_F \varphi_F = Q_\varphi = Q_u \varphi_u$$



C-C方程

液体流量：
$$Q_o = Q_F (1 - \varphi) - Q_u (1 - \varphi_u)$$

上两式联立可得：
$$Q_o = \varphi_F Q_F (1 / \varphi - 1 / \varphi_u)$$

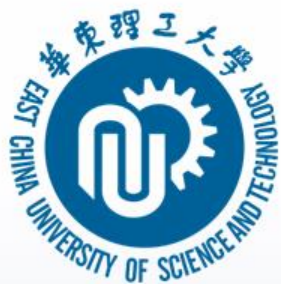
上两式两边除以A可得：
$$Q_o / A = (Q_F \varphi_F / A) (1 / \varphi - 1 / \varphi_u)$$

或改写为：
$$A = \frac{G}{u} \left(\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{\varphi_u} \right)$$

A—沉降面积 (m²)

G—固体体积流量 (m³/h)

只有B区满足C-C方程的关系，进入干涉沉降区，C-C方程不再使用



B区高度计算

➤ 如右图矩形槽所示：长、宽、高分别为L、B、H，进料由顶面（B × L）进入。则有：

$$h_B \times B \times L = Q_F \Delta t_B$$

式中： Δt_B ——进料矿浆在等速沉降区B的停留时间

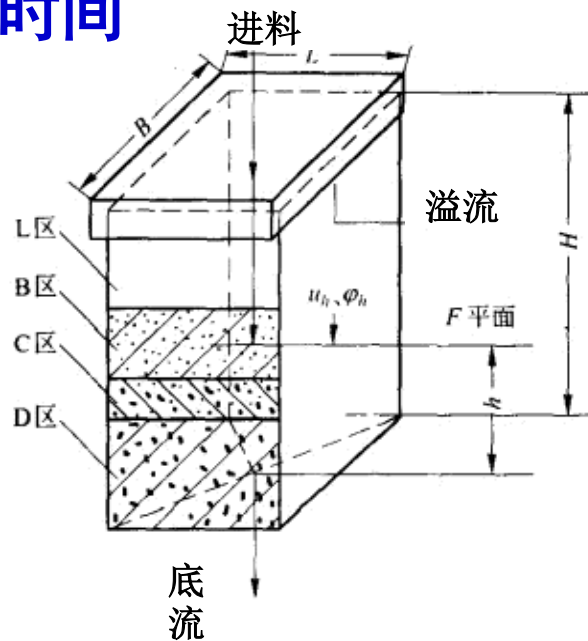
$$\Delta t_B \geq (\Delta h_B / u_B)$$

式中： u_B ——间歇实验测得的悬浮液界面沉降速度

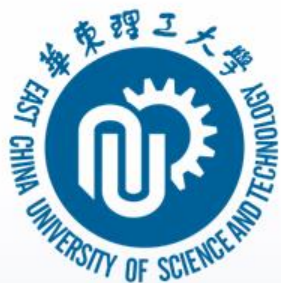
➤ B区的高度为：

$$h_B = (Q_F / A)(\Delta t_B) \text{ 或 } Q_F = A u_B$$

式中， $A = L \times B$ 为沉降面积



§ 上式表明，沉降设备的处理量在沉降速度一定的情况下只与沉降面积有关，与高度无关。——面积(浅池)原理



干涉沉降区-C区

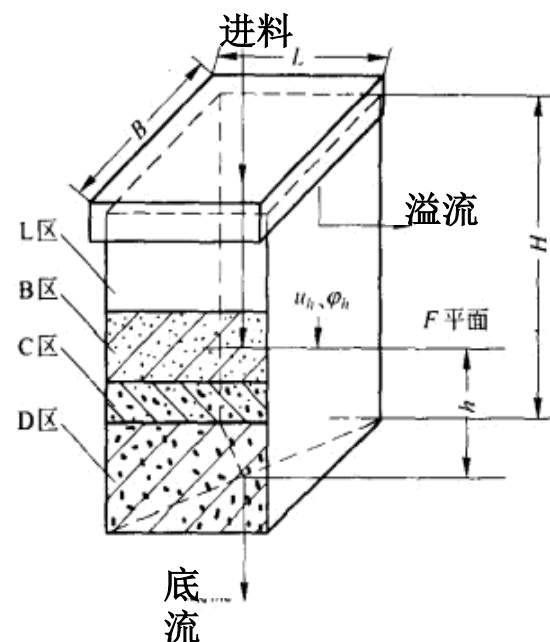
总物料平衡: $Q_h = Q_u + Q_L$

液体体积平衡: $Q_h(1 - \varphi_h) = Q_u(1 - \varphi_u) + Q_L$

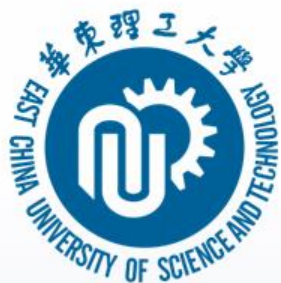
Q_L 为平面上升的液体流量, 设其中不含固体微粒, 则有

固体质量平衡 $Q_h \varphi_h \rho_s = Q_u \varphi_u \rho_s$

式中: ρ_s G 均为已知参数



➤ C区——对应于沉降实验曲线的b-c段



压缩区-D区

➤ 矿浆进入压缩区，固液分离现象基本结束，固体和液体作为一个整体以活塞流的形式向下运动在前进的过程中受重力的影响会产生压缩作用。

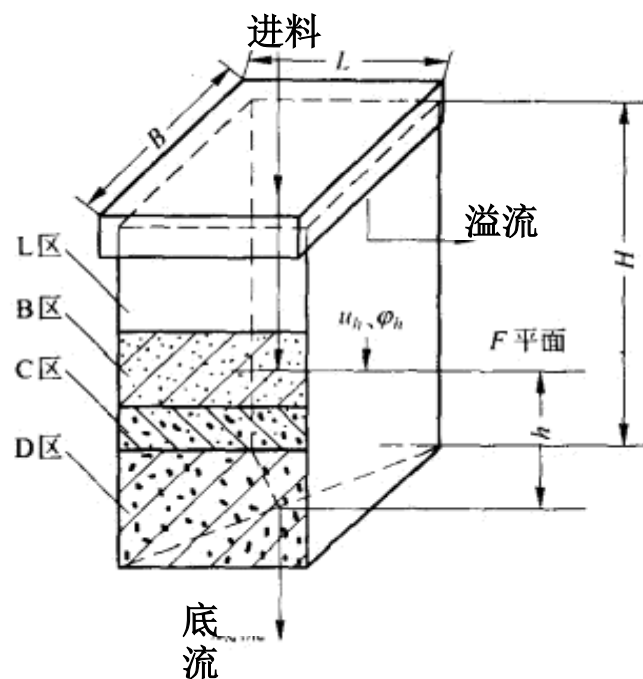
将压缩区作为一个整体来处理，其物料平衡的关系如下：

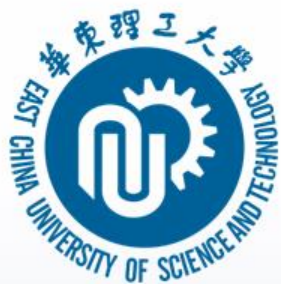
总物料 $Q_{hD} - Q_{LD} = Q_u$

固体 $Q_{hD}\varphi_{hD} = Q_u\varphi_u$

液体 $Q_{hD}(1 - \varphi_{hD}) = Q_u(1 - \varphi_u) + Q_{LD}$

式中 Q_{LD} —从压缩区上升的液体的流量





压缩段高度计算

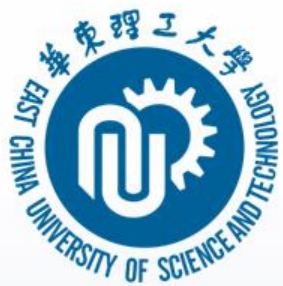
上式亦可写为

$$Q_{hD} \varphi_{hD} \rho_s / A = u_D \varphi_{hD} \rho_s = G$$

根据前述间歇实验结果，可以测出压缩速度 u_D 及由沉降所需要的时间 $\Delta t_p = t_u - t_c$ ，据此可算出压缩段的高度为

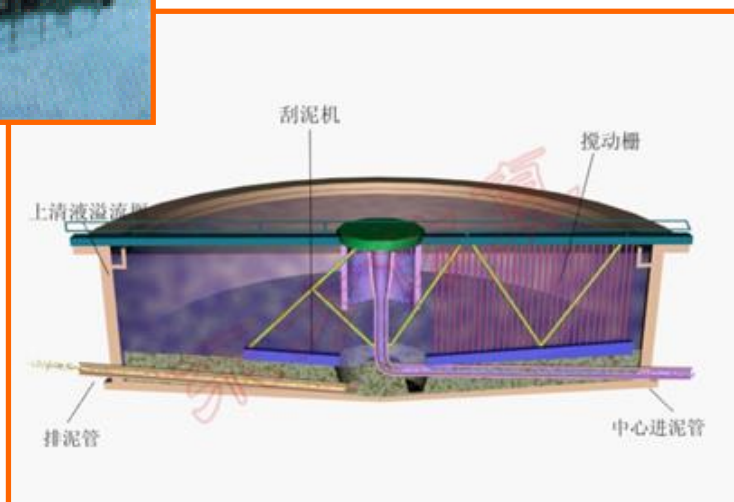
$$\Delta h_p = u_D \Delta t_p$$

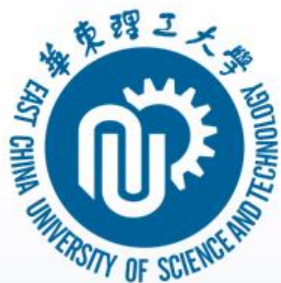
式中， $u_D = Q_{hD} / A$



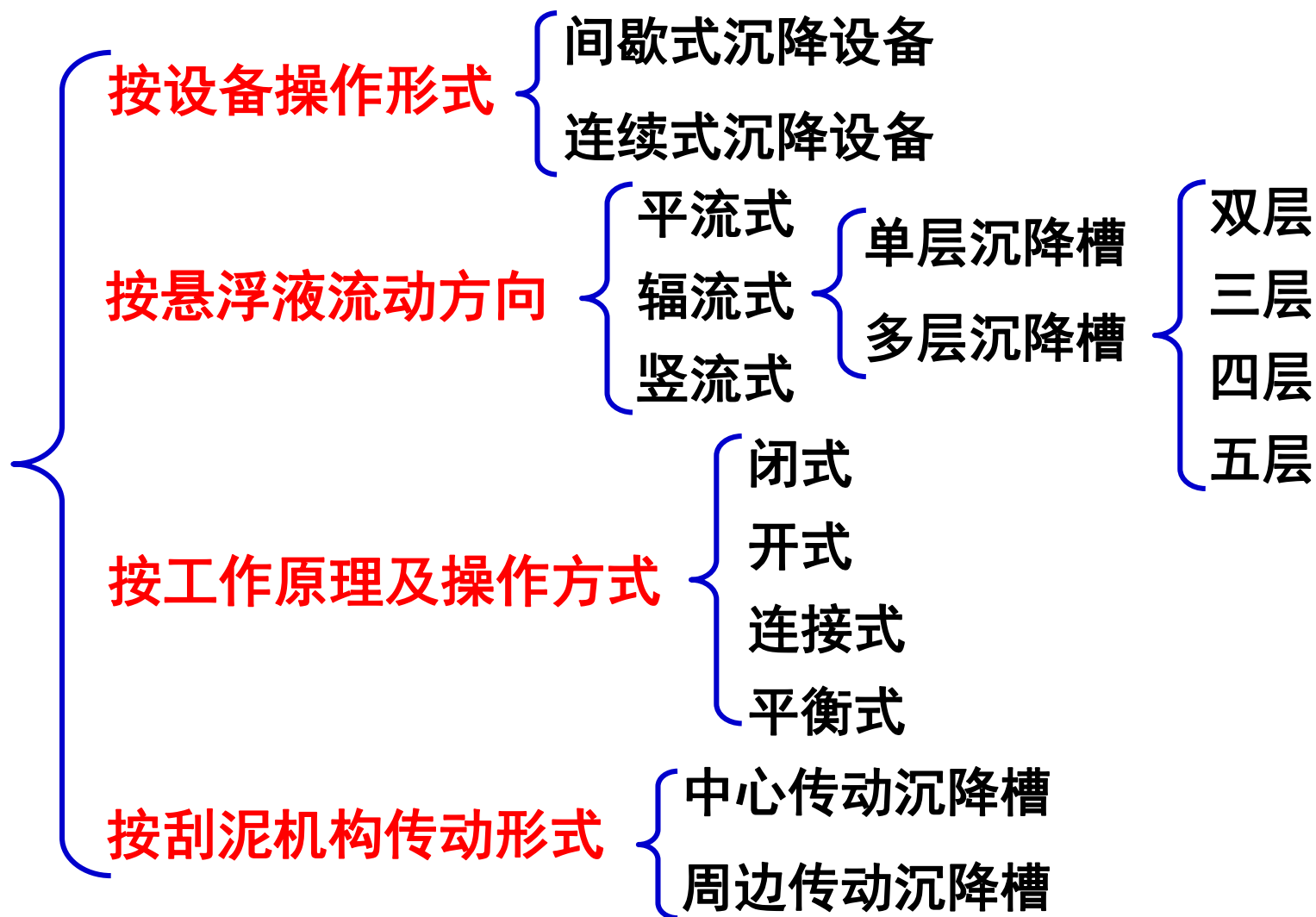
3.1.3 重力沉降设备

实现重力沉降分离的设备称为沉降槽，也称浓缩机、浓密机等



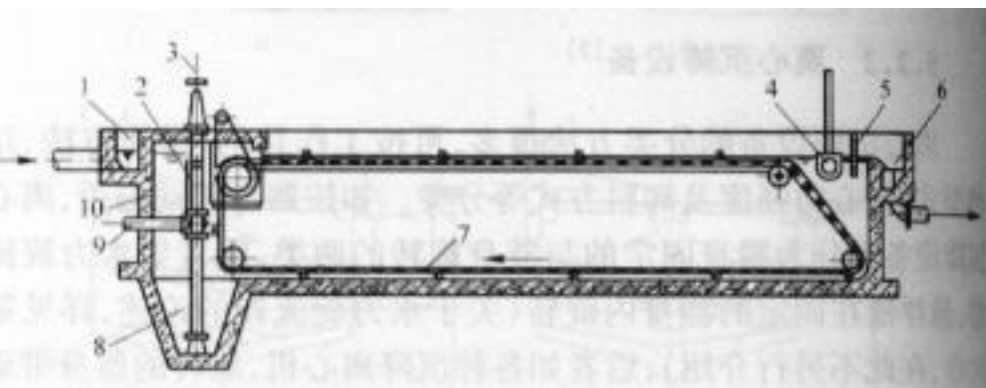
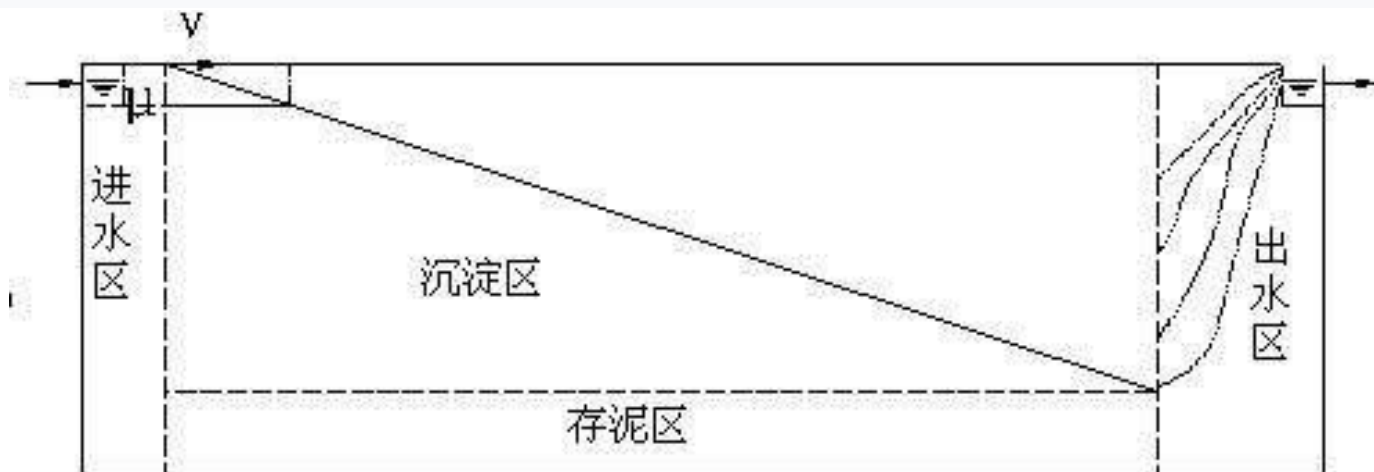


3.1.3 重力沉降设备



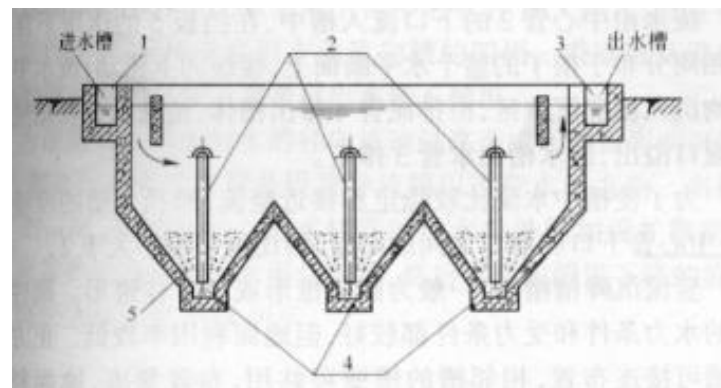
平流沉降槽

平流式沉降池结构示意



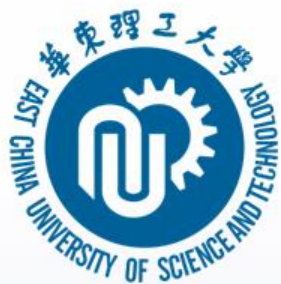
设有链带刮泥装置的平流沉降槽

1-进水槽；2-进水挡板；3-排泥浆阀；4-可转动的排渣管；5-出水挡板；6-溢流槽；7-链带式刮泥机；8-排泥斗；9-排泥渣管；10-槽体

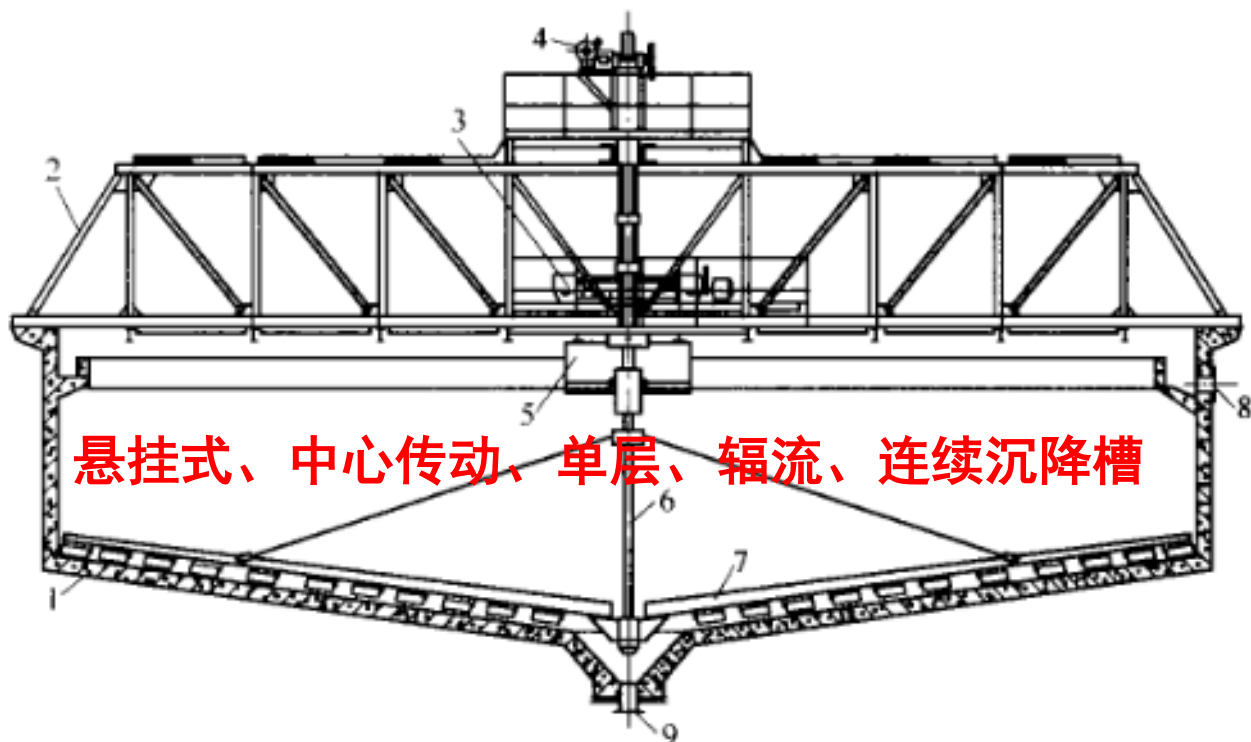


多斗平流沉降槽

1-进水槽；2-排泥管；3-出水槽；4-积泥斗；5-槽体

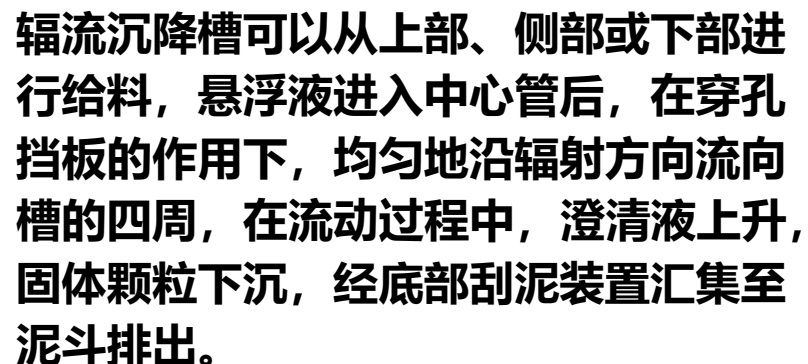


悬挂式中心传动开式单层辐流连续沉降槽的结构



悬挂式、中心传动、单层、辐流、连续沉降槽

1—槽体；2—工作桥架；3—刮泥机构传动装置；4—立轴提升装置；5—进料筐（或称加料筒）；6—传动装置；7—刮泥装置；8—澄清液出口；9—底流排出口



一般，为了避免水的径向流速过高造成短路而影响沉降效率，需要在进水管处加设导流筒，在中心管外周加设扩散筒。

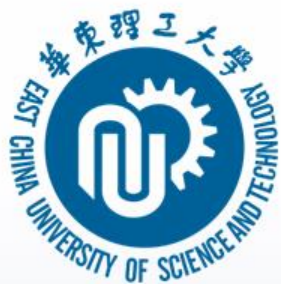
垂架式中心传动单层辐射沉降槽示意图

1-进水管; 2-穿孔挡板; 3-中心水柱管; 4-传动装置; 5-中心竖架; 6-出水管; 7-刮泥装置; 8-排泥管; 9-槽体

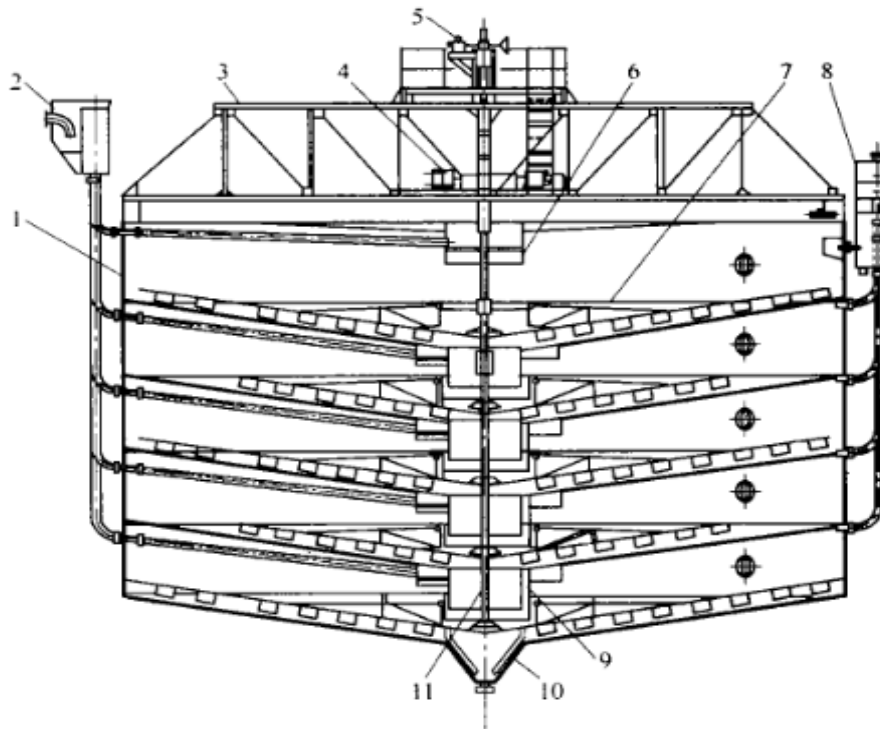


1-扩散筒；2-支撑；3-封板；4-进水柱

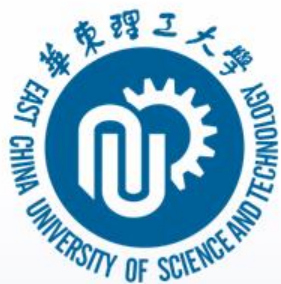




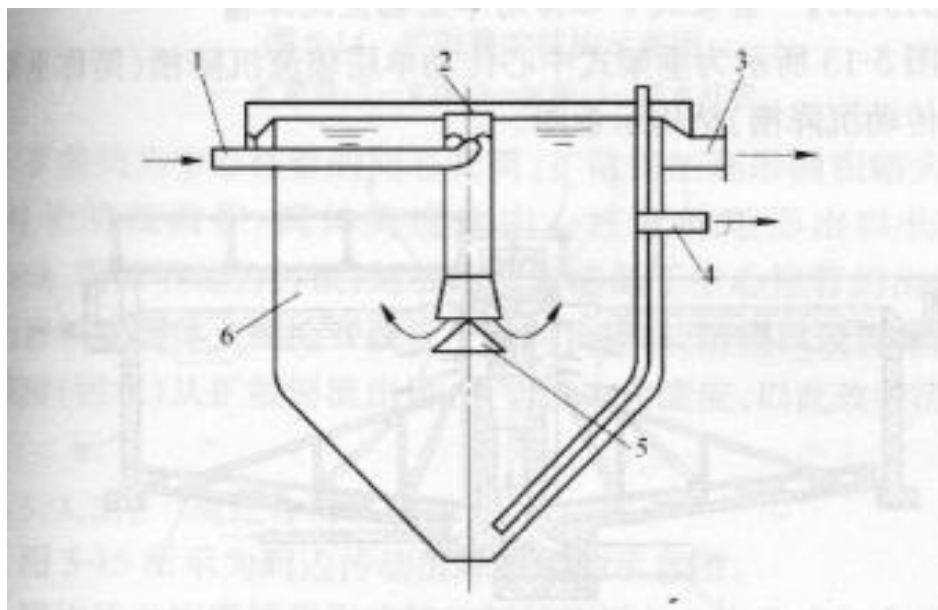
悬挂式中心传动五层赤泥沉降槽结构



1—槽体；2—加料箱；3—工作桥架；4—传动装置；5—提升装置；6—进料筐；7—刮泥装置；8—清液溢流装置；9—下渣筒；10—集泥槽；11—传动立轴



竖流沉降槽



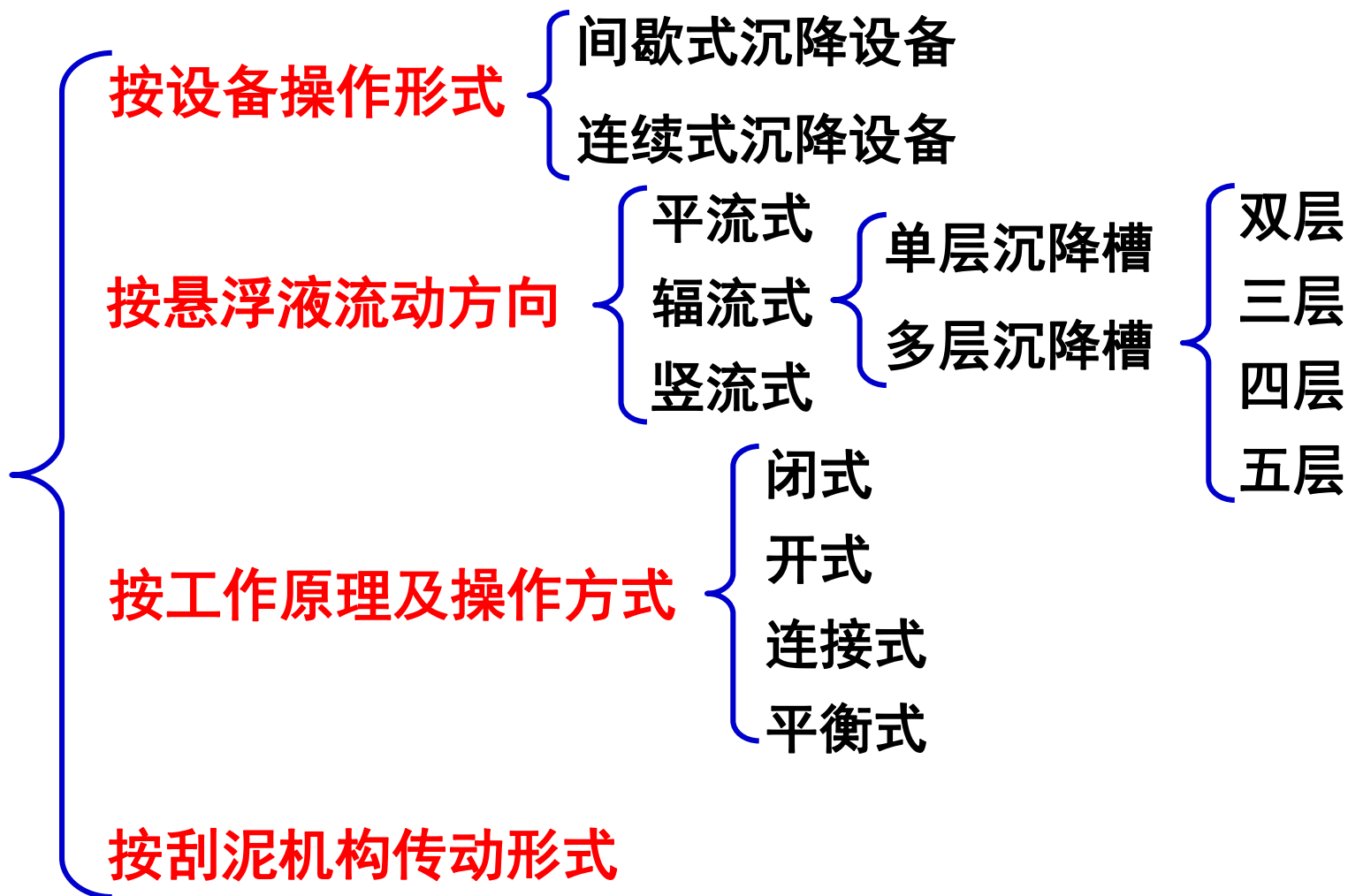
竖流沉降槽的结构示意图

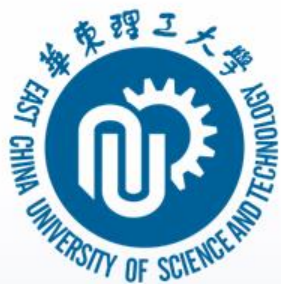
1-进水管；2-中心布水管；3-出水管；4-排泥管；5-挡块；6-槽体

工作时，悬浮液由中心管给入，液流缓慢向上运动，固体颗粒沉入槽底，由排泥管排出。为保证竖流，槽径与槽的澄清区深度的比值不大于2。



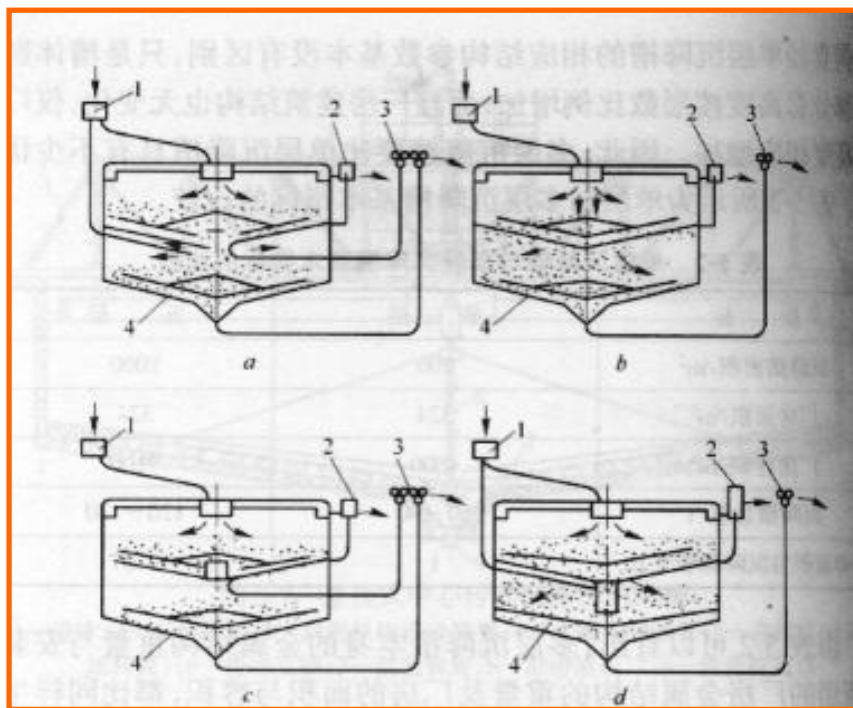
3.1.3 重力沉降设备





多层沉降设备

按工作原理及操作方式分类：闭式、开式、连接式和平衡式；



a—闭式；b—开式；c—连接式；d—平衡式

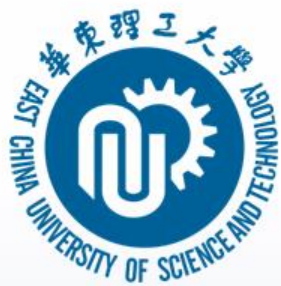
1—加料；2—溢流；3—泥渣排出口；4—刮泥装置

1) 闭式：各层间完全密封；**多进多出。**

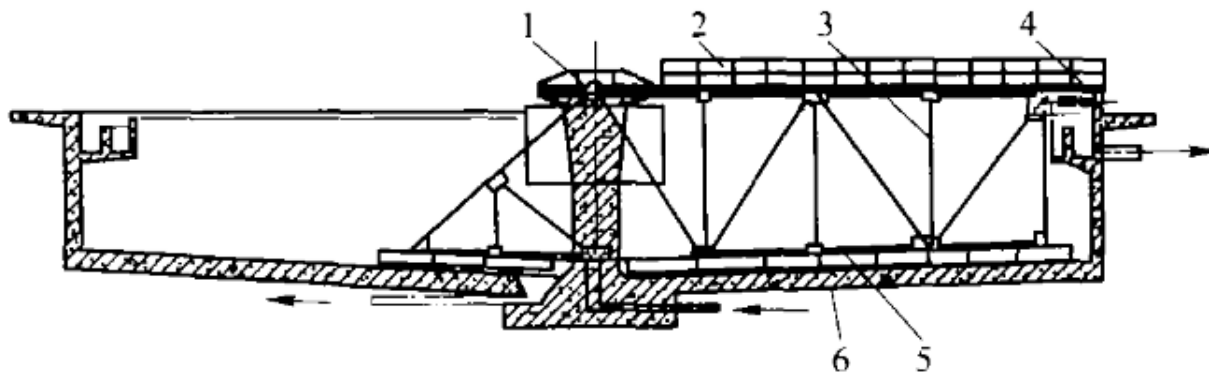
2) 开式：各层间通过中心孔口连通；**单进单出。**

3) 连接式：中心孔处设置下料套管；**单进多出。**

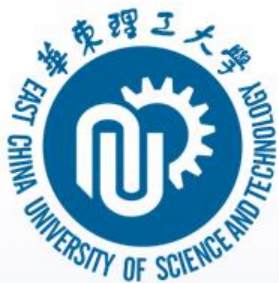
4) 平衡式：各层间下渣管向下延伸；**多进单出。**



周边传动沉降槽



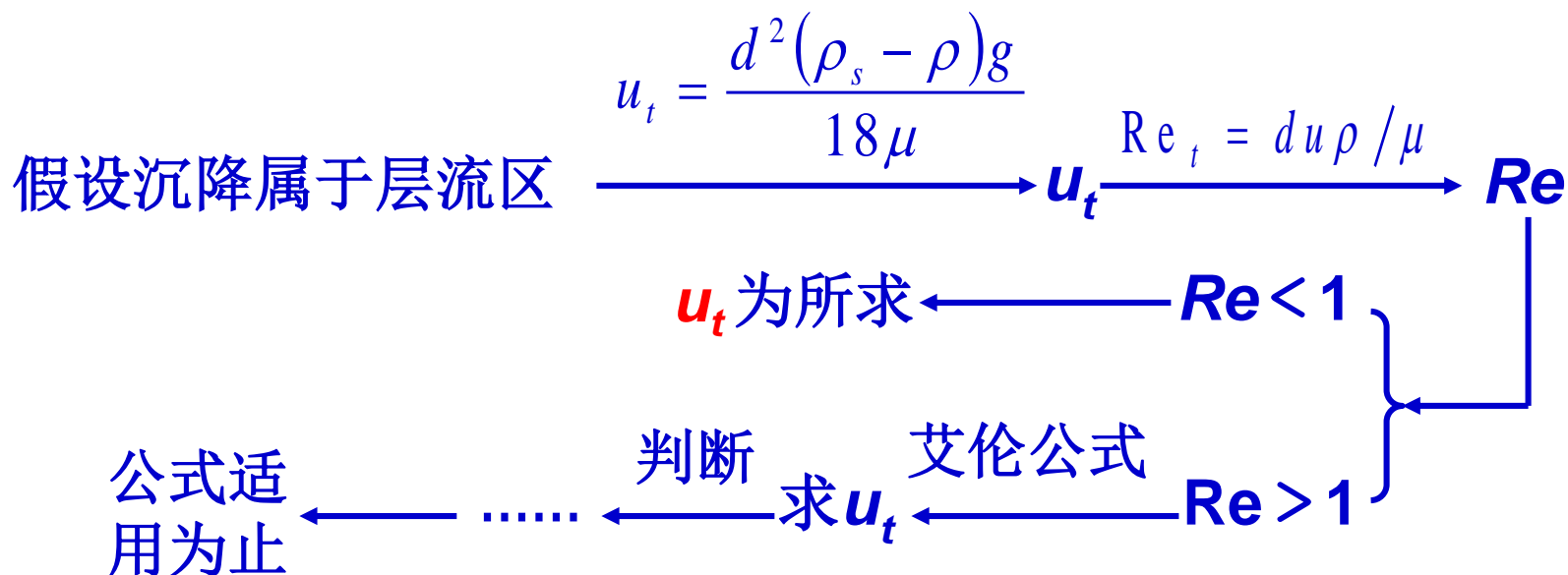
1-中心旋转支座；2-栏杆；3-旋转桁架；4-传动装置；5-刮板；6-槽体

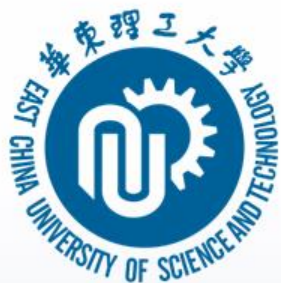


自由沉降速度计算

1) 试差法 (u_t 未知, Re 未知)

方法:



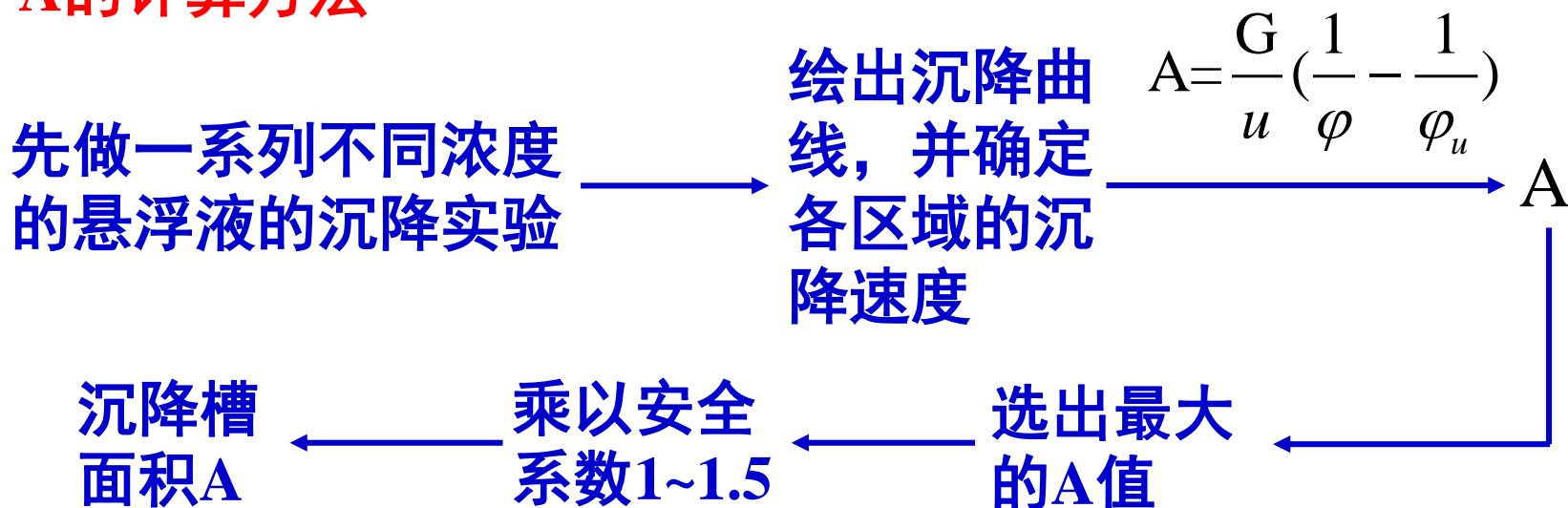


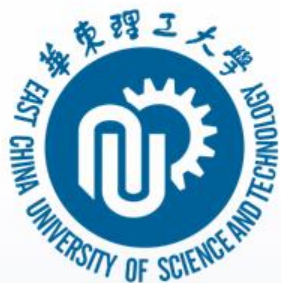
重力沉降槽设计

主要设计参数：

- 沉降槽面积 A
- 沉降槽高度 H

A的计算方法





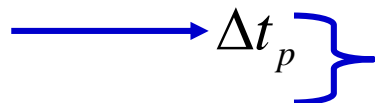
重力沉降槽设计

H 的计算方法

$$H = \Delta h_p + H_L + H_B + H_C$$

◆ 压缩区高度 Δh_p

根据沉降曲线，
算出 $\Delta t_p = t_u - t_c$



$$\xrightarrow{u_D = Q_{hD} / A} u_D \xrightarrow{\Delta h_p = u_D \Delta t_p} \Delta h_p$$

◆ 大型沉降槽的清液区高度 H_L 、自由沉降区高度 H_B 、干涉沉降区高度 H_C 按经验取值，通常为**0.5~1m**