

# 第4章 沉淀与澄清

## 4.1 杂质颗粒在静水中的沉淀

### 4.1.1 沉淀分类

#### 1.自由沉淀

单个颗粒在无边际水体中沉淀，其下沉的过程颗粒互不干扰，且不受器皿壁的干扰，下沉过程中颗粒的大小、形状、密度保持不变，经过一段时间后，沉速也不变。

#### 2.絮凝沉淀

在沉淀的过程，颗粒由于相互接触絮聚而改变大小、形状、密度，并且随着沉淀深度和时间的增长，沉速也越来越快，絮凝沉淀由凝聚性颗粒产生。

#### 3.拥挤沉淀

当水中含有的凝聚性颗粒或非凝聚性颗粒的浓度增加到一定值后，大量颗粒在有限水体中下沉时，被排斥的水便有一定的上升速度，使颗粒所受的摩擦阻力增加，颗粒处于相互干扰状态，此过程称为拥挤沉淀。

## 4.1.2 杂质颗粒在静水中的自由沉淀

假设沉淀的颗粒是球形，其所受到的重力为：

$$F_1 = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_p - \rho_1) g$$

所受到的水的阻力：

$$F_2 = C_D \rho_1 \frac{u^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

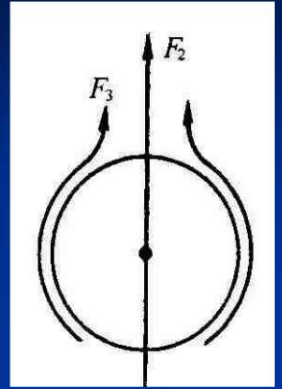
$C_D$ 与颗粒大小、形状、粗造度、沉速有关。

根据牛顿第二定律可知：

$$\frac{\pi}{6} d^3 \rho_p \frac{du}{dt} = \frac{1}{6} \pi d^3 (\rho_p - \rho_1) g - C_D \rho_1 \frac{u^2}{2} \cdot \frac{\pi d^2}{4}$$

达到重力平衡时，加速度为零，令式（7-3）左边为零，加以整理，得沉速公式：

$$u = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{g}{C_D} \frac{\rho_p - \rho_1}{\rho_1} d}$$



$C_D$ 与 $Re$ 有关，见图6-1。

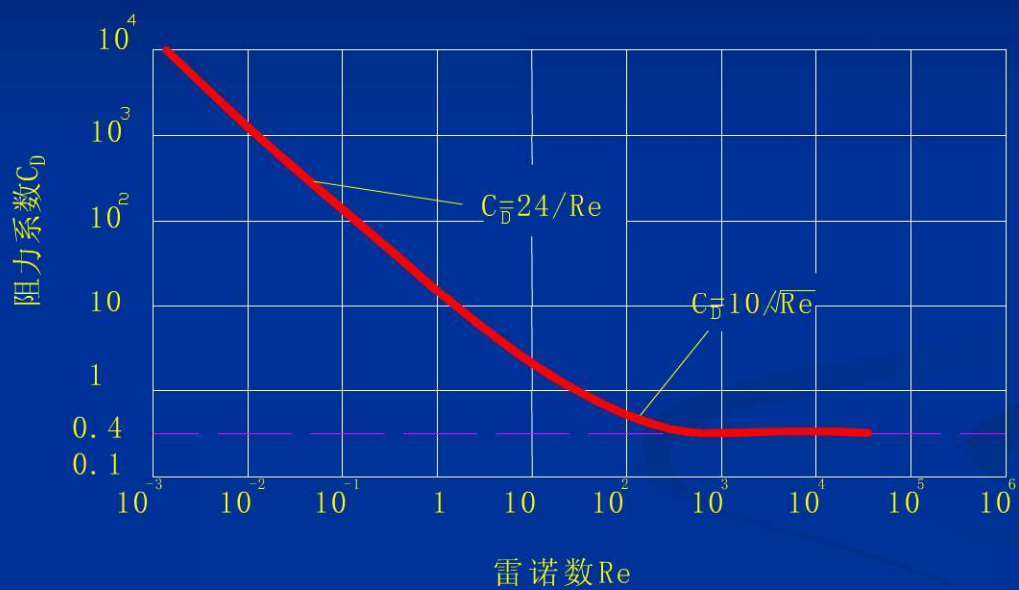


图 7-1  $C_D$ 与 $Re$ 的关系（球型颗粒）

# 1. 斯笃克斯公式

当 $Re < 1$ 时：呈层流状态

$$C_D = \frac{24}{Re} \quad (7-5)$$

斯笃克斯公式：

$$u = \frac{1}{18} \frac{\rho_p - \rho_1}{\mu} g d^2 \quad (7-6)$$

## 2. 牛顿公式

当 $1000 < \text{Re} < 25000$ 时，呈紊流状态， $C_D$ 接近于常数0.4代入  
(7-5) 得牛顿公式：

$$u = 1.83 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_1}{\rho_1}} dg \quad (7-7)$$

当 $1 < \text{Re} < 1000$ 时，属于过渡区， $C_D$ 近似为

$$C_D = \frac{10}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (7-8)$$

代入得阿兰公式：

$$u = \left[ \left( \frac{4}{255} \right) \frac{(\rho_s - \rho_1)^2 g^2}{\mu \rho_1} \right]^{\frac{1}{3}} d \quad (7-9)$$



### 4.1.3 悬浮颗粒在静水中的拥挤沉淀

#### 1. 沉降过程分析

如图7-2，整个沉淀筒中可分为清水、等浓度区、变浓度区、压实区等四个区。

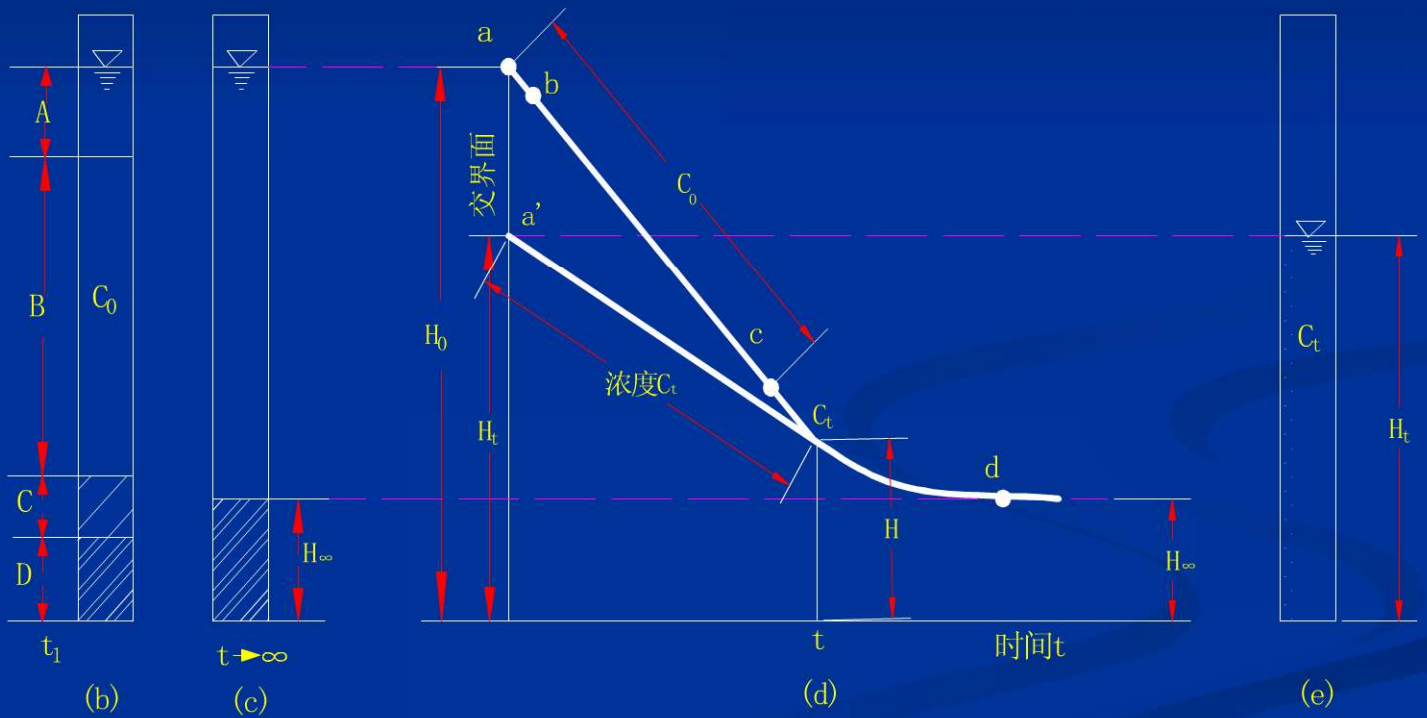


图 7-2 高浊度水的沉降过程

## 2.肯奇沉淀理论

由图7-2可知曲线a-c段的悬浮物浓度为 $C_0$ ，c-d段浓度均大于 $C_0$ 。

设在c-d曲线任一点 $C_t$ 作切线与纵坐标相交于 $a'$ 点，得高度 $H_t$ 。按照肯奇沉淀理论得：

$$C_t = \frac{C_0 H_0}{H_t} \quad (7-10)$$

作 $C_t$ 点切线，这条切线的斜率表示浓度为 $C_t$ 的交界面下沉速度：

$$v_t = \frac{H_t - H}{t} \quad (7-11)$$



### 3.相似理论

当原水颗粒浓度一样时，不同沉降高度的界面沉降过程曲线的相似性（见图7-3），即

$$\frac{OP_1}{OP_2} = \frac{OQ_1}{OQ_2} \quad (7-12)$$

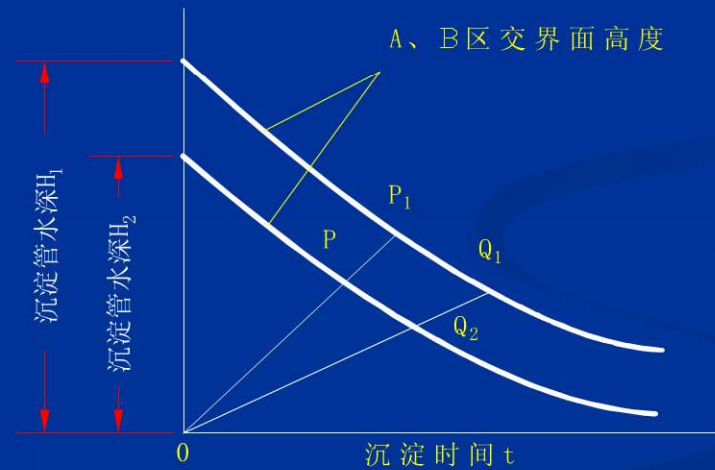


图 7-3 不同沉淀高度的沉降过程相似关系

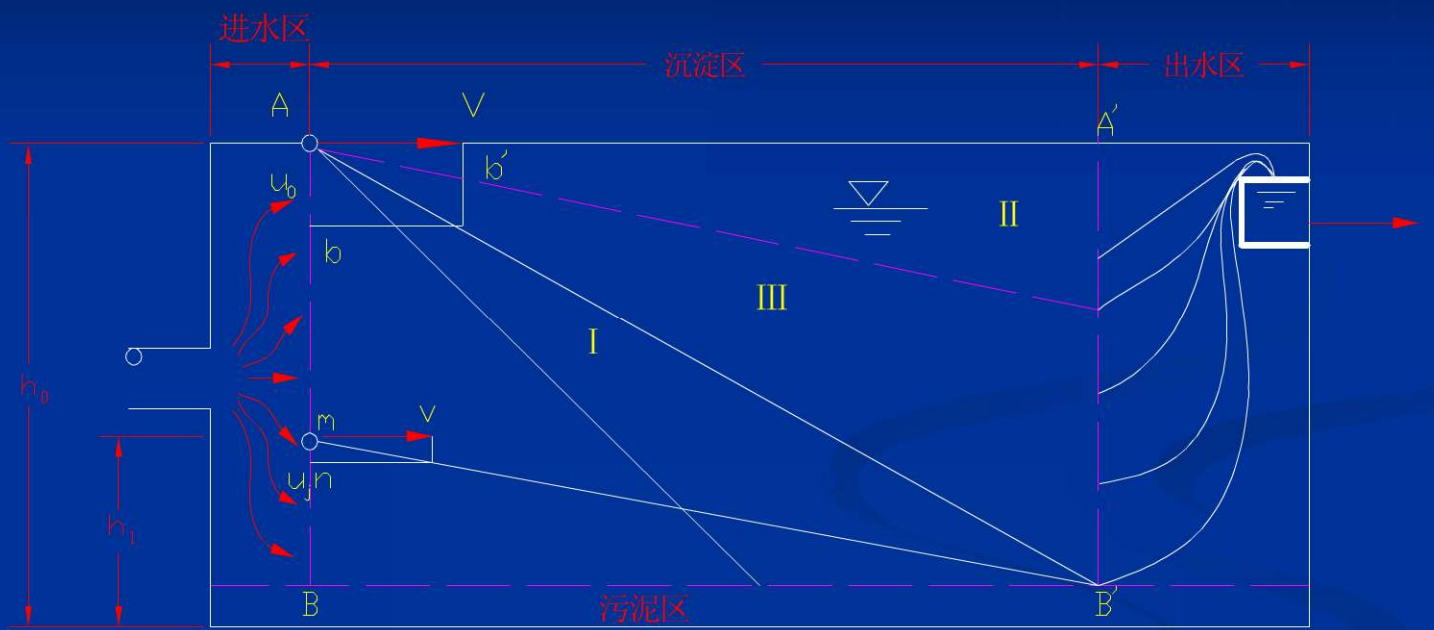
## 4.2 平流式理想沉淀池

### 4.2.1 理想沉淀池理论

理想沉淀池的基本假设：

- ①颗粒处于自由沉淀状态，颗粒的沉速始终不变。
- ②水流沿水平方向流动，在过水断面上，各点流速相等，并在流动过程中流速始终不变。
- ③颗粒沉到底就被认为去除，不再返回水流中。

理想沉淀池的工作情况见图7-4。



原水进入沉淀池，在进水区被均匀分配在A-B截面上其水平流速为：

$$v = \frac{Q}{h_0 B}$$

考察顶点，流线III：正好有一个沉降速度为的颗粒从池顶沉淀到池底，称为截留速度。

$u \geq$ 的颗粒可以全部去除， $u <$ 的颗粒只能部分去除

对用直线III代表的一类颗粒而言，流速和都与沉淀时间有关

$$t = \frac{L}{v} \quad (7-13)$$

$$t = \frac{h_0}{u_0} \quad (7-14)$$

令(7-13)和(7-14)相等，代入(7-12)得：

$$u_0 = \frac{Q}{LB} \quad (7-15)$$

即：

$$u_0 = \frac{Q}{A} \quad (7-16)$$

$\frac{Q}{A}$ 一般称为“表面负荷”或“溢流率”。表面负荷在数值上等于截留速度，但含义不同。

设原水中沉速为 $u_i$  ( $u_i < u_0$ ) 的颗粒的浓度为 $C$ ，沿着进水区高度为 $h_0$ 的截面进入的颗粒的总量为 $QC = h_0 B v C$ ，沿着 $m$ 点以下的高度为 $h_i$ 的截面进入的颗粒的数量为 $h_i B v C$ （见图7-4），则沉速为 $u_i$ 的颗粒的去除率为：

$$E = \frac{h_i B v C}{h_0 B v C} = \frac{h_i}{h_0} \quad (7-17)$$

根据相似关系得：

$$\frac{h_0}{u_0} = \frac{L}{v} \quad \text{即} \quad h_0 = \frac{L u_0}{v} \quad (7-18)$$

同理得：

$$h_i = \frac{L u_i}{v} \quad (7-19)$$

将式（7-18）和（7-19）代入（7-17）得特定颗粒去除率：

$$E = \frac{u_i}{u_0} \quad (7-20)$$

将（7-16）代入（7-20）得：

$$E = \frac{u_i}{u_0} = \frac{u_i}{Q/A} \quad (7-21)$$



## 4.2.2理想沉淀池理论

由上式可知，颗粒在理想沉淀池的沉淀效率只与表面负荷有关，而与其它因素（如水深、池长、水平流速、沉淀时间）无关。

(1)  $E$ 一定，越大，表面负荷越大，或 $q$ 不变但 $E$ 增大。与混凝效果有关，应重视加强混凝工艺。

(2) 一定，增大 $A$ ，可以增加产水量 $Q$ 或增大 $E$ 。当容积一定时，增加 $A$ ，可以降低水深——“浅池理论”。



### 4.2.3 理想沉淀池的总去除率

所有能够在沉淀池中去除的，沉速小于 $u_0$ 的颗粒的去除率为：

$$p = \int_0^{p_0} \frac{u_i}{u_0} dp_i \quad (7-22)$$

沉速大于和等于 $u_0$ 的颗粒全部下沉去除率为 $(1-p_0)$ ，因此理想沉淀池的总去除率为：

$$p = (1-p_0) + \int_0^{p_0} \frac{u_i}{u_0} dp_i \quad (7-23)$$

式中 $p_0$ —沉速小于 $u_0$ 的颗粒重量占所有颗粒重量的百分率；

#### 4.2.4 非凝聚性颗粒的沉淀实验分析

非凝聚性颗粒在静水中的沉淀实验，用一个圆筒进行，如图7-5所示。在圆筒水面 $h$ 处开一个取样口，要求颗粒在水中均匀分布，浓度为 $C_0$ ；然后在分别在 $t_1$ 、 $t_2$ 、... $t_n$ 时取样，分别测得浓度为 $C_1$ 、 $C_2$ 、... $C_n$ ，对应的沉速分别为 $h/t_1=u_1$ 、 $h/t_2=u_2$ 、... $h/t_n=u_n$ 。设 $p_1$ 、 $p_2$ 、... $p_n$ 分别代表 $C_1/C_0$ 、 $C_2/C_0$ 、... $C_n/C_0$ ，则 $1-p_i$ 表示所有速度大于等于 $u_i$ 的颗粒所占的比例， $p_i$ 代表沉速小于 $u_i$ 的颗粒所占的比例，见图7-5。

具有沉速 $u_1$ 、 $u_2$ 的两种颗粒之间的颗粒浓度分数为 $p_1-p_2$ 。

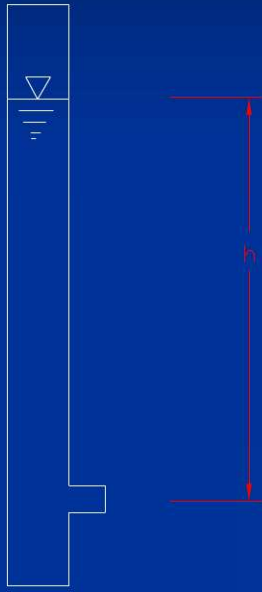


图 7-5 沉淀实验筒

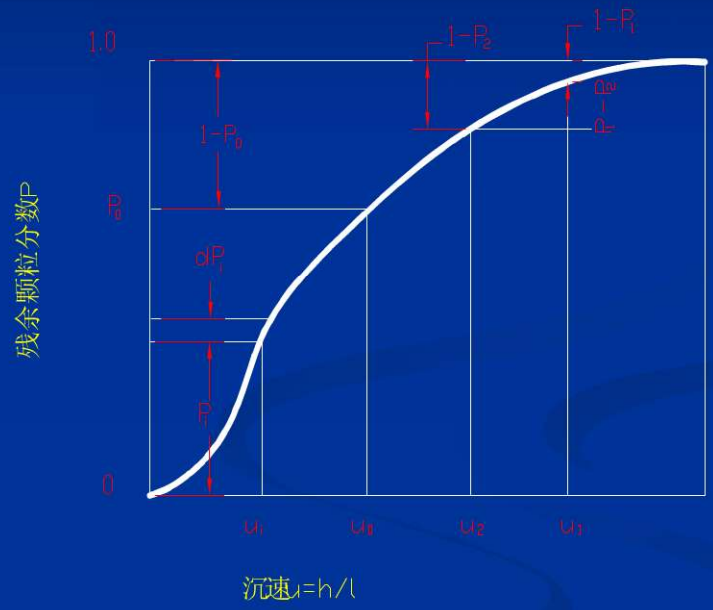


图 7-6 理想沉淀池的去除百分比计算



## 4.2.5 凝聚性颗粒的沉淀实验分析

### 1. 实验

采取图7-7的沉淀试验筒，筒长尽量接近实际沉淀池的深度，可采用2~3m，直径不小于100mm，设5~6个取样口。

先均匀搅拌测定初始浓度，然后试验，每隔一段时间，取出各取样口的水测定悬浮物的浓度，计算相应的去除百分数。以沉淀筒高度 $h$ 为纵坐标，沉淀时间 $t$ 为横坐标把去除百分比相同的各点连成光滑曲线，称为“去除百分数等值线”

含义：对应所指明去除百分数时，取出水样中不复存在的颗粒的最远沉降途径，深度与时间的比值指明去除百分数时的颗粒的最小平均沉速。

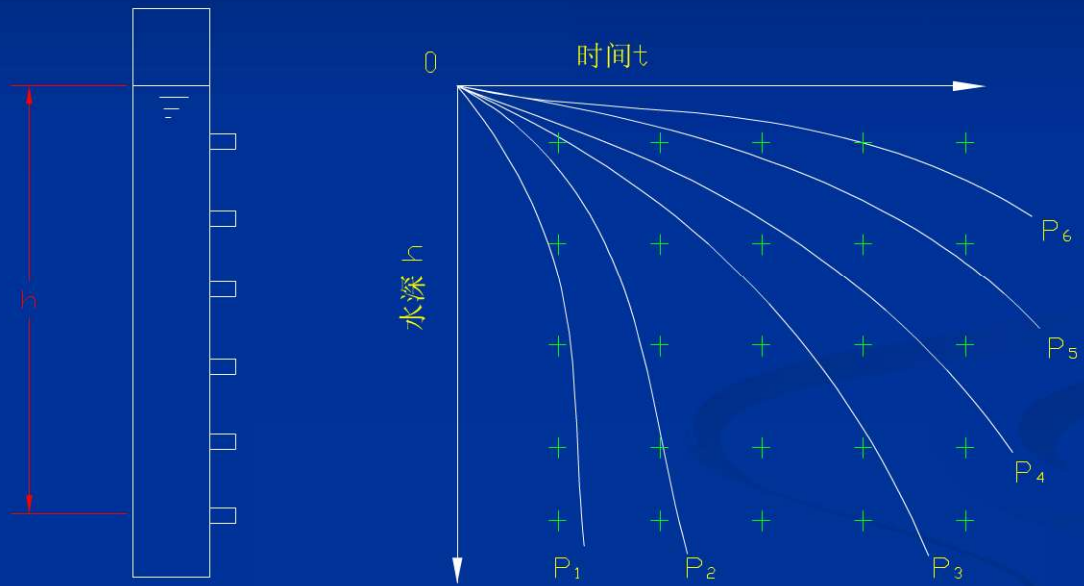


图 7-7 凝聚性颗粒沉淀实验及去除百分数等值线

## 2.计算

对于某一表面负荷而言，根据凝聚性颗粒去除百分数等值线，可以得出总的去除百分数（见图7-8）：

$$P = p_2 + \frac{h_1/t_0}{u_0}(p_3 - p_2) + \frac{h_2/t_0}{u_0}(p_4 - p_3) + \frac{h_3/h_0}{u_0}(p_5 - p_4) + \frac{h_4/h_0}{u_0}(p_6 - p_5) + \dots \quad (7-24)$$

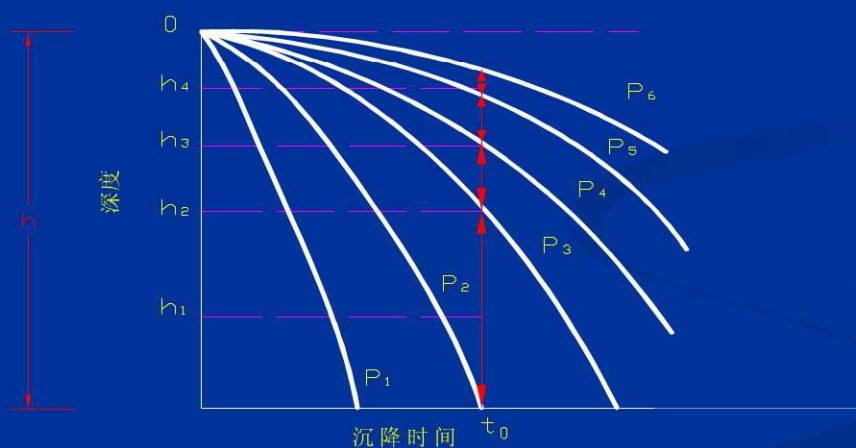


图 7-8 凝聚性颗粒的去除百分数计算



## 4.3 斜板（管）沉淀池

### 1. 原理

沉淀效果

$$E = \frac{u_i}{Q / A}$$

在原体积不变时，减少H，加大A，可以提高沉淀效率或提高Q

⇒浅层理论

1904年 Hazen 提出

1945年 Camp认为池浅为好

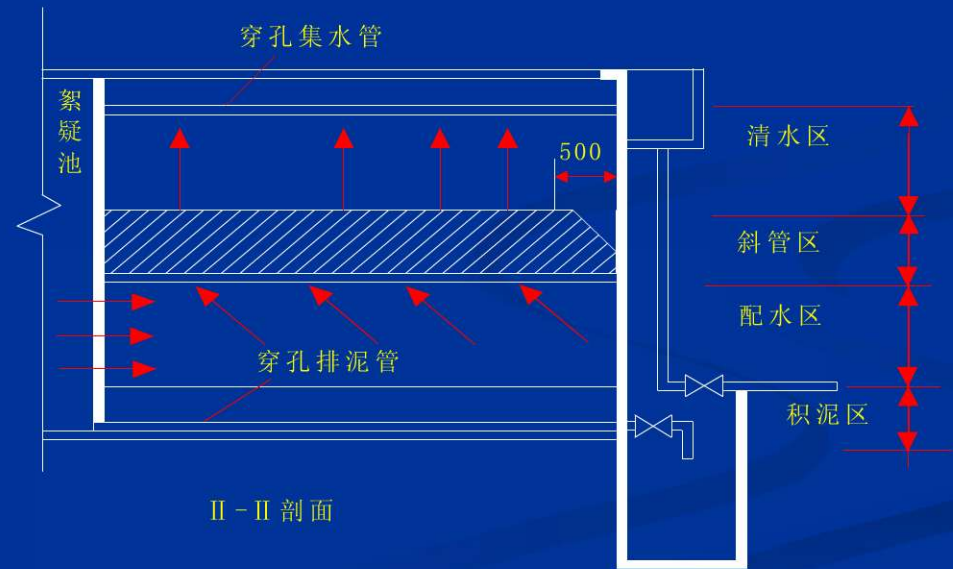
1955年 多层沉淀池产生

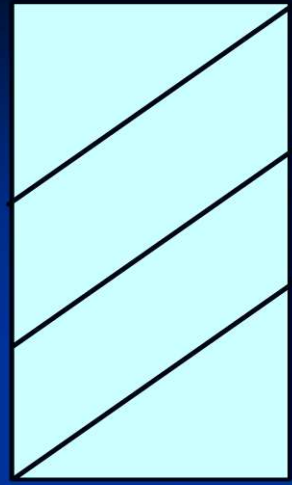
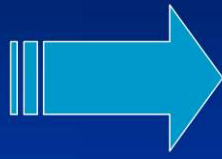
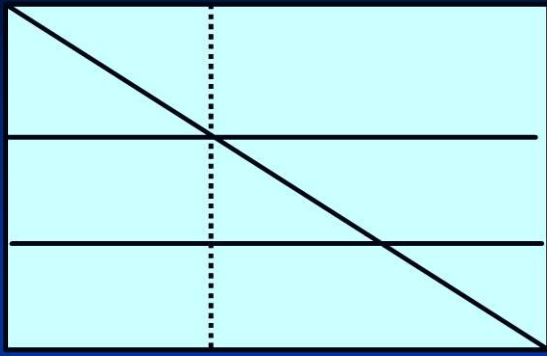
1959年 日本开始应用斜板

1972年 中国汉阳正式应用

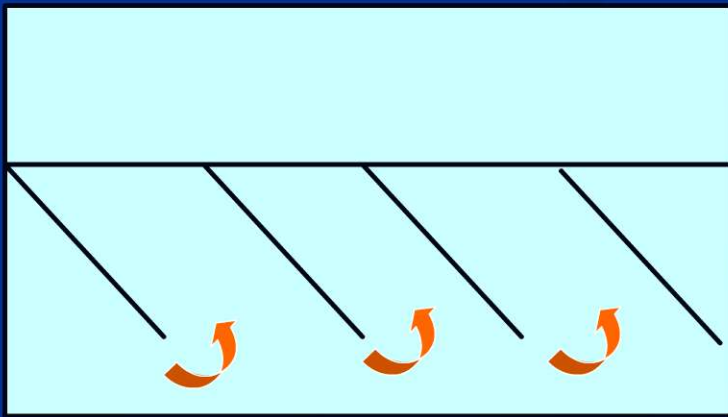
# 分类

有异向流、同向流、横向流三种，目前在实际工程中应用的是异向流斜板（管）沉淀池，其结构见图。





1955年多層沉淀池



- 断面形状：圆形、矩形、方形、多边形
- 除园性以外，其余断面均可同相邻断面共用一条边。

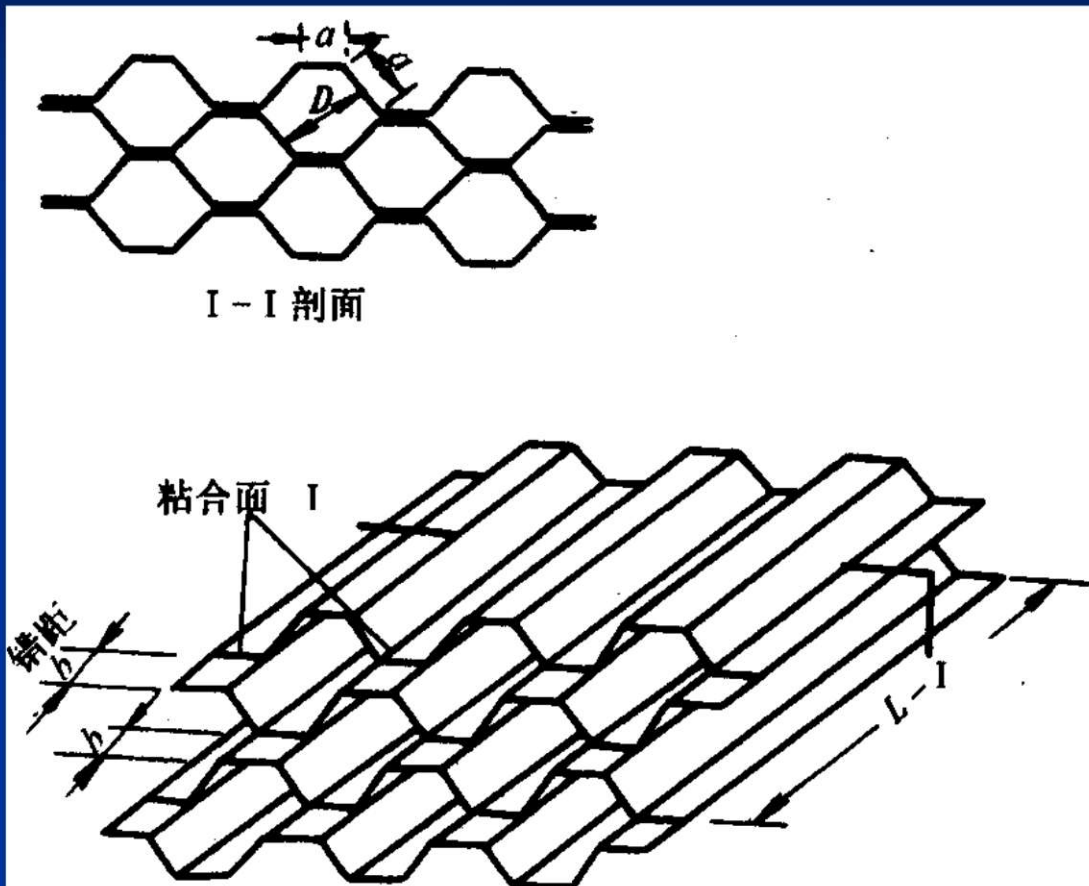


图 16-17 塑料片正六角形斜管粘合示意

## 7.5.4 设计计算

### 1. 沉淀池面积 $A$

$$A = \frac{Q}{q} \quad (7-32)$$

选定表面负荷（2.5~3.0mm/s），计算得到面积 $A$ 。

### 2. 沉淀池总高度

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 \quad (7-33)$$

式中： $h_1$ 为超高0.3m， $h_2$ 为清水层高度1.2m

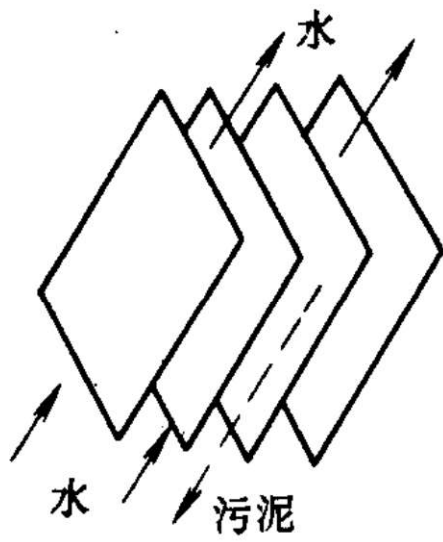
$h_3$ 为自身高度0.866m， $h_4$ 为配水区高度1.5m

$h_5$ 为污泥斗高度0.8m

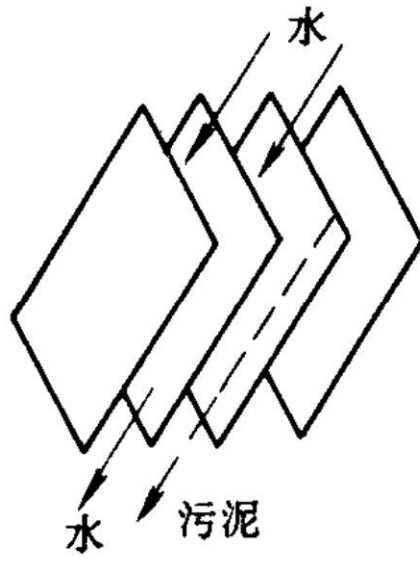
- 水力半径  $R > d/3$  -----斜板
- $R \leq d/3$  -----斜管, 管径一般25-35mm
- 斜管比斜板的水力条件更好。
- 材质:
  - 轻质, 无毒
  - 纸质蜂窝、薄塑料板 (硬聚氯乙烯、聚丙烯)



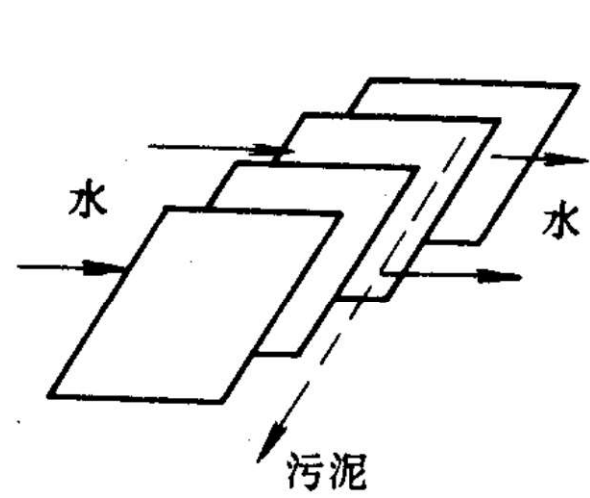
## 2. 构造与分类



(a) 异向流



(b) 同向流



(c) 横向流

(a) Countercurrent

(b) Cocurrent

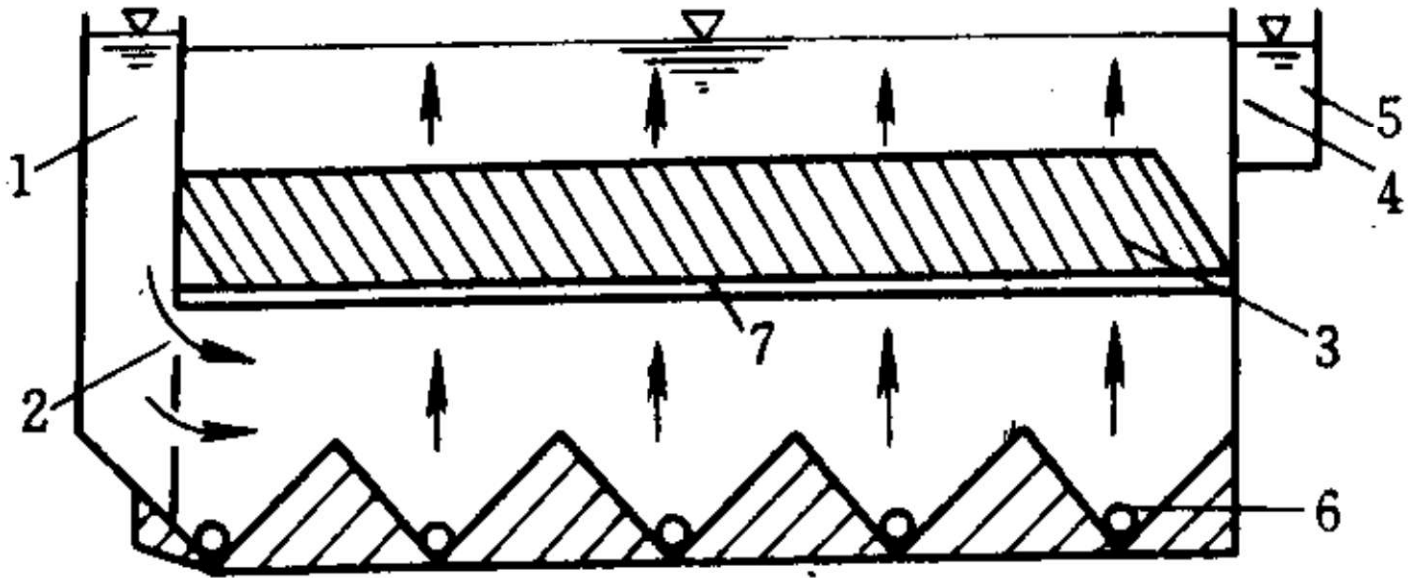
(c) Cross-flow

# 1) 异向流

$\theta = 60^\circ$ ,  $L = 1-1.2\text{m}$

板间距  $50-150\text{mm}$

清水区  $0.5-1.0\text{ m}$ , 布水区  $0.5-1.0\text{ m}$

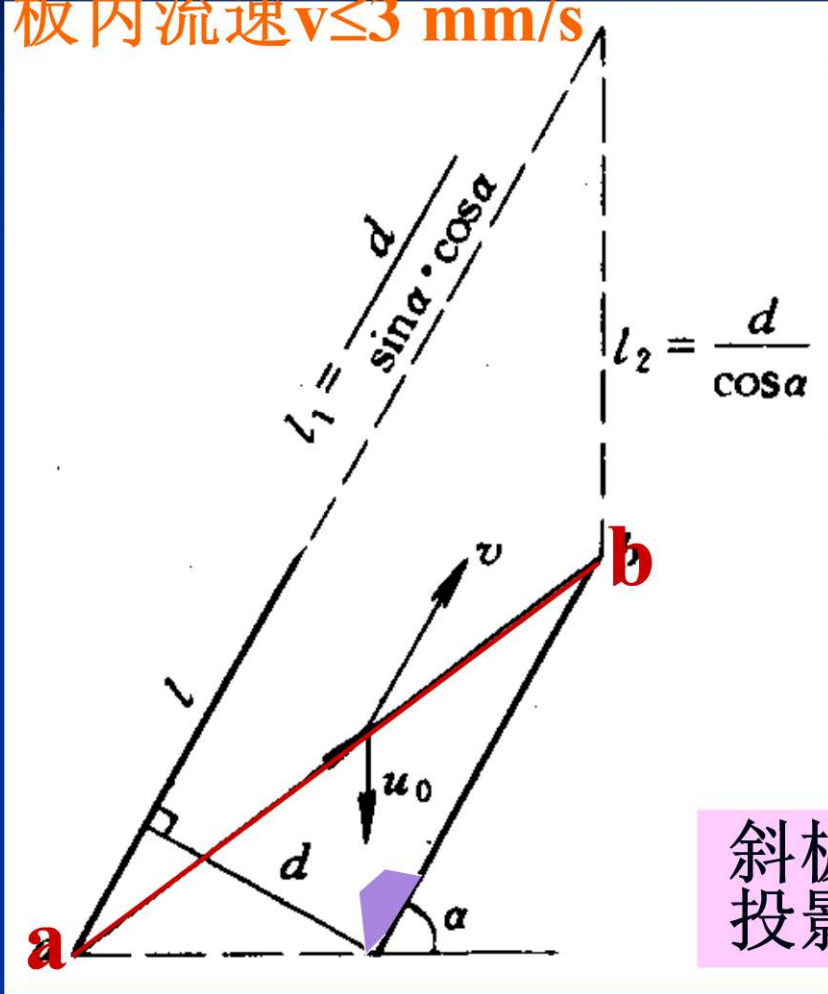


(d) 斜板(管)沉淀池

$u_0 = 0.2 - 0.4 \text{ mm/s}$

最大沉降轨迹从  $a \rightarrow b$

板内流速  $v \leq 3 \text{ mm/s}$



$$\frac{l_2}{u_0} = \frac{l + l_1}{v}$$

$$Q = vLB \cdot \sin \alpha$$

$$u_0 = \frac{Q}{nBl \cdot \cos \alpha + LB}$$

斜板水平  
投影面积

沉淀池  
表面积

$$Q_{\text{设}} = \eta u_0 (A_{\text{斜}} + A_{\text{原}})$$

$\eta$ : 0.6-0.8, 斜板效率系数

$A_{\text{斜}}$ : 斜板在水平面的投影面积

## 2) 同向流

水流促进泥的下滑，斜角可减少到30—40度  
沉淀效果提高，但构造比较复杂，使用少

$$Q_{\text{设}} = \eta u_0 (A_{\text{斜}} - A_{\text{原}})$$

## 3) 横向流

使用少，结构和平流式沉淀池较接近，易于改造。  
但水流条件差（Re大），难支撑

$$Q_{\text{设}} = \eta u_0 A_{\text{斜}}$$



### 3. 优缺点

#### 优点:

沉淀面积增大，水深降低，产水量增加

$$q=9-11\text{m}^3/(\text{m}^2\text{ h})$$

平流式 $q<2\text{ m}^3/(\text{m}^2\text{ h})$

层流状态 $\text{Re}<200$ ，平流式 $>500$

#### 缺点:

停留时间短（几分钟），缓冲能力差

对混凝要求高

耗材有时堵，常用于给水处理和污水隔油池

## 4.4 澄清池

澄清池将絮凝和沉淀过程综合于一个构筑物完成，主要依靠活性泥渣层达到澄清目的。当脱稳杂质随水流与泥渣层接触时被阻留下来使水获得澄清的现象，称为接触絮凝。

在原水中加入较多絮凝剂，并适当降低负荷，经过一段时间，便能形成泥渣层，常用于给水处理。

澄清池分为泥渣悬浮型和泥渣循环型两种。

# 1.机械搅拌澄清池

机械搅拌澄清池的构造如图7~24所示

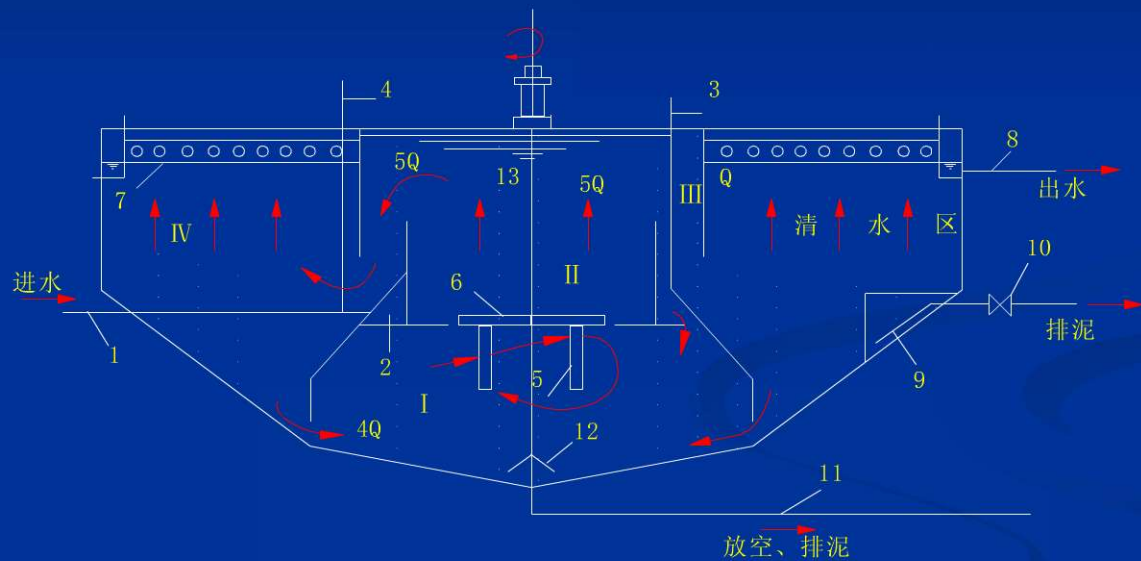


图 7-24 机械搅拌澄清池剖面示意图

- 1-进水管；2-三角配水槽；3-透气管；4-投药管；5-搅拌桨；6-提升叶轮；7-集水槽  
8-出水管；9-泥渣浓缩室；10-排泥阀；11-放空管；12-排泥罩；13-搅拌轴；  
I-第一絮凝室；II-第二絮凝室；III-导流室；IV-分离室

## 2.设计要点

机械搅拌澄清池的设计要点：

- ①清水区上升流速为**0.8~1.1mm/s**；
- ②水在澄清池内总的停留时间可采用**1.2~1.5h**；
- ③叶轮提升流量为进水流量的**3~5倍**；
- ④原水进水管、三角配水槽的水流流速分别为**1m/s、0.4m/s**；
- ⑤第一絮凝室的容积：第二絮凝室的容积（含导流室）：分离室为**2：1：7**，第二絮凝室与导流室的水流流速一般为**40~60mm/S**；
- ⑥直径大于**6m**时用**6~8**条集水槽，直径小于**6m**时用**4~6**条集水槽



## 机械搅拌澄清池的优点：

- ①处理效果好，稳定；
- ②适用于大、中水厂

## 机械搅拌澄清池的缺点：

- ①维修维护工作量较大；
- ②启动时有时需人工加土和加大加药量。



### 4.3.3. 脉冲澄清池

特点是澄清池的上升流速发生周期性的变化，这种变化是由脉冲发生器引起的。靠脉冲方式进水，悬浮层发生周期性的收缩和膨胀，见图7~23。

脉冲澄清池的特点如下：

- (1)有利于颗粒和悬浮层接触；
- (2)悬浮层污泥趋于均匀。
- (3)还可以防止颗粒在池底沉积
- (4)处理效果受水量、水质、水温影响较大；
- (5)构造复杂。

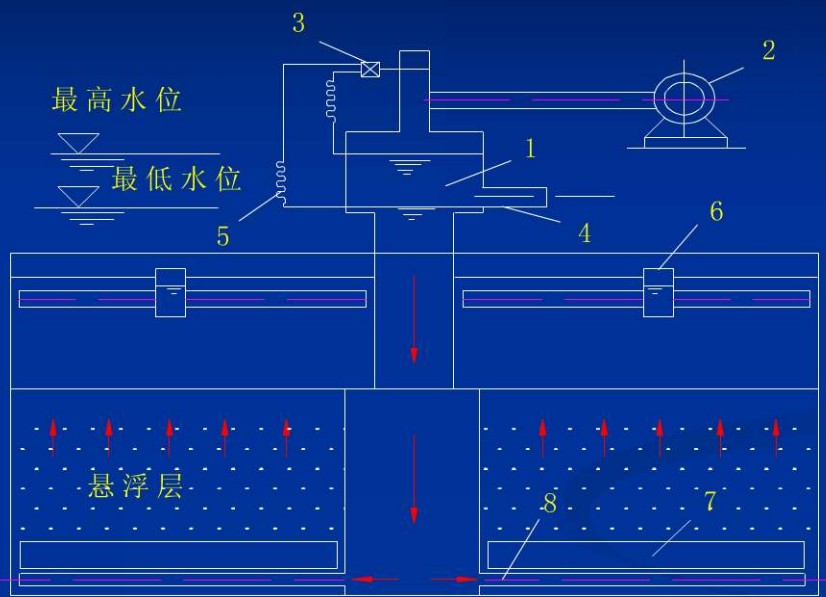


图 7-23 采用真空泵脉冲发生器的澄清池的剖面图

- 1-进水室；2-真空泵；3-进气阀；4-进水管
- 5-水位电极；6-集水槽；7-稳流板；8-配水管

## 4.6 幅流式沉淀池

辐流式沉淀池（圆形、正方形）直径6~60m池内水深1.5~3.0m,机械排泥,池底坡度不小于0.05,见图7-13和图7-14。为使布水均匀,设穿孔挡板,穿孔率10%~20%。

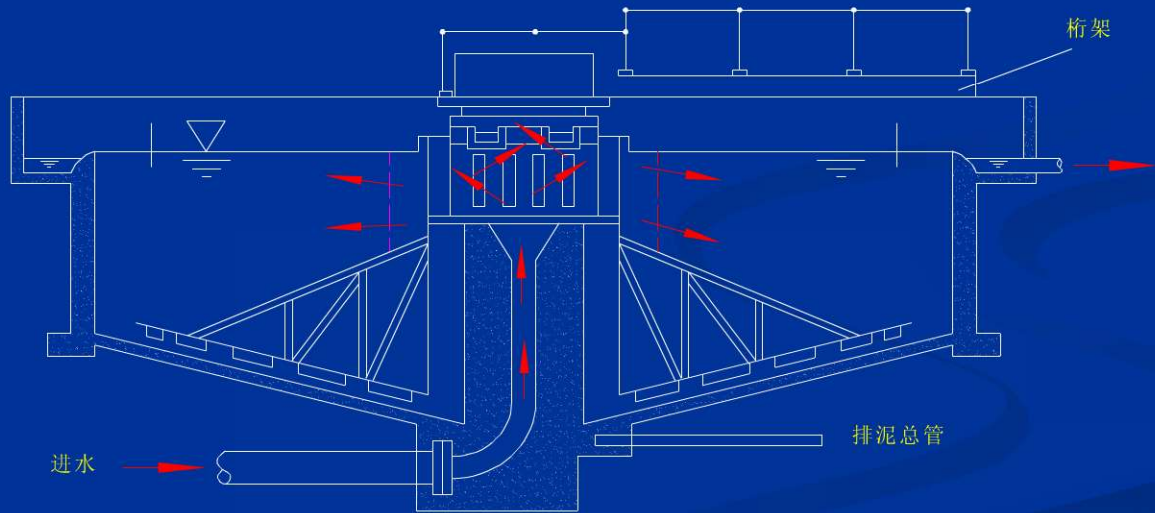


图 7-13 普通辐射式沉淀池工艺图

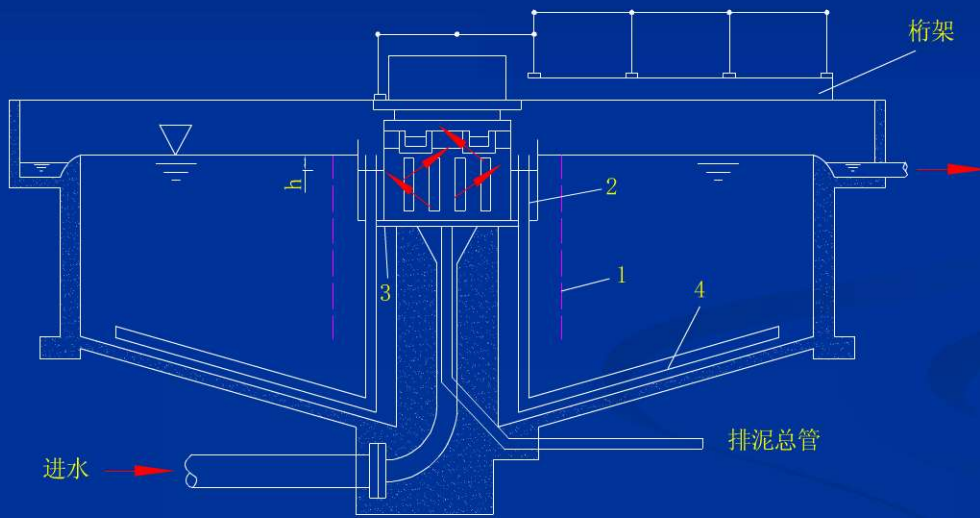


图 7-14 静水压力排泥示意图





辐流式沉渣油给水槽



## 设计参数

1. 沉淀时间  $t$
2. 表面负荷  $q$  ( $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$ )
3.  $Q_{max}$
4.  $H_{有效} \leq 4\text{m}$

## 设计要求

1.  $D/H_{有效} = 6 \sim 12\text{m}$
2. 池底坡度
3. 机械刮泥、静水压力排泥（圆形）  
无机械刮泥、静水压力排泥（正方形）
4. 进、出水有三种布置方式
  - (1) 中心进水，周边出水：辐流式
  - (2) 周边进水，中心出水：向心式
  - (3) 周边进水，周边出水
5. 刮泥机旋转角度： $1 \sim 1.5\text{m}/\text{min}$ （周边线速）
6. 穿孔挡板开孔面积为挡板处池断面面积的 $10 \sim 20\%$

## 设计计算

### 1.每座沉淀池表面积 $A_1$ 与池径 $D$

$$A_1 = \frac{Q_{\max}}{q \times n} (m^2) \quad (7-41)$$

$$D = \sqrt{\frac{4A_1}{\pi}} (m)$$

### 2.有效水深 $h_2$

$$h_2 = q_0 \times t$$

### 3.污泥量 $W$ （与平流式相同）

### 4.污泥区容积

$$V = V_{\text{斗}} + V_{\text{锥}}$$

$$V_{\text{斗}} = \frac{\pi h_5}{3} (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) (m^3) \quad (7-42)$$

$$V_{\text{锥}} = \frac{\pi h_4}{3} (R^2 + Rr_1 + r_1^2) (m^3) \quad (7-43)$$

## 5.总高度 (H) 和周边处的高度 (H')

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5 (m) \quad (7-44)$$

其中： $h_1$ 为超高， $h_2$ 为有效水深， $h_3$ 为缓冲高度层， $h_4$ 为底坡落差， $h_5$ 为污泥斗高度。

$$H' = h_1 + h_2 + h_3 (m)$$

# 4.7 气浮

## 1 基本原理

### (1) 概念

是将水、污染物质和气泡这样一个多相体系中含有的疏水性污染粒子，或者附有表面活性物的亲水性污染粒子，有选择地从废水中吸附到气泡上，以泡沫形式从水中分离去除的一种操作过程。

是一种固—液和液—液分离的方法。

具体过程：通入空气→产生微细气泡→SS附着在气泡上→上浮



## 2、气浮的理论基础

### (1) 水中颗粒与气泡粘附的条件

A、水、气、固三相混合体系中，因不同介质表面因受力不均衡而存在界面张力，气泡与颗粒或絮体一旦接触，由于界面张力存在会产生表面吸附作用。

B、润湿周边：三项间的吸附界面构成的交界线。与润湿接触角有关系。（见下页图）

### C、亲水吸附与疏水吸附

亲水性颗粒润湿接触角小，气粒两相接触面小，浮选体结合不牢，易脱落，此为亲水吸附。

疏水性颗粒的接触角大，浮选体结合牢固，为疏水吸附。



## (2) 气浮分类

A、电解气浮法：有竖流式和平流式装置。

B、散气气浮法：

扩散板曝气气浮：压缩空气通过扩散装置以微小气泡形式进入水中。简单易行，但容易堵塞，气浮效果不高。

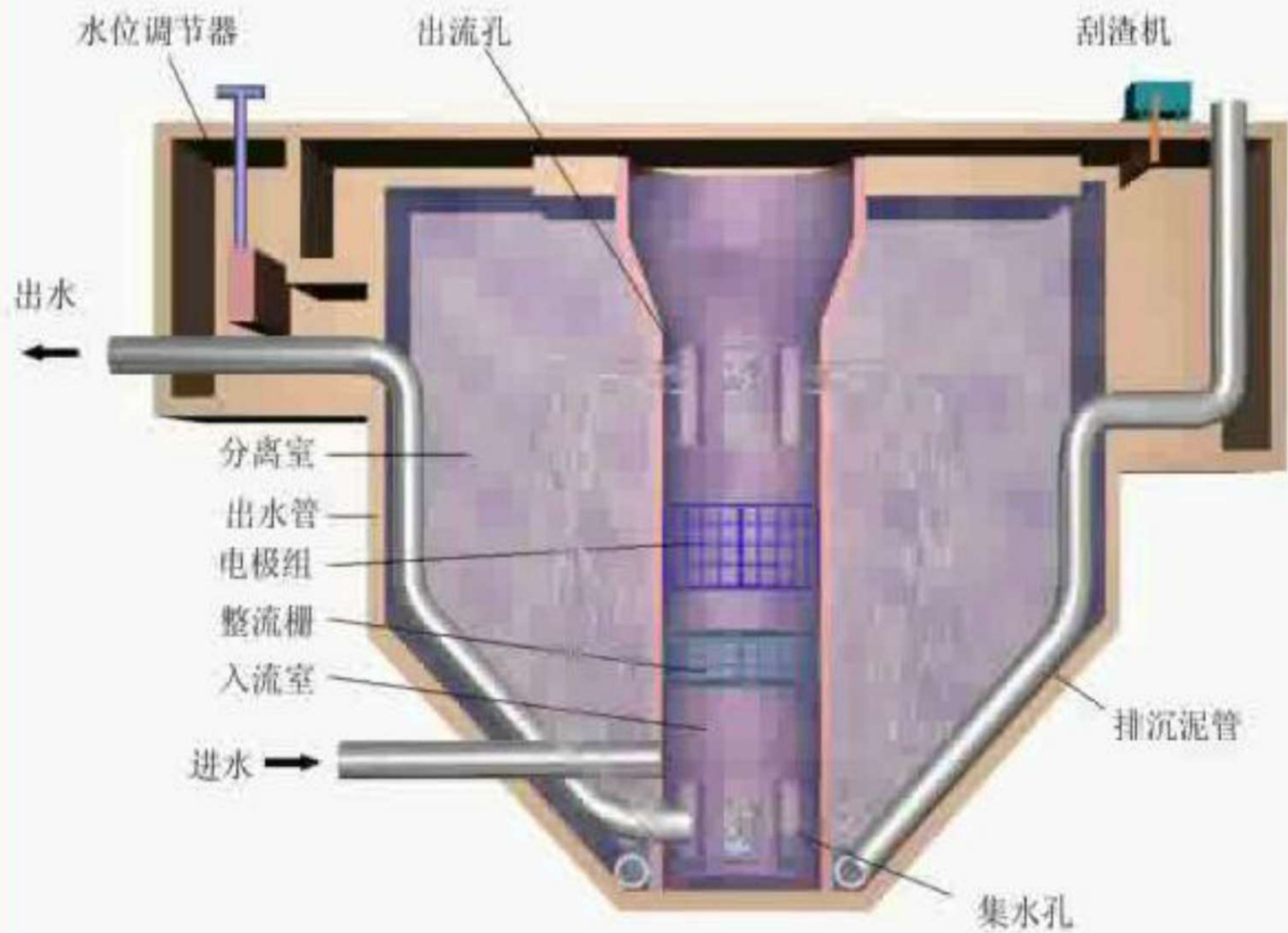
叶轮气浮法：适用于处理水量不大,污染物浓度高的废水。

C、溶气气浮法：

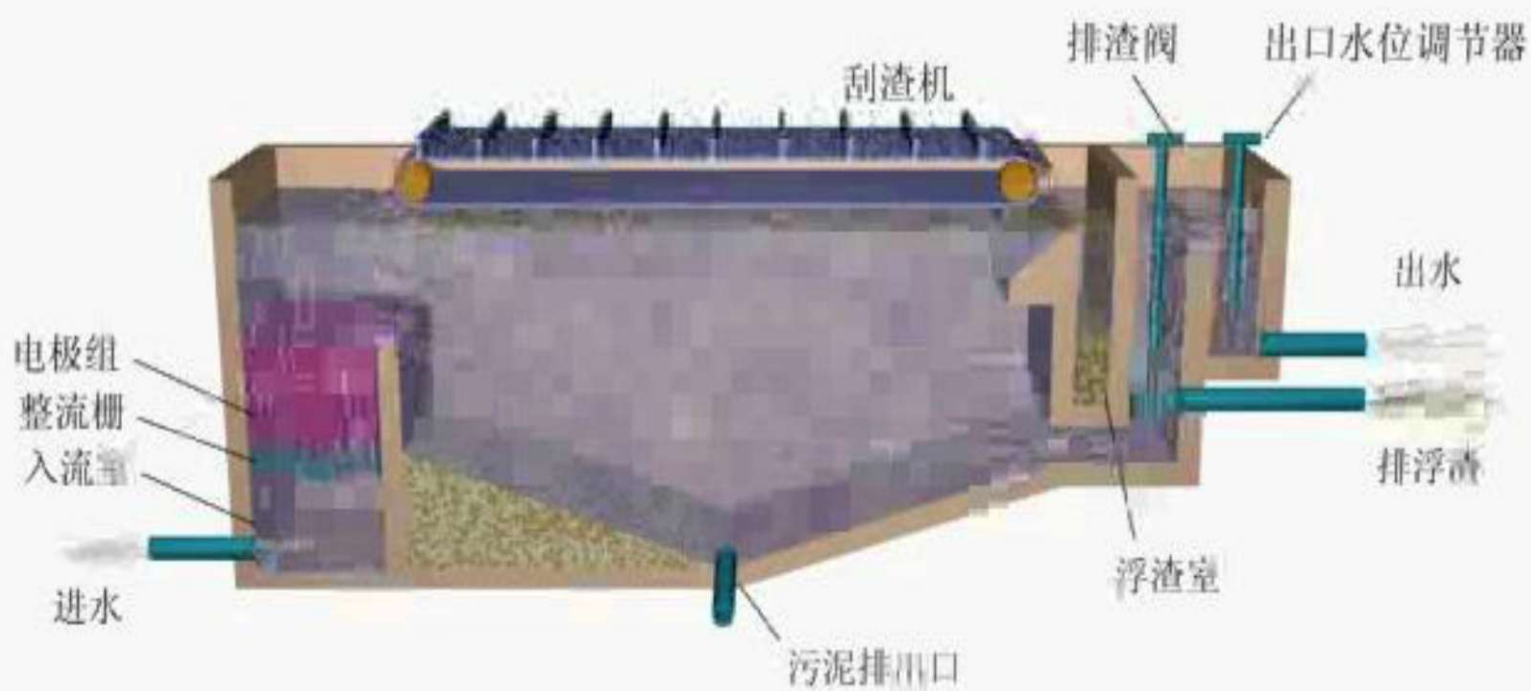
根据气泡析出时所处的压力不同，分为：溶气真空空气浮和加压溶气气浮

D、生化气浮法：

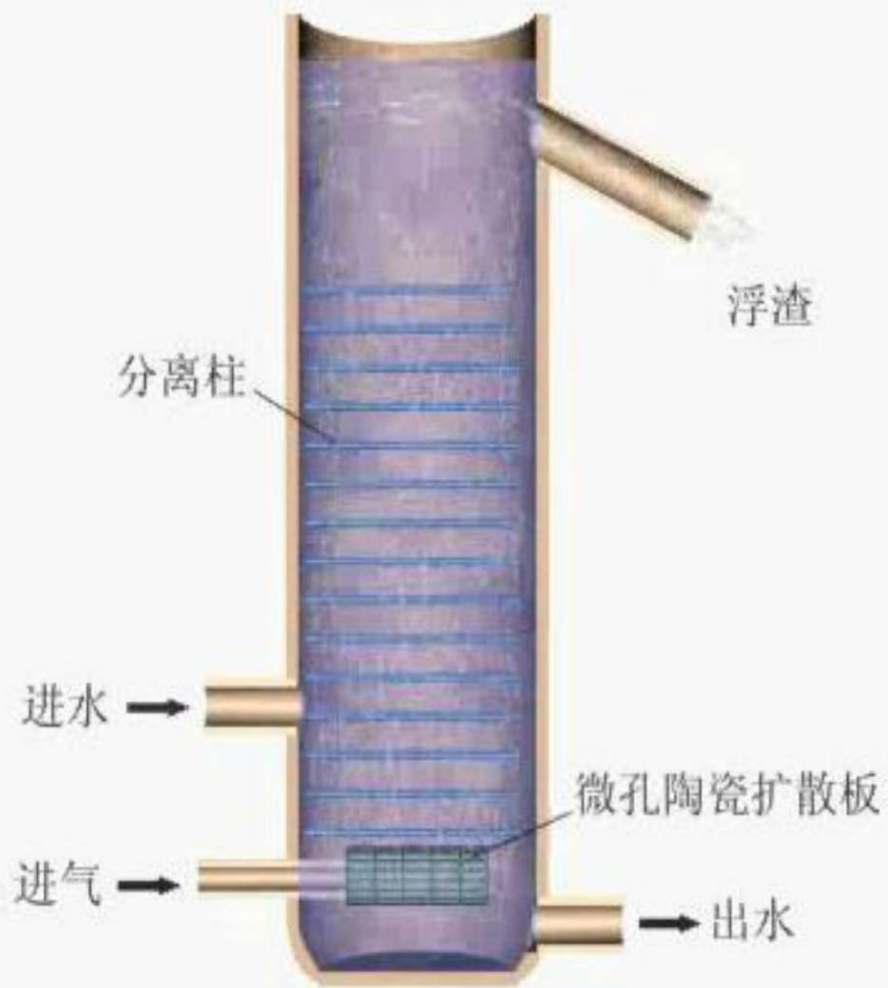
生物产气，化学产气等



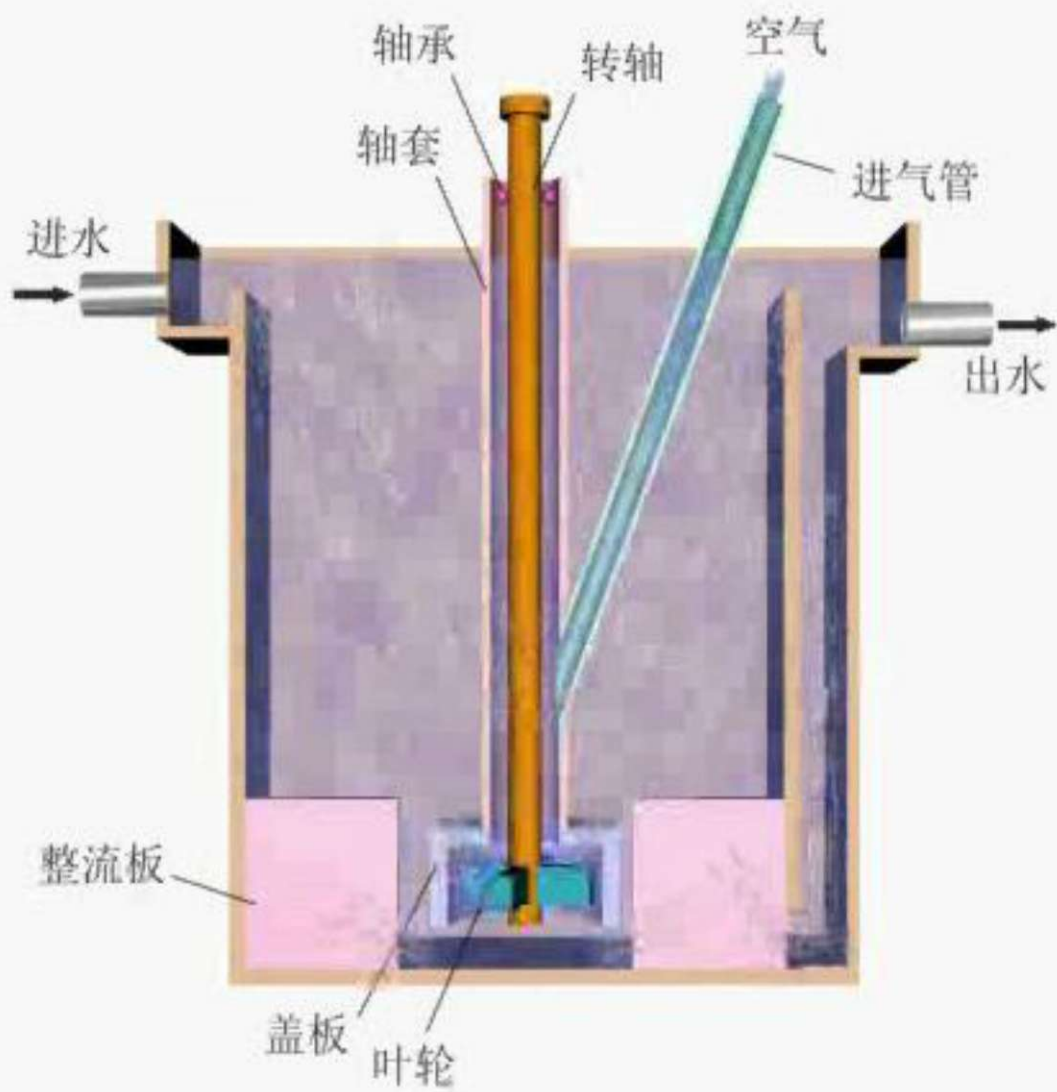
竖流式电解气浮池



双室平流式电解气浮池

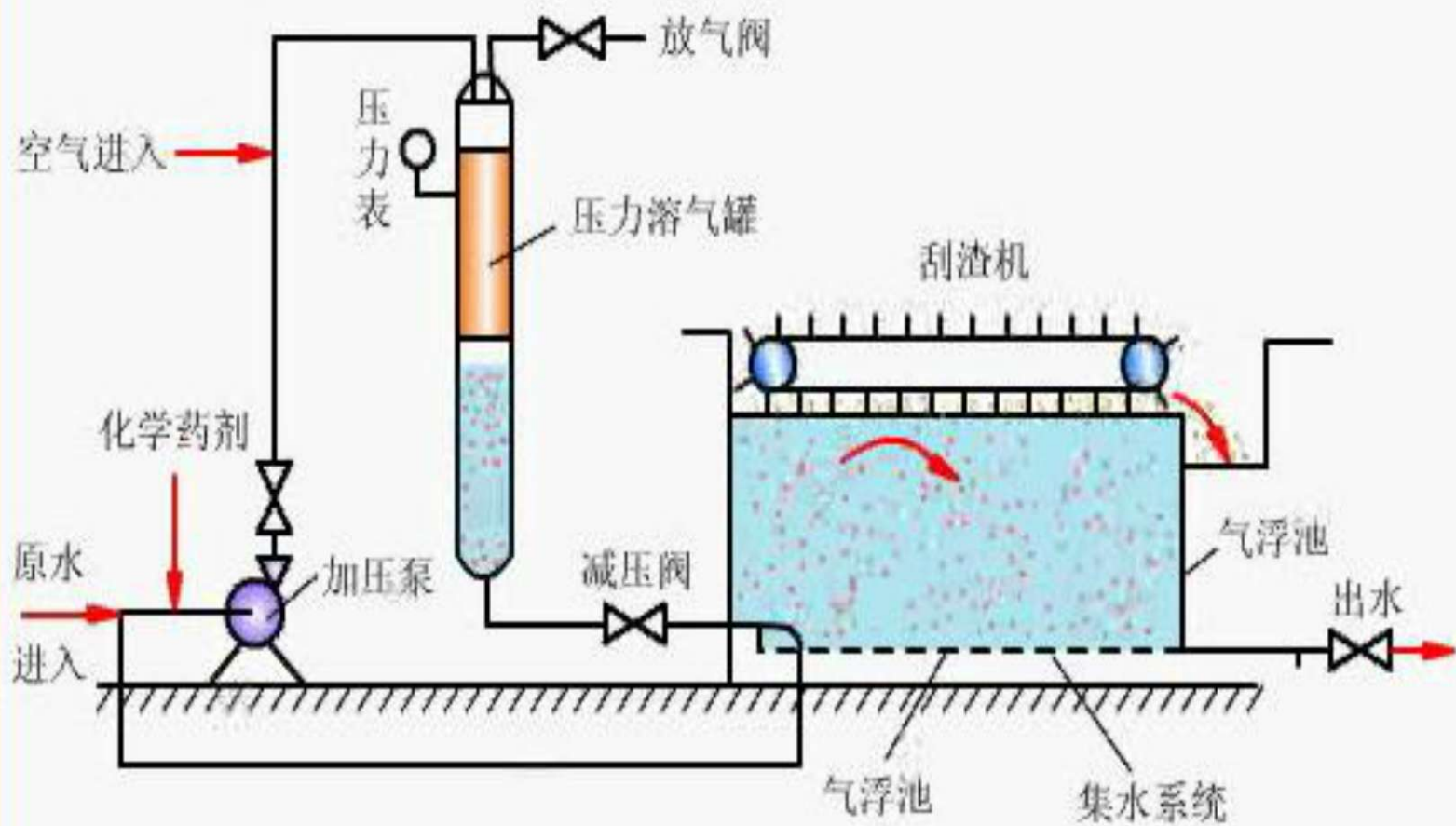


扩散板曝气气浮装置

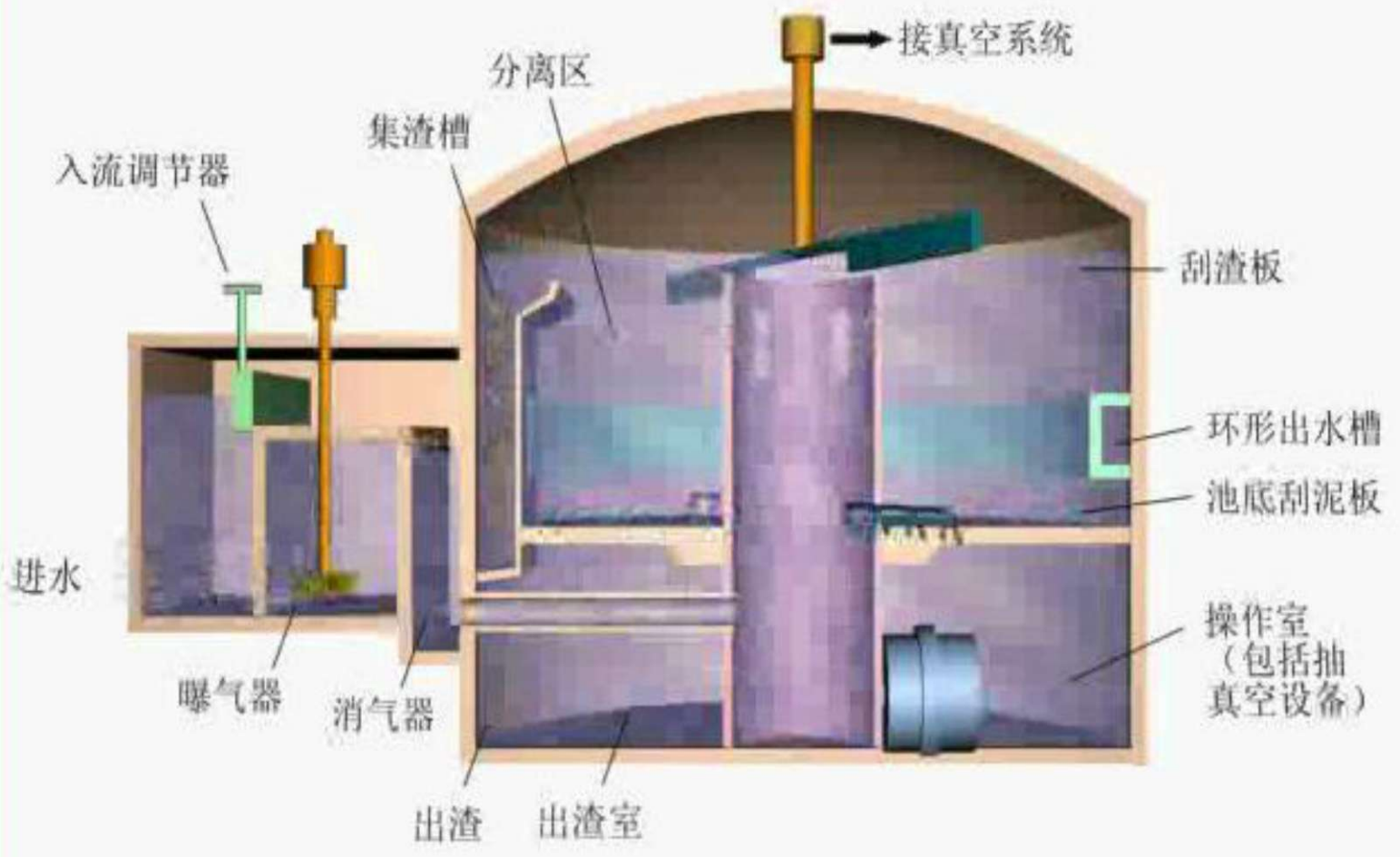


叶轮气浮设备构造

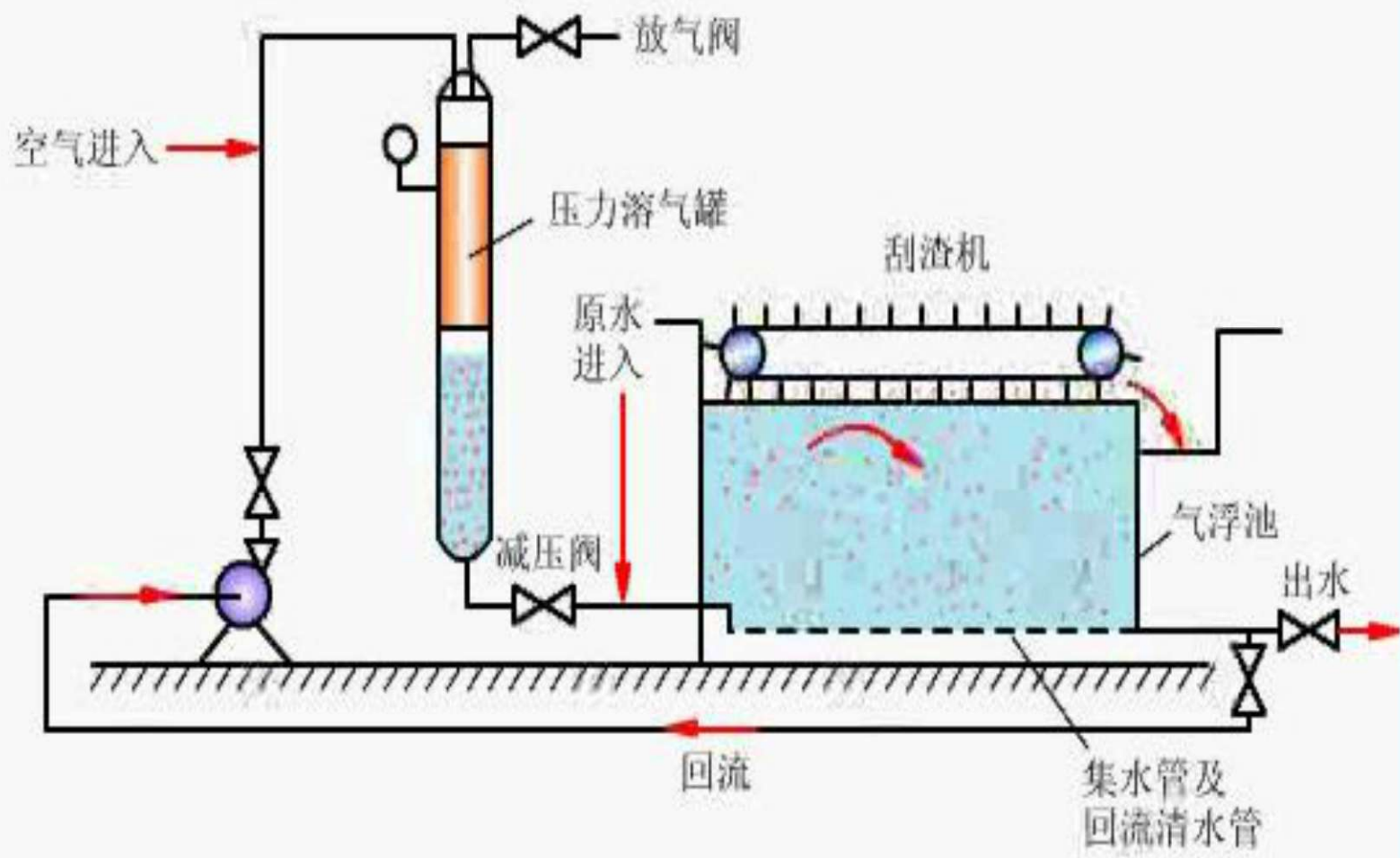




部分溶气气浮工艺流程



真空气浮设备



回流加压溶气气浮工艺流程

### 3.溶气气浮

原理：使空气在一定的压力作用下，溶解于水并到达过饱和状态，再减至常压释放，空气便以微小气泡的形式逸出。

#### A、容气真空气浮

常压空气溶于水，负压析出。

特点：整个气浮池在负压下操作，空气溶解容易，动力设备和电能消耗少。

缺点：所有设备均要密封在气浮池内，构造复杂，生产中使用不多。



## B、 加压溶气气浮

其气浮工艺有三种形式：

- ▲全溶气法：电耗高，但气浮池容积小。
- ▲部分溶气法：省电，溶气罐小。但若溶解空气多，需加大压力
- ▲回流加压溶气法：适用于SS高的原水，但气浮池容积大。

组成：

空气饱和设备、空气释放器、气浮池



## 加压溶气气浮法的特点：

▲加压条件下，空气的溶解度大，能提供足够的微气泡，确保气浮效果。

▲减压释放，产生气泡不仅微细（20-100 $\mu\text{m}$ ），粒径均匀，密集度大，而且上浮稳定，对液体扰动小。

特别适合于疏松絮凝体，细小颗粒的固液分离。

▲工艺设备和流程较为简单，便于管理维护。

▲对回流加压，处理效果显著、稳定，节约能耗。

## B、加压溶气气浮系统的设计

### a、溶气方式：

水泵吸水管吸入，图13-18，简单，但空气量不能太大

水泵压水管射流，图13-19，射流器能量损失大

### b、空气饱和设备（包括加压水泵、溶气罐）

溶气罐：加速空气的溶解，但实际空气很难达到饱和。一般水中的空气含量约为饱和含量的50—80%。应尽量提高溶气效率。

### c、释放设备：将空气以极细小（20—100 $\mu$ ）的气泡释放。

减压阀； 专用释放器 。

### d、气浮分离装置： 平流式，竖流式