

# 《水污染控制工程》

---



沈耀良

Ph.D/Professor

2010-3-10

苏州科技大学

University of Science and technology of Suzhou(USTS)

1

# 《水污染控制工程》

---

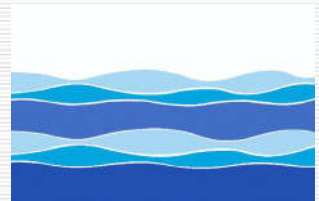
## 第2篇



## 物理、化学及物理化学处理工艺原理

## □ 主要内容

- [3.1](#) 胶体及其稳定性
- [3.2](#) 混凝理论
- [3.3](#) 混凝剂与助凝剂
- [3.4](#) 混凝工艺过程与设备
- [3.5](#) 混凝试验



# 推荐几本参考书

---

- 顾夏声、黄铭荣等编著，《水处理工程》，北京：清华大学出版社，1985年（第一版）
- 许保玖等，当代给水与废水处理原理，北京：高等教育出版社，2000（第二版）
- 张自杰主编，排水工程（下册），第四版，北京：中国建筑工业出版社，2000
- 尹士君编著，水处理构筑物设计与计算，北京：化学工业出版社，2004
- C.P.Leslie Grady,Jr.,et al., Biological Wastewater Treatment, Marcel Dekker, Inc., New York, 1999
- 张自杰主编，废水处理理论与设计，北京：中国建筑工业出版社，2003
- 崔玉川等编，城市污水回用深度处理设施设计计算，北京：化学工业出版社，2003

# 混凝及其处理对象

---

## ■ 混凝

——向被处理水或废水中投加**一定种类、一定数量**的**化学药剂**（混凝剂），并创造**一定的水力**等条件，以使水中污染物**相互凝聚**、**颗粒增大**并与水分离而达到处理目标。

## ■ 处理对象

- 溶解或不溶性胶体颗粒（ $1\text{m}\mu\text{m}\sim 0.1\mu\text{m}$ ）
- 微小的SS
- 其他致浊物质

# 3.1 胶体及其稳定性

---

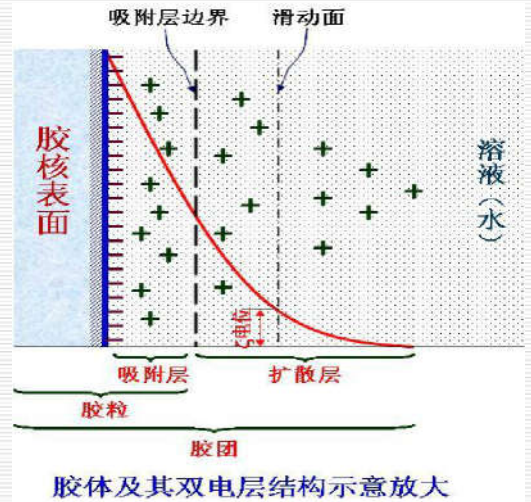
- [3.1.1](#) 胶体颗粒的双电层结构
- [3.1.2](#) 胶体颗粒的 $\zeta$ 电位
- [3.1.3](#) 胶体颗粒间的相互作用
- [3.1.4](#) 胶体颗粒的稳定性



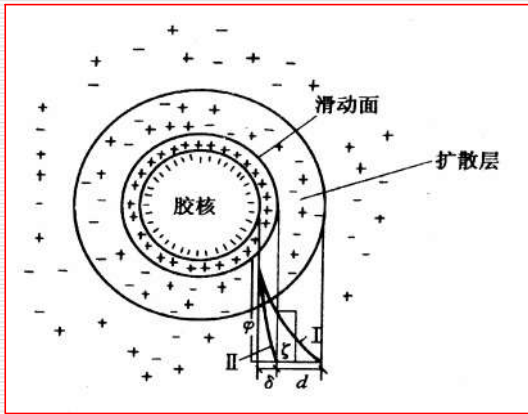
# 3.1.1 胶体颗粒的双电层结构

## 3.1 胶体及其稳定性

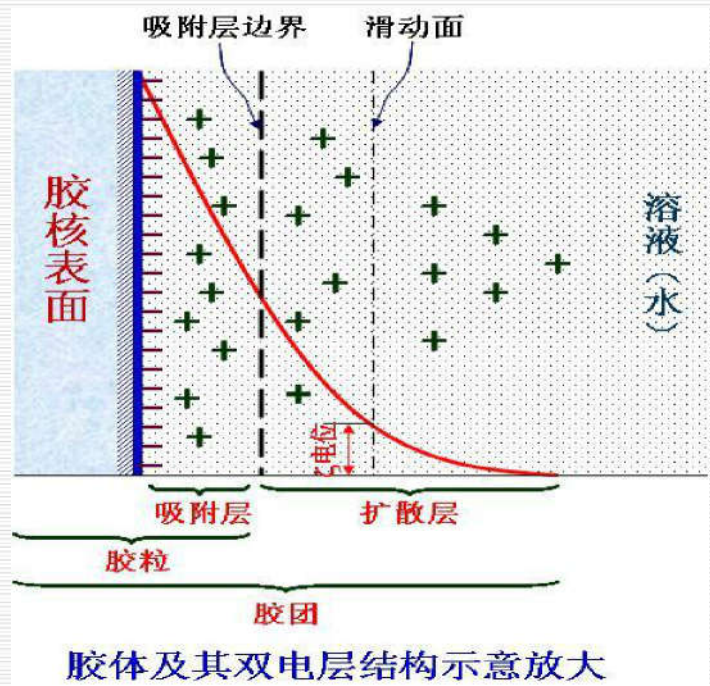
- **胶核**——胶体分子聚合而成的胶体微粒。
- **电位形成离子**——胶核表面吸附的某种离子。
- **反离子**——电位形成离子在静电作用下所吸附的溶液中的异号离子。
- **双电层**——胶体微粒表面所吸附的阴、阳离子层。
- **束缚反离子**——紧附在胶体微粒表面并随其运动的反离子。
- **吸附层**——电位形成离子与束缚反离子所组成的电位层（几个离子或一个分子大小）。
- **自由反离子**——胶体微粒运动时，与其表面脱离而与液体一起运动的反离子。
- **扩散层**——自由反离子构成的离子层。
- **胶粒**——由胶核与吸附层组成。
- **胶团**——由胶粒与扩散层组成。



# 3.1.1 胶体颗粒的双电层结构



胶体及其双电层结构示意图



胶体及其双电层结构示意图放大



# 3.1.1 胶体颗粒的双电层结构



胶体颗粒的结构

## 3.1.2 胶体颗粒的 $\zeta$ 电位

- 胶体颗粒移动时其滑动面上相对于溶液内部的电位差。
- 决定胶体颗粒稳定性的重要指标。
- 计算公式

$$\zeta = \frac{K \pi r \mu}{DE}$$

$K$ ——与胶体颗粒形状有关的常数；球形颗粒为6，棒形颗粒为4。

$r$ ——液体的绝对粘滞系数；

$\mu$ ——相对于液体的颗粒移动速度，cm/s；

$D$ ——液体的介电常数；

$E$ ——电场，V/m。

- 粘土胶体颗粒一般为-15 ~ -40 mV；细菌一般为-30 ~ -70 mV；藻类一般为-10 ~ -15 mV； $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 溶液一般为+56 mV。

# 3.1.3 胶体颗粒间的相互作用

- 静电斥力 (排斥势)

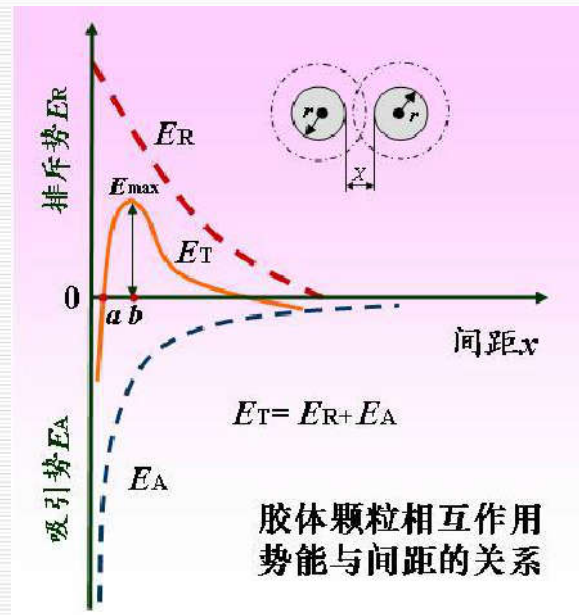
$$E_R = (\epsilon r \varphi_0^2 e^{-kx}) / 2$$

- 范德华引力 (吸引势)

$$E_A = -Ar / (12x)$$

- 势垒

$$E_{\max} = |E_R - E_A|_{x=0b}$$



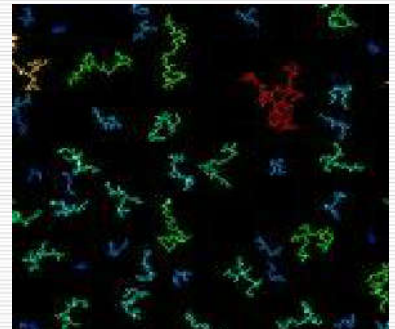
## 3.1.4 胶体颗粒的稳定性

### □ 稳定性

- 胶体颗粒长期地保持分散悬浮状态的特性

### □ 稳定之原因

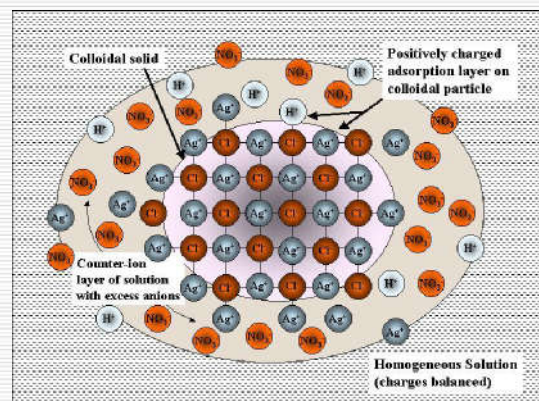
- 布朗运动
- 带电作用
- 溶剂化作用



胶体颗粒的布朗运动

## 3.2 混凝理论

- [3.2.1](#) 关于混凝的几个重要概念
- [3.2.2](#) 混凝机理
- [3.2.3](#) 影响混凝效果的主要因素



#### □ 胶体颗粒的脱稳

- 向水或废水中投及一定种类和浓度的的电解质（混凝剂），降低或消除胶体颗粒的 $\zeta$ 电位，从而使胶体颗粒失去稳定性的过程。

#### □ 凝聚与絮凝

- **凝聚（Coagulation）**——胶体颗粒被压缩双电层而失去稳定性的过程。所需时间短（10~30秒），只需将扩散到全部水中即可。要求强烈而快速混合。
- **絮凝（Flocculation）**——脱稳后的胶体颗粒相互聚集成大颗粒絮体的过程。需要一定时间（20~30分钟），要求控制良好的水力条件。
- **混凝**——包括凝聚和絮凝两个过程。

### □ 凝聚机理

- 双电层压缩机理
- 吸附电中和机理
- 吸附架桥机理
- 沉淀网捕机理

### □ 絮凝机理

- 异向絮凝
- 同向絮凝



### □ DLVO理论:

压缩双电层可降低胶体颗粒间的排斥势。

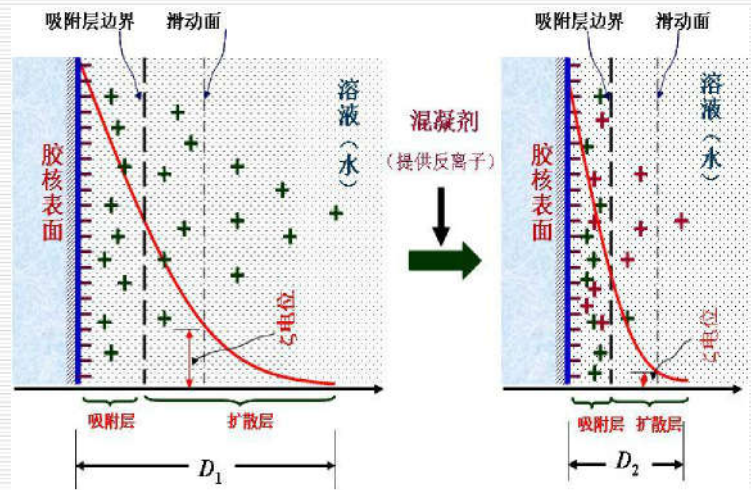
胶体颗粒的双电层可通过提高溶液中反离子的数量而实现。

### □ 叔菜—哈代规则:

起聚沉作用的主要是反离子。反离子价数越高，效率越高。一般与反离子价数的六次方成反比。

### □ 聚沉值:

在一定条件下，使一定量胶体颗粒聚沉所需的反离子的最低浓度。



双电层压缩机理示意

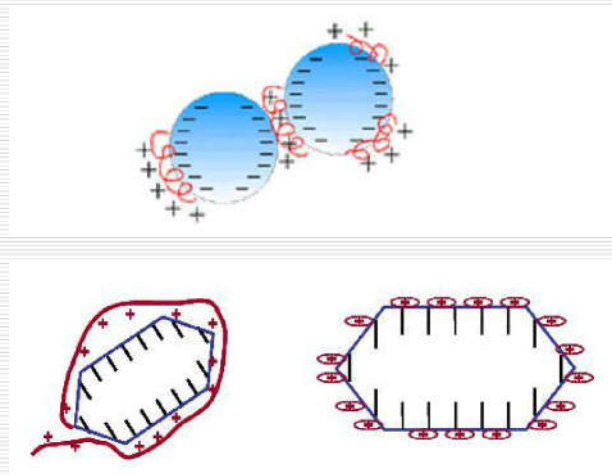


★作用过程：胶体颗粒表面吸附异号离子、异号胶体颗粒和异号（高）分子，由此中和其部分或全部电荷，减小排斥力。

★作用驱动力：静电引力、氢键、配位键及范德华引力等。

★再稳定现象：胶体颗粒吸附高离子而使其电性反号，重新产生斥力而稳定。

再稳定现象  
说明什么问题？

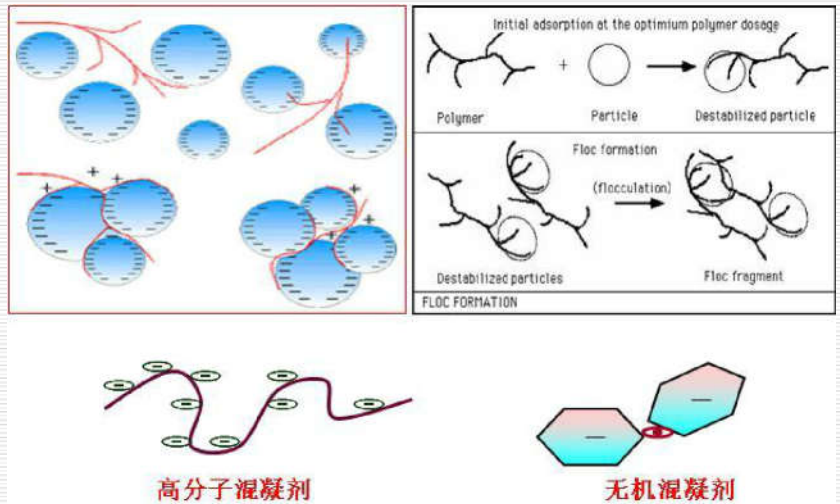


吸附—电中和机理示意

■ 与不带电荷高分子吸附架桥

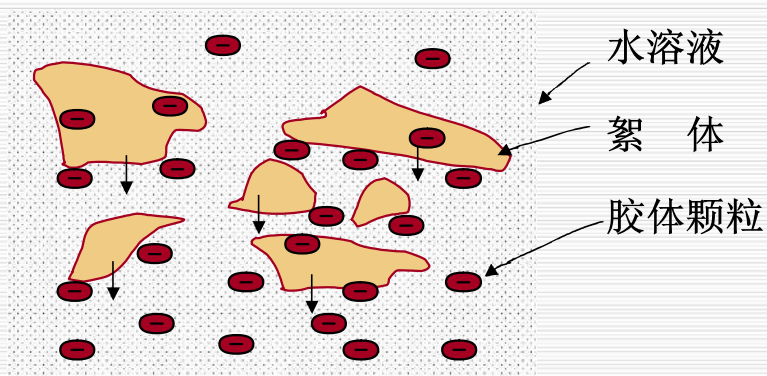
■ 与带异号电荷的高分子吸附架桥

■ 与带同号电荷的高分子物质的吸附架桥



吸附架桥机理示意

当金属盐（如硫酸铝或氯化铁）或金属氧化物和氢氧化物（如石灰）作混凝剂时，当投量大得足以迅速沉淀技术氢氧化物或金属碳酸盐（ $\text{CaCO}_3$ ）时，对水中胶体颗粒的网捕作用。



水中杂质  
有何影响 ?

- 上述四种凝聚机理，在水和废水处理工程中并非独立存在，而往往可能是同时存在，只是在一定条件下以某种机理为主。
- 混凝剂类型不同，所发生的混凝机理有所不同。高分子混凝剂，尤其是有机高分子混凝剂，以吸附架桥作用为主；无机混凝剂（如硫酸铝等）以上机理可能同时具有。

**快速反应！短时完成！**



### □ 絮凝

- 脱稳的胶体颗粒或微小的悬浮颗粒聚集成大颗粒絮体以至达到可沉降（0.6~1.0mm）的过程。
- 需要创造相互碰撞的动力。

### □ 絮凝的动力来源

- 内力作用——由刚脱稳的胶体颗粒提供的布朗运动  
→“**异向絮凝**”（**perikinetic flocculation**）。
- 外力作用——通过水力或机械作用产生水流运动  
→“**同向絮凝**”（**orthokinetic flocculation**）。

### □ 异向絮凝 (次要, 基本可忽略!)

- 因布朗运动的无规则性, 使各脱稳胶体颗粒在不同方向运动而发生相互碰撞。
- 颗粒因碰撞结合而使其由小变大, 布朗运动将逐渐消失。

### □ 同向絮凝 (主要)

- 主要的絮凝机理。在水力及机械等外力作用下, 产生具有同向流动的水流运动及其产生的流速差而产生的颗粒间相互碰撞结合的过程。

**慢速过程! 需较长时间!**

## 3.2.3 影响混凝效果的主要因素

### □ 客观因素

- 处理对象（原水）所具有的特性
- 水温、pH值、杂质类型及数量等

### □ 主观因素

- 可以通过人为改变（工艺设计）的一些运行条件
- 混凝药剂（种类及数量）、投加方式、水力条件等

- 混凝剂的水解为吸热过程，低温不利于混凝剂水解（水温每降 $10^{\circ}\text{C}$ ，水解速度将降低2~4倍）；
- 水温低→水粘滞度高→不利于脱稳颗粒的絮凝。
- 水温低→胶体颗粒布朗运动减弱→不利于“异向絮凝”
- 水温过高→絮体水合作用增强、松散不易沉降

**适宜温度在 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$ 之间！**



- 水的pH不同→胶体颗粒表面电荷电位不同  
→所需混凝剂投量不同
- 不同混凝剂水解反应对最佳pH要求不同
  - 去除浊度：硫酸铝6.5~7.5；三氯化铁6.0~8.5；  
硫酸亚铁 $\geq 8.5$ ；高分子混凝剂5~9
  - 去除色度：硫酸铝4.5~5.5；三氯化铁3.5~5.0；  
硫酸亚铁 $\geq 8.5$ ；

- 混凝剂的水解将降低pH。
- 需根据处理要求、混凝剂类型预先调节pH，提供足够的碱度。
- 水解所需碱度[CaO, mg/L]

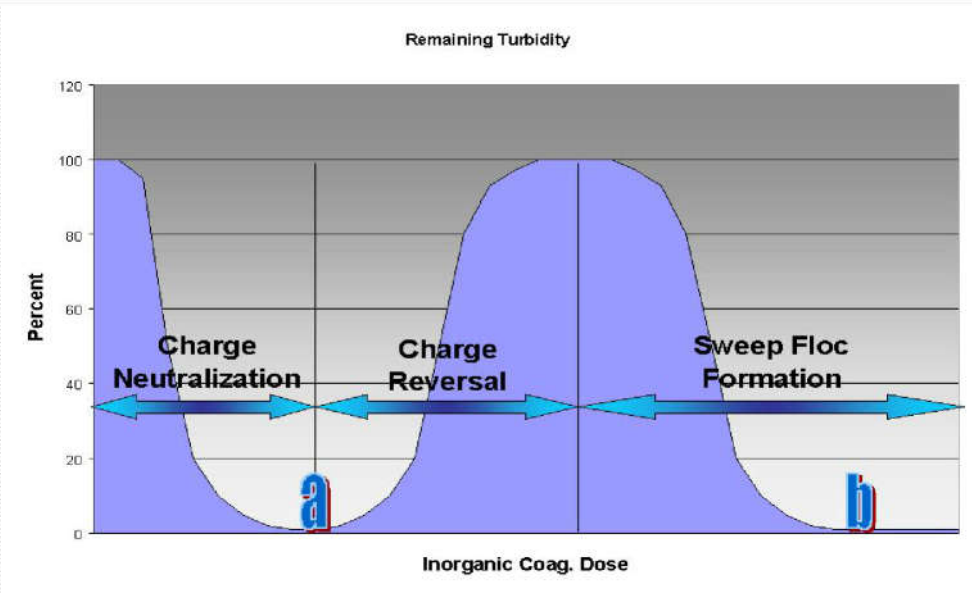
$$[\text{CaO}] = 0.5a + 28x + b$$

$a$ —混凝剂投量 (mg/L) ;

$b$ —余量 (mg/L) ;

$x$ —原水碱度 (mg/L) 。

- 水中存在二价及其以上的正离子，利于双电层压缩
- 水中存在较多粘土，可降低混凝剂用量
- 水中存在较多有机物时，将增加混凝剂用量
- 水中杂质越单一、尺寸越均匀、颗粒越细小，越不利于混凝效果
- 杂质浓度过低，不利于颗粒间接触而影响混凝效果



混凝剂投量对混凝效果的影响

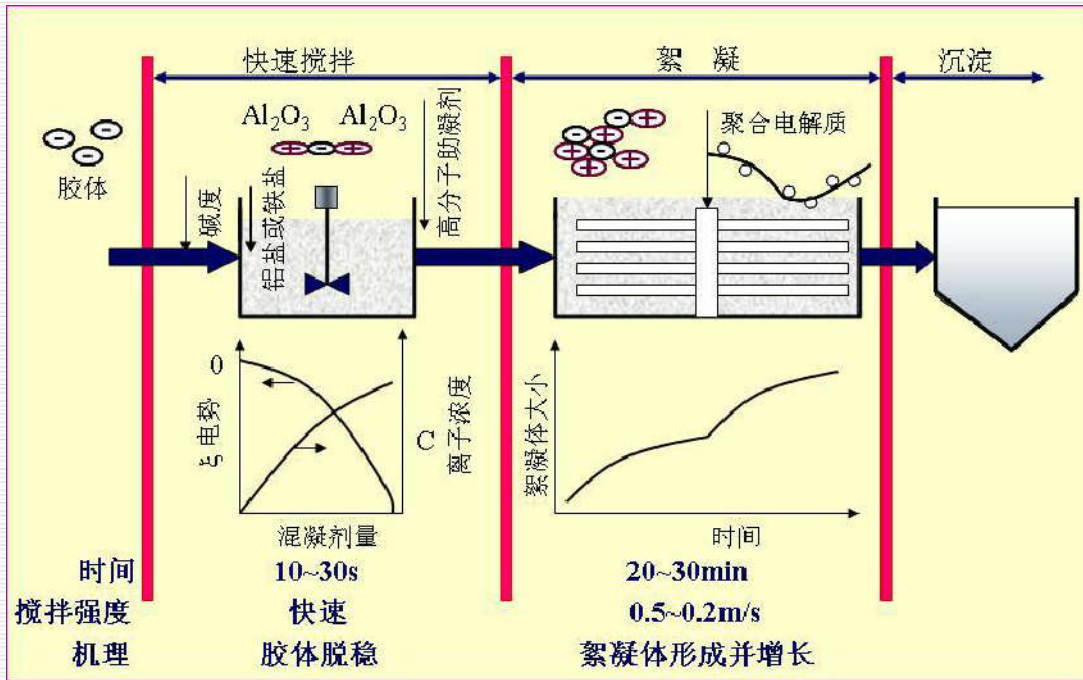
要求兼顾成本、效果、处理  
确定最佳投量！

### □ 凝聚对水力条件的要求

- 作用是压缩双电层，使胶体颗粒脱稳（快速过程）
- 在短时间（10~30秒）内实现强烈、快速、均匀混合

### □ 絮凝对水力条件的要求

- 作用是在一定时间内（20~30min）使脱稳胶体颗粒相互接触、聚合长大至（0.6~1.0 mm）发生自然沉淀（慢速过程）。
- 要求有适当的水流条件（由强至弱逐渐过渡，水流速度0.5~0.6m/s向0.15~0.2m/s逐级降低）
- 平均速度梯度（G，控制指标）一般为10~100s<sup>-1</sup>，GT值一般为10<sup>4</sup>~10<sup>5</sup>



所  
需  
的  
水  
力  
条  
件  
混  
凝  
的  
不  
同  
阶  
段

## 3.3 混凝剂及助凝剂

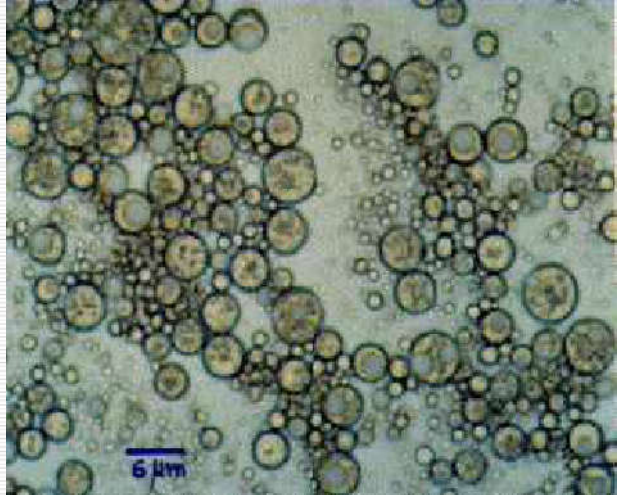
---

### □ 3.3.1 混凝剂

- 混凝剂的作用
- 混凝剂的水解
- 混凝剂的种类
- 混凝剂的主要特性

### □ 3.3.2 助凝剂

- 助凝剂的作用
- 助凝剂的种类



#### □ 混凝剂的作用

- 向被处理水中提供满足处理要求的电解质胶体颗粒，以通过双电层压缩、吸附架桥等作用，降低水中胶体颗粒的 $\zeta$ 电位而使其脱稳。
- 提供带有与水中胶体颗粒相反的电荷的络合物。
- 通过水解途径实现。

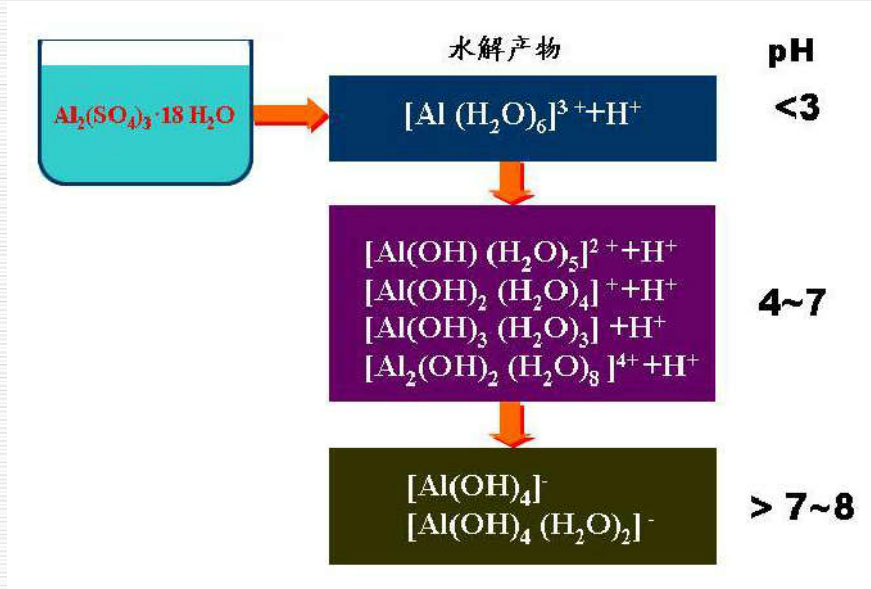


# 3.3.1 混凝剂

## 3.3 混凝剂及助凝剂

### □ 混凝剂的水解

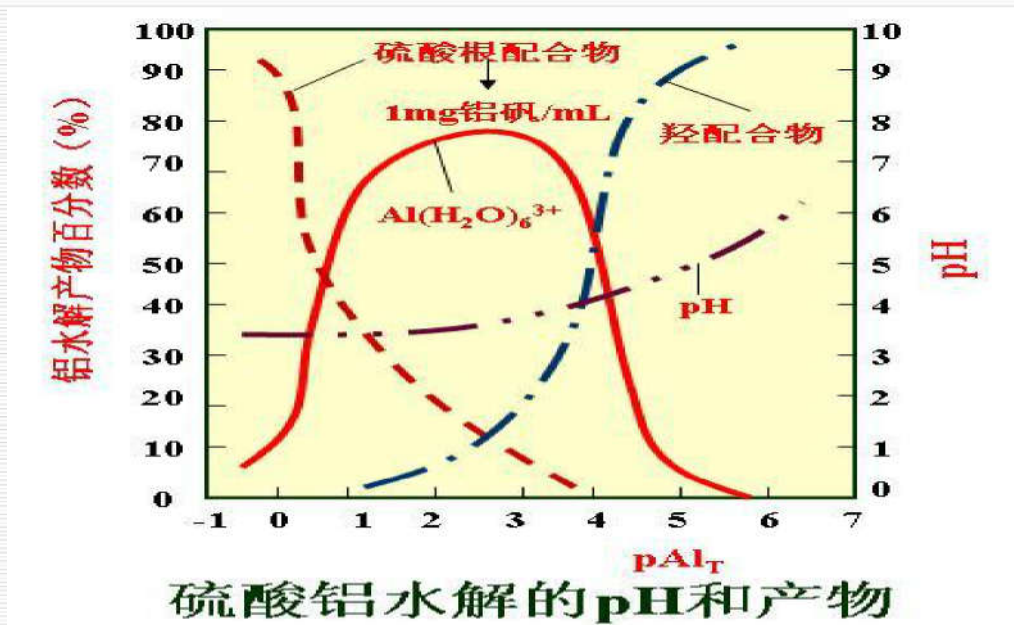
以  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$  为例



### 3.3.1 混凝剂

### 3.3 混凝剂及助凝剂

#### □ $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ 的水解产物



### □ 混凝剂的类型

#### ■ 无机盐类



## 3.3.1 混凝剂

### □ 混凝剂的类型

#### ■ 有机高分子类

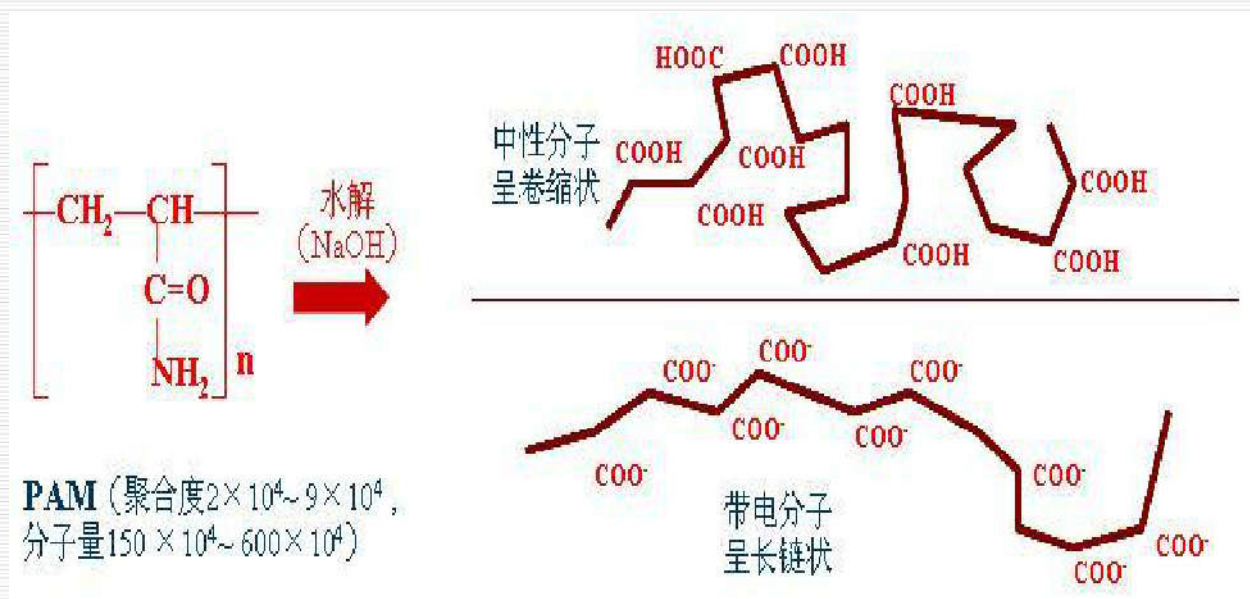
人工合成	{	阴离子型	聚丙烯酸钠
		阳离子型	聚乙烯吡烯盐
		非离子型	聚丙烯酰胺 (PAM)

天然高分子物质 淀粉、树胶、动物胶等



# 3.3.1 混凝剂

## 3.3 混凝剂及助凝剂



### 人工合成有机高分子类混凝剂

## 3.3.1 混凝剂

## 3.3 混凝剂及助凝剂

### □ 混凝剂的主要特性

常用混凝剂的主要特性

名称	主要应用特性	投加方式和浓度
硫酸铝	适宜pH4~8, 适宜温度20~40℃。腐蚀性小, 使用方便, 价格较便宜。水解反应慢, 需消耗一定量的碱度。	干、湿投均可。配制浓度: 10~20%
聚合氯化铝	适宜pH5~9, 受温度影响小。腐蚀性小、效率高、絮体大而重、沉淀快。使用方便, 应用广。	干、湿投均可。配制浓度: 5~10%
硫酸亚铁	适宜pH9~11, 受温度影响小。絮体大而重、沉淀快。使用方便, 应用广, 但脱色效果较差。	干、湿投均可。配制浓度: 5~10%
聚合硫酸铁	适宜pH5~11, 受温度影响小。絮体大而重、沉淀快, 脱色效果较好。需消耗较多的碱。	干、湿投均可。配制浓度: 5~10%
PAM	适宜各类水, 水解时间长, 常作助凝剂使用, 微有毒性, 不易溶解。	湿投。配制浓度: 0.1%

#### □ 助凝剂的主要作用

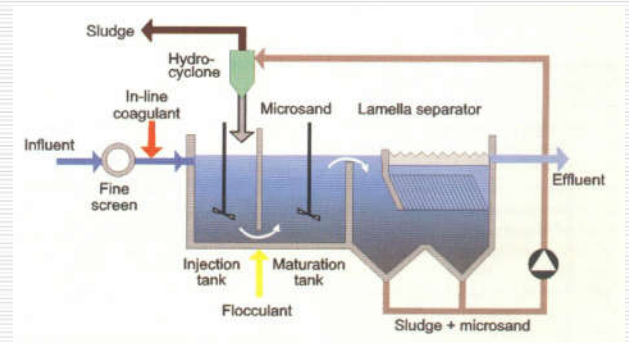
- 本身可起混凝作用，也可不起混凝作用。
- 促进产生大而结实的絮凝体（矾花）。

#### □ 助凝剂的种类

- **酸、碱类**：用于调整水的pH。如硫酸、烧碱、石灰等）；
- **绒粒核心类**：用作矾花的骨架材料，改善絮体的结构，促进絮体的沉淀。如PAM、活化硅胶、粘土、海藻酸钠等；
- **氧化剂类**：破坏对混凝有干涉作用的有机物等。如氯、臭氧等。

## 3.4 混凝工艺过程与设备

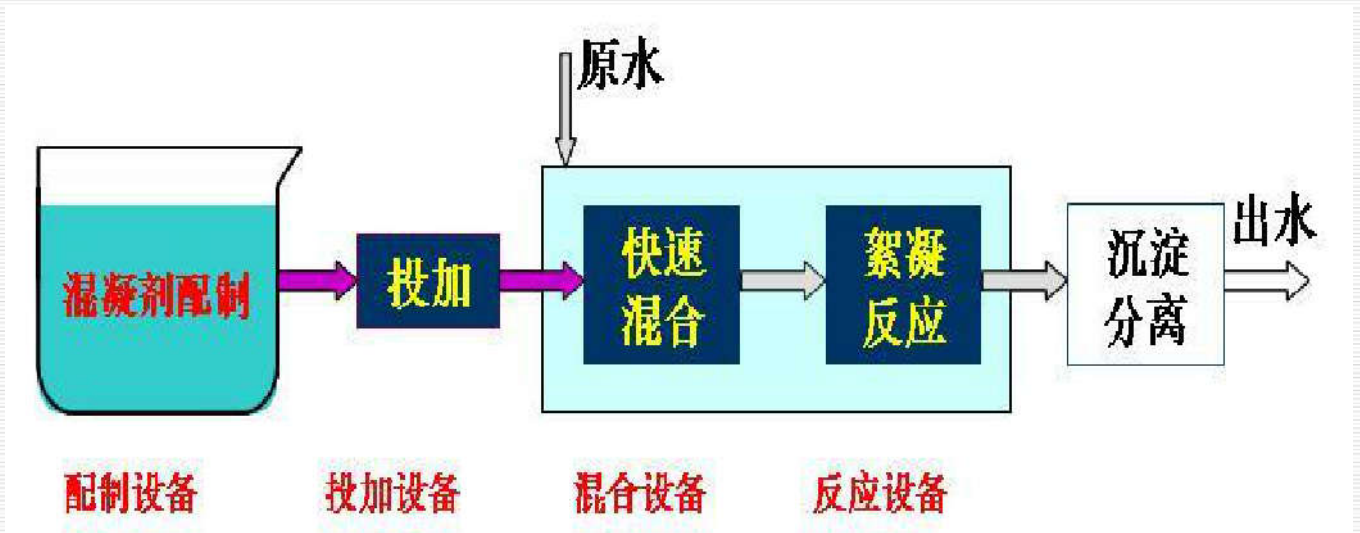
- 3.4.1 混凝过程及控制指标
- 3.4.2 混凝工艺系统
- 3.4.3 混凝剂的投配设备
- 3.4.4 混合设备
- 3.4.5 反应设备





## 3.4.1 混凝过程及控制指标

### □ 混凝过程



## 3.4.1 混凝过程及控制指标

### □ 控制指标

■ 反应时间 ( $T$ )

■ 搅拌强度 ( $G$ )

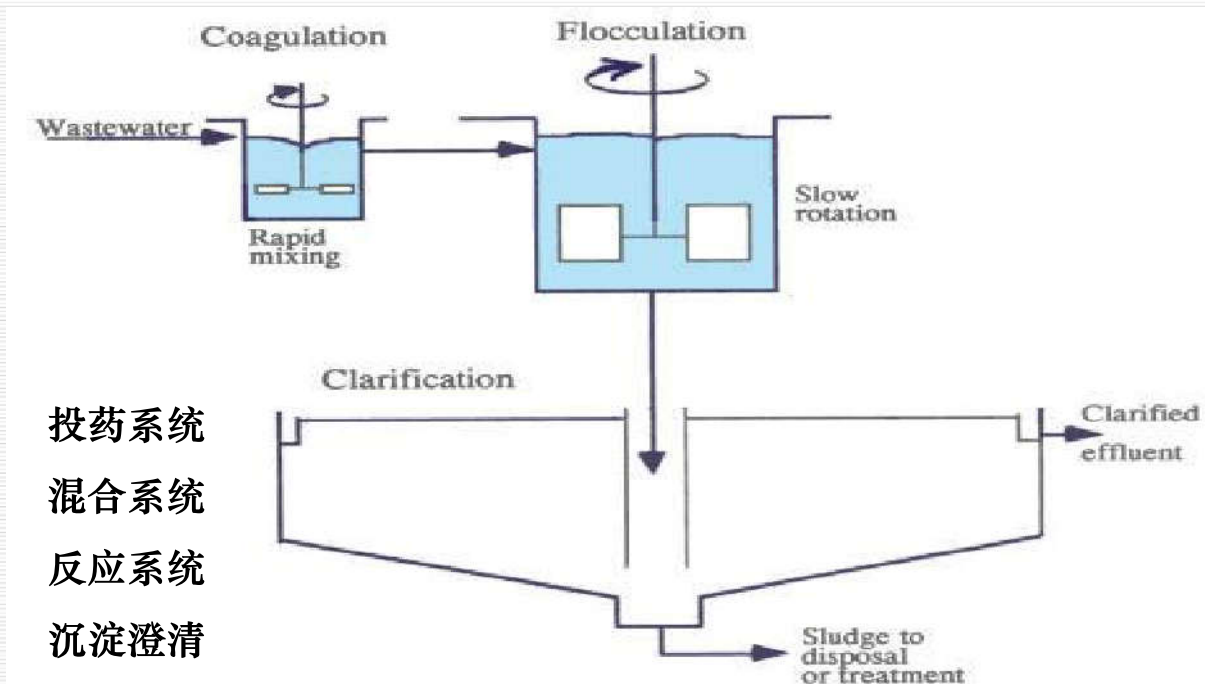
▼ 速度梯度 (甘布公式) :  $G = \Delta u / \Delta z = (gh / \nu T)^{1/2}$

▼ 平均 $GT$ 值



## 3.4.2 混凝工艺系统

### 3.4 混凝工艺过程与设备

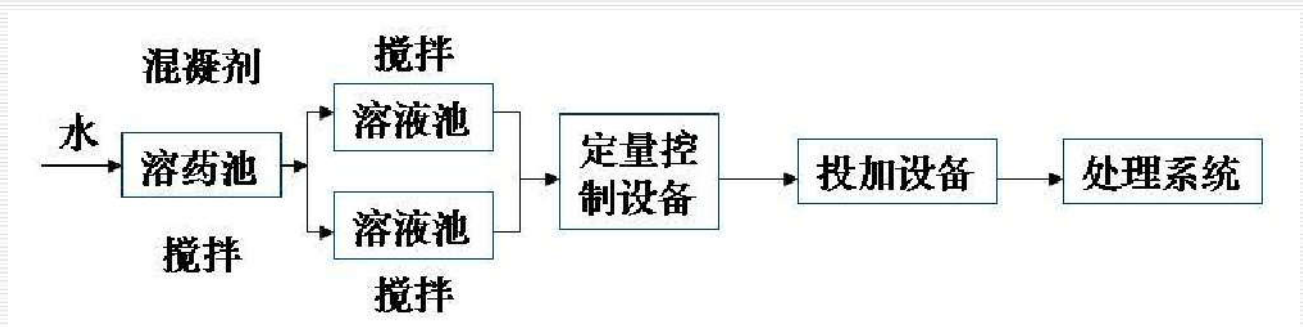


## 3.4.3 混凝剂的投配设备

### □ 投配方法

- 干式投加
- 湿式投加（常用）

### □ 湿式投配系统



## 3.4.3 混凝剂的投配设备

#### □ 溶药池容积 ( $W_1$ )

$$W_1 = (0.2 \sim 0.3)W \quad (\text{m}^3)$$

#### □ 溶液池容积 ( $W$ )

$$W = \frac{24 \times 100aQ}{1000 \times 1000 \times bn} = \frac{aQ}{417bn} \quad (\text{m}^3)$$

式中:  $a$ —混凝剂的最大投量 (mg/L);

$Q$ —处理水量 ( $\text{m}^3/\text{h}$ );

$b$ —所配溶液浓度 (一般为10%~20%);

$n$ —每昼夜配制溶液的次数 (一般为2~6次, 手工操作时不多于3次)

## 3.4.3 混凝剂的投配设备

### □ 计量设备

- 转子流量计
- 电磁流量计
- 浮球恒位水箱（孔口计量）
- 计量泵

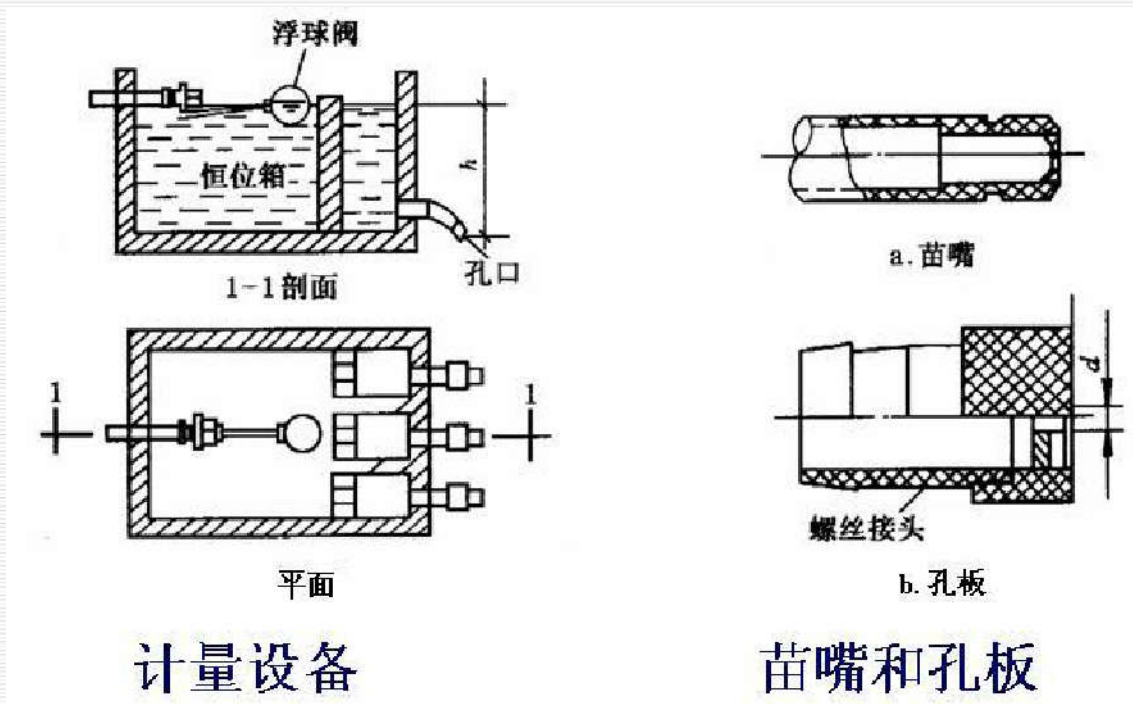
### □ 投加设备

- 水射器投加系统
- 泵前重力投加
- 泵投加



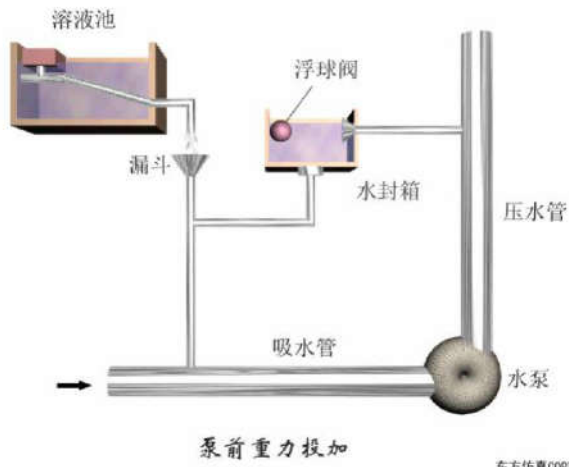
### 3.4.3 混凝剂的投配设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备



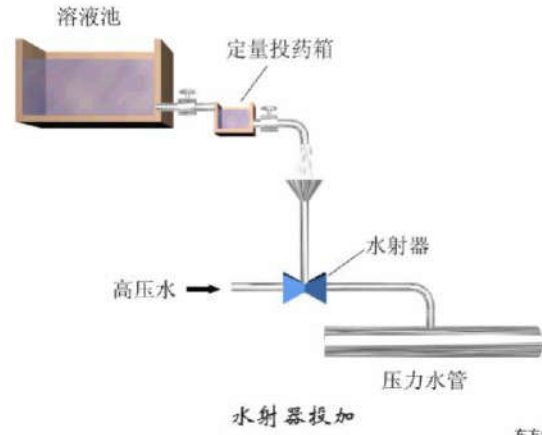
# 3.4.3 混凝剂的投配设备

## 3.4 混凝工艺过程与设备



**泵前重力投加**

- 1—吸水管 2—出水管 3—水泵 4—水封箱  
5—浮球阀 6—溶液池 7—漏斗管



**水射器投加**

- 1—溶液池 2—阀门 3—投药箱 4—阀门  
5—漏斗 6—高压水管 7—水射器 8—原水

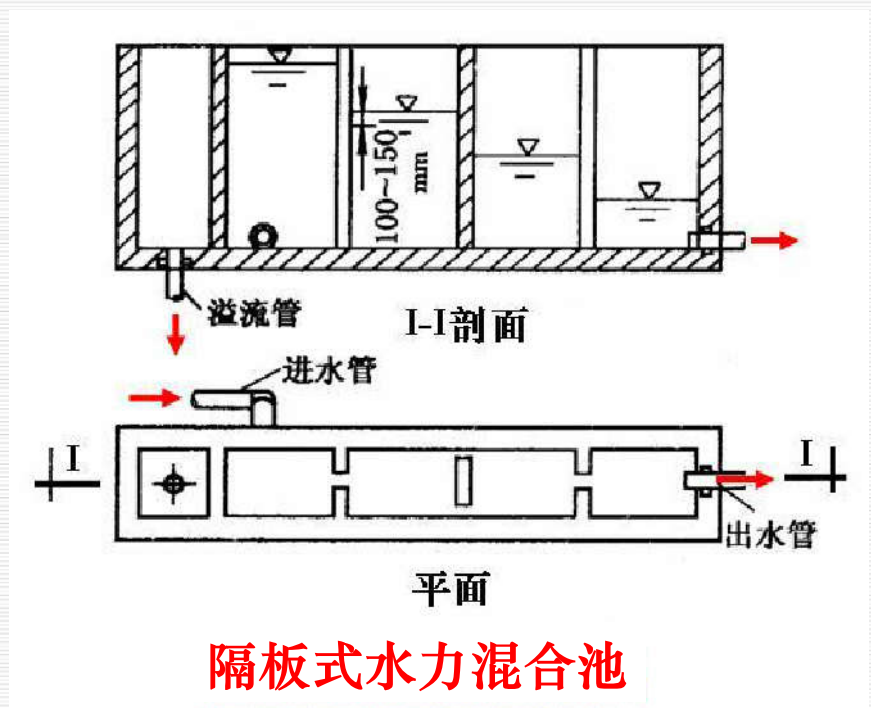
### 投加设备



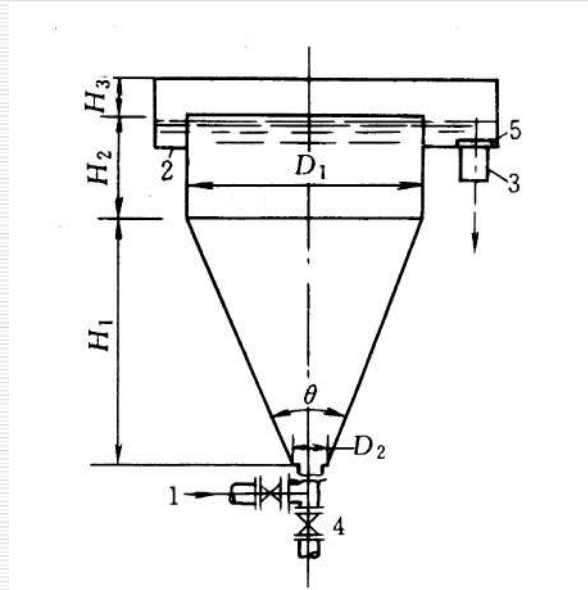
## 3.4.4 混合设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备

- 水泵混合
- 水力混合
- 机械混合
- 管道混合



## 3.4.4 混合设备

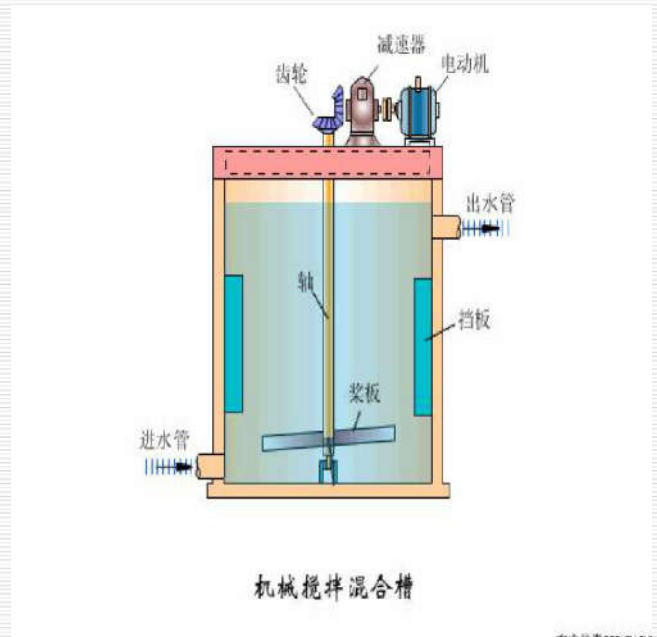
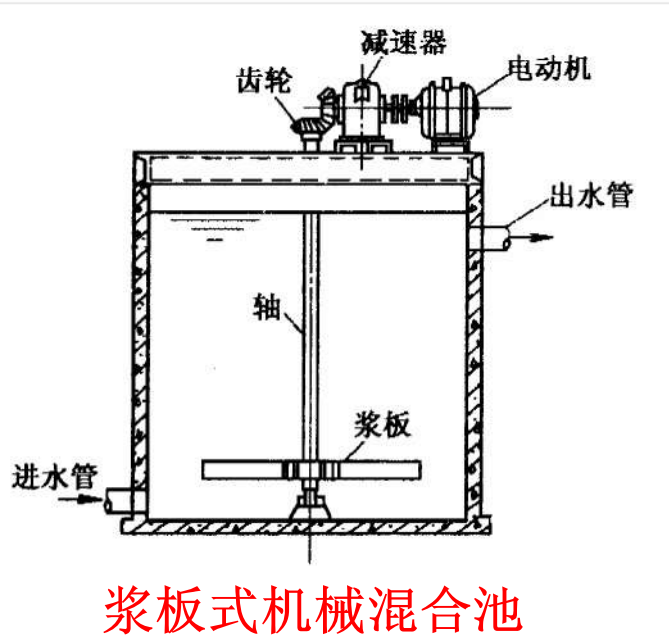


### 涡流水力混合

1—进水管 2—周边集水槽 3—出水管 4—放水阀 5—格栅

## 3.4.4 混合设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备



# 3.4.4 混合设备

## 3.4 混凝工艺过程与设备




**Liquid Polymer Blend and Feed System**

- Complete package
- High degree of mixing/activation of a variety of liquid polymers
- All PVC construction
- Fourteen stage transparent static mixer body
- Rotameter style dilution water flow meter coupled with a brass globe valve
- Provides 1/4 to 2% final make down solution

A great liquid polymer feeder value. Mate your own polymer feed pump to this unit, hook up your dilution water and maximize your polymer performance at a price you can't afford to overlook. This mixing technology is simple, reliable and consistent.

FLOWMETER	STOCK #	EACH
0.2 TO 2.0 GPM	11473	\$ 810.30
0.5 TO 5.0 GPM	11475	610.30
1.0 TO 10.0 GPM	11477	610.30



**Static Mixers – Sch. 40 & Sch. 80 PVC**

A simple, inexpensive way to disperse chlorine, alum, polymers, and other chemicals into your water stream. Inlet and outlet are NPT(M). Use the formula below to determine the number of elements best suited for your application. (We recommend using Sch. 80 mixers for most chemical feed applications to correspond with existing pipe.)

$$\frac{3157 \times \text{Flow rate (gpm)}}{\text{Pipe Diameter}} = \text{Elements required}^*$$

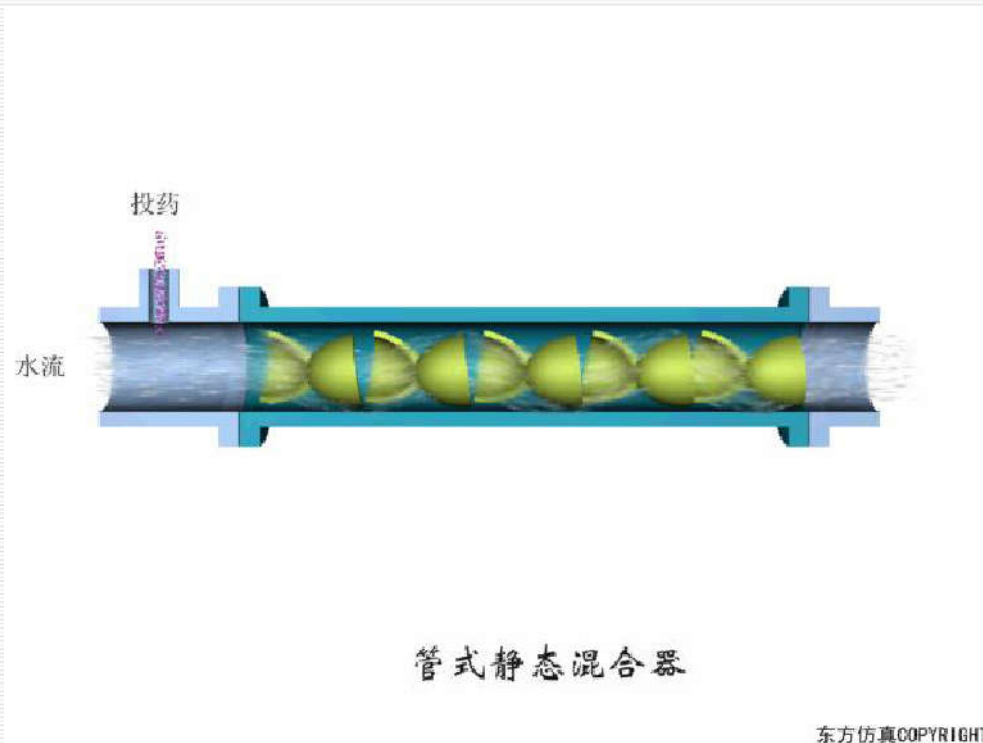
*\*If number is greater than 1,000, use 6 elements.  
If number is 500-1,000, use 12 elements.*

### 静态管道混合器

投药点一般为距反应池小于50倍管径处

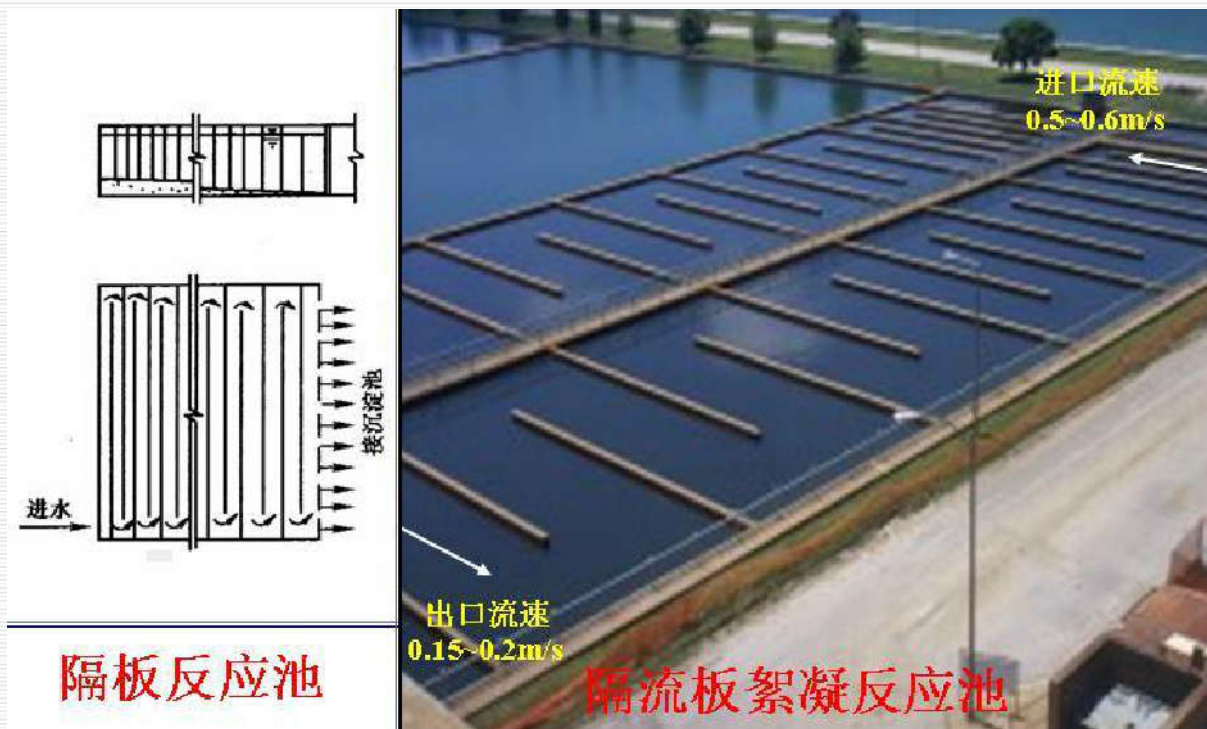
## 3.4.4 混合设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备



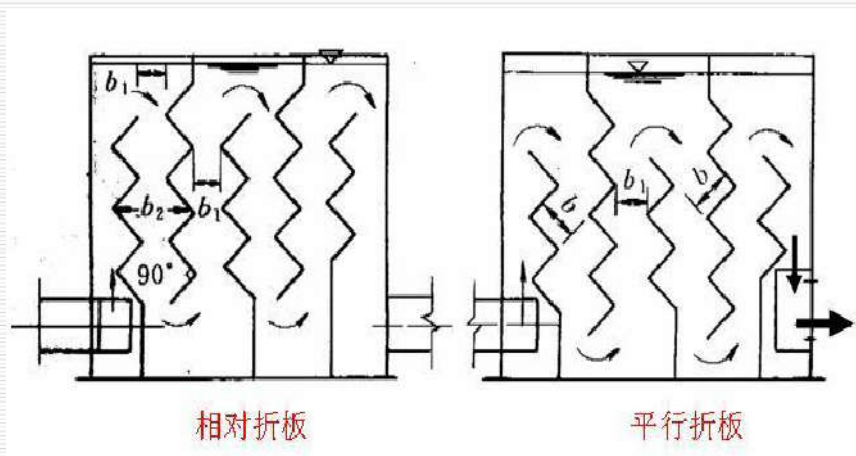
## 3.4.5 反应设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备



## 3.4.5 反应设备

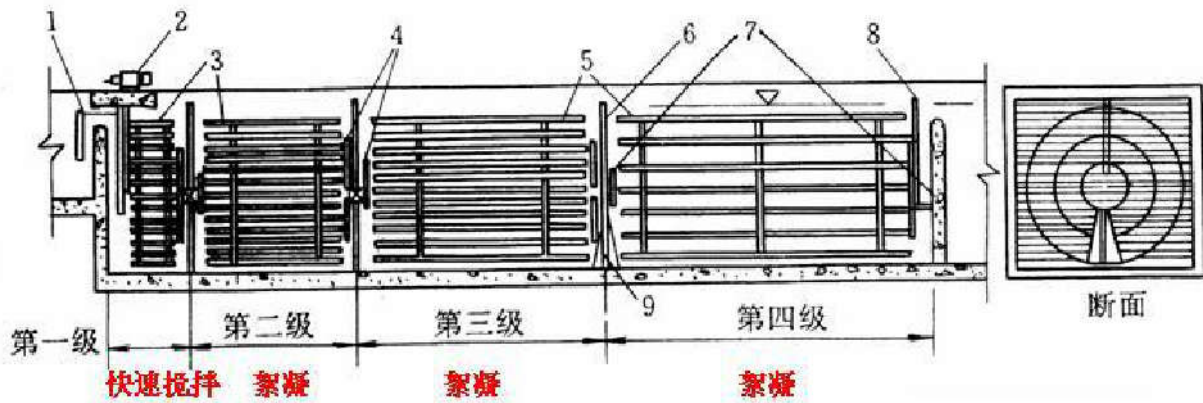
### 3.4 混凝工艺过程与设备



折板折流反应池



## 3.4.5 反应设备



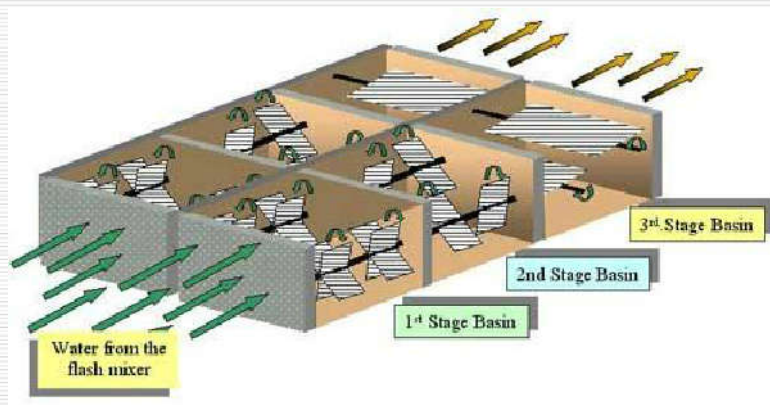
### 水平轴四级浆板机械搅拌絮凝反应池

1—进水口 2—电机 3、5—浆板 4—圆形挡板  
6—挡板 7、8—出水口 9—混凝土轴座



## 3.4.5 反应设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备



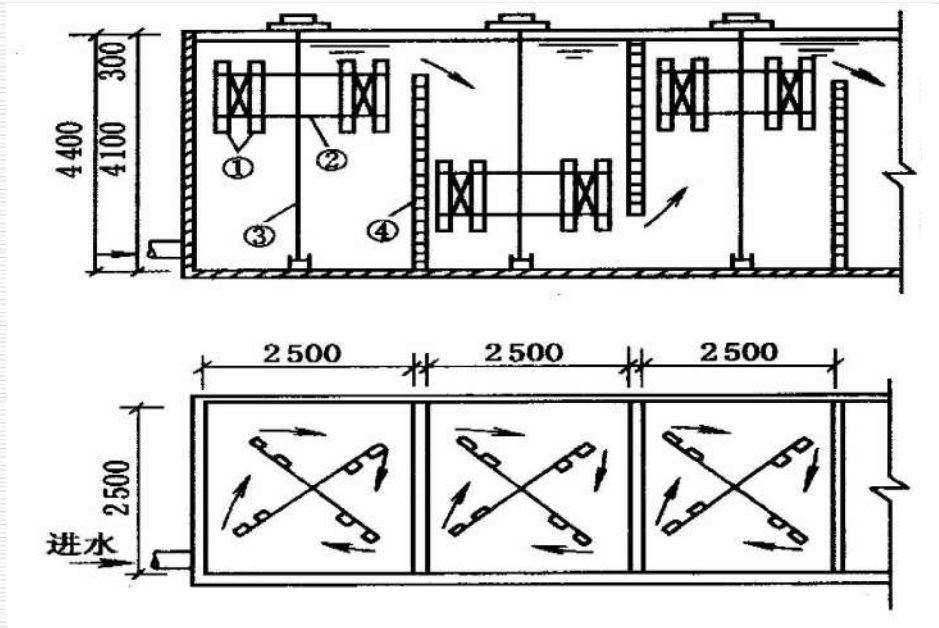
水平轴机械搅拌（三级）絮凝反应池

### 水平轴机械搅拌反应池



混凝反应水平轴搅拌机

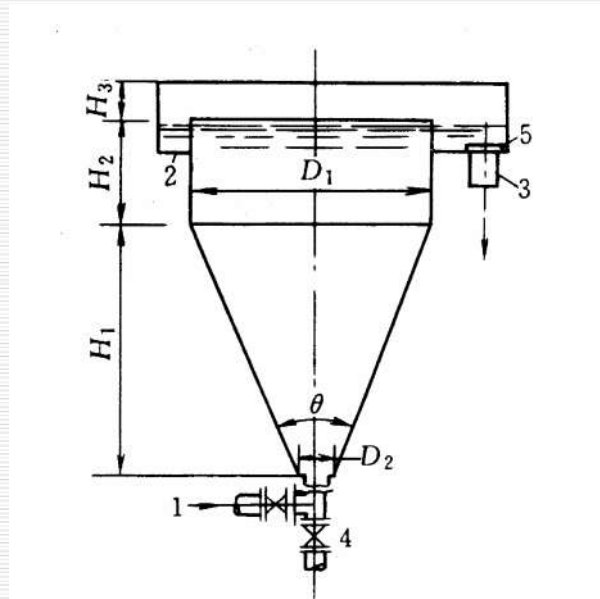
## 3.4.5 反应设备



垂直轴式机械搅拌反应池

## 3.4.5 反应设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备

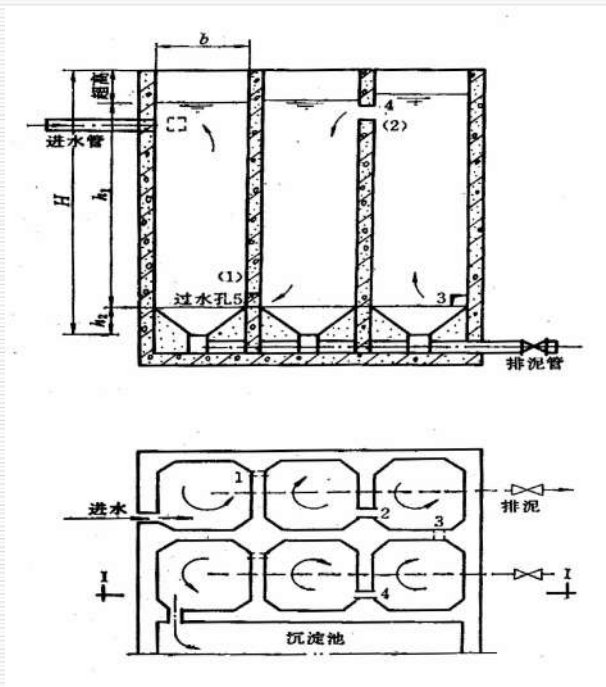


水力涡流反应池

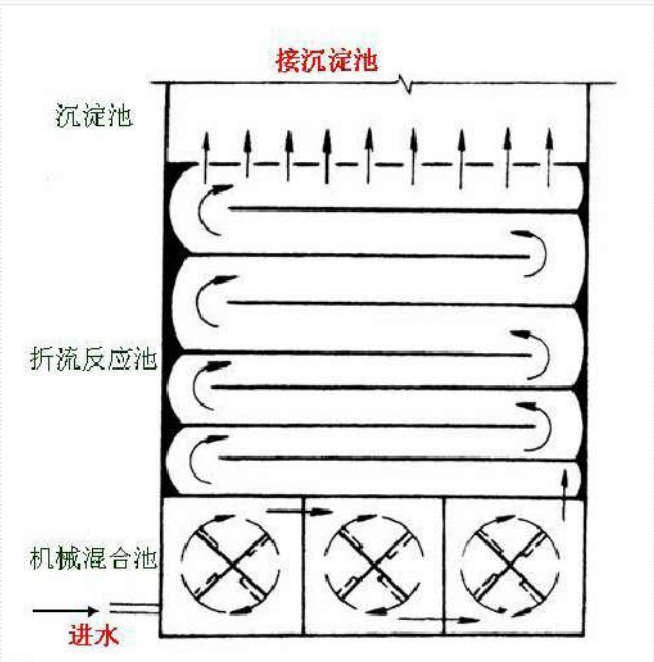
1—进水管 2—周边集水槽 3—出水管 4—放水阀 5—格栅

# 3.4.5 反应设备

## 3.4 混凝工艺过程与设备



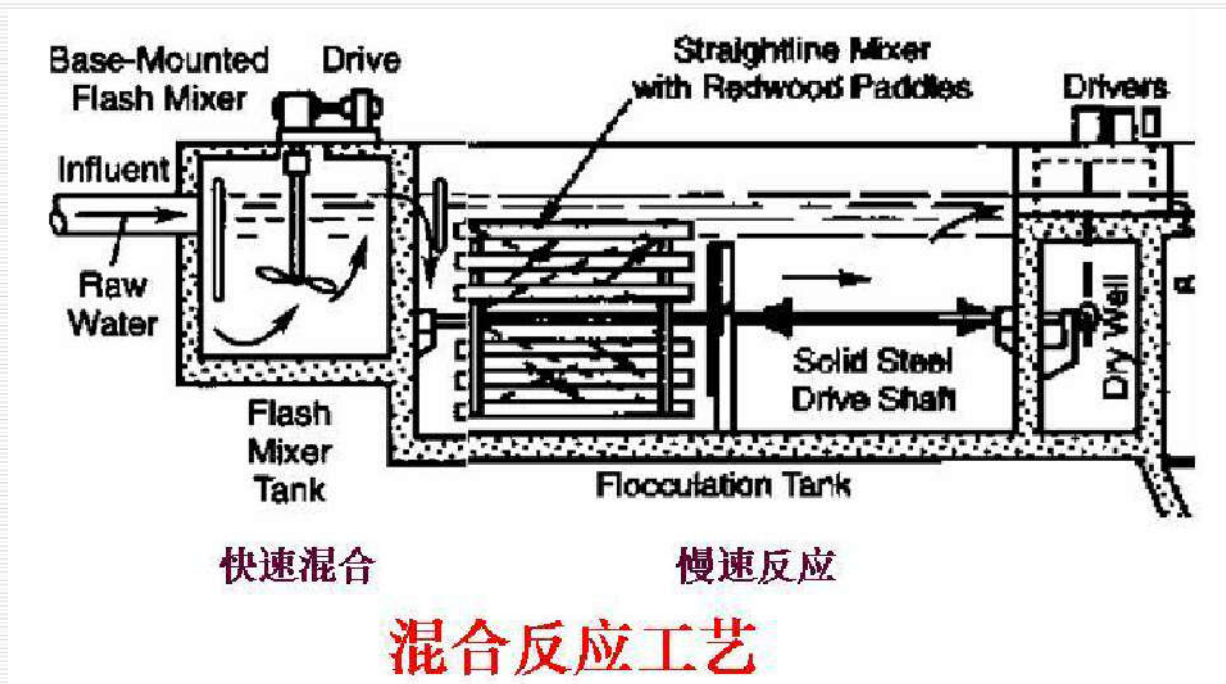
水力旋流反应池



组合反应池工艺

## 3.4.5 反应设备

### 3.4 混凝工艺过程与设备



## 3.5 混凝试验

---

### □ 目的

- 比较不同混凝剂对特定水或废水的处理效果
- 优化工艺条件（最佳投量、时间等）
- 指导实际水处理工艺的生产运行和管理

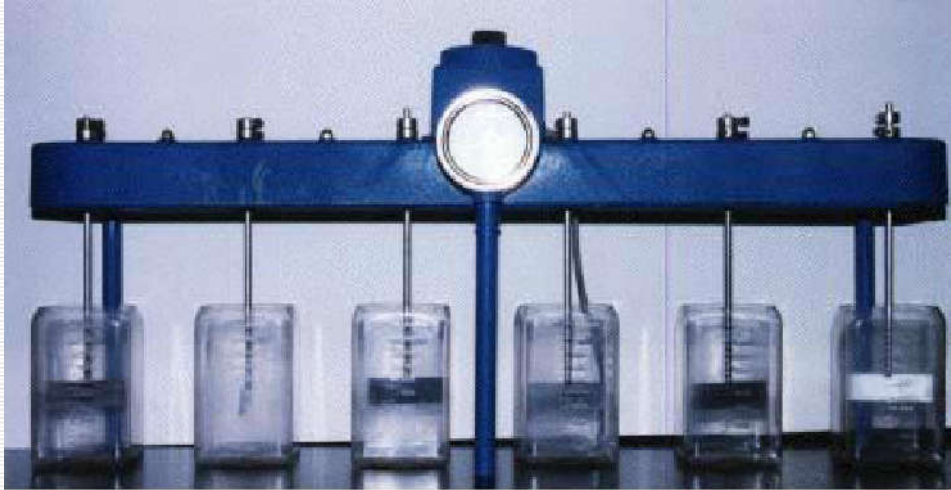
### □ 试验方法

- 准备
- 混凝沉淀操作（烧杯试验）
- 数据测定与评价

## 3.5 混凝试验

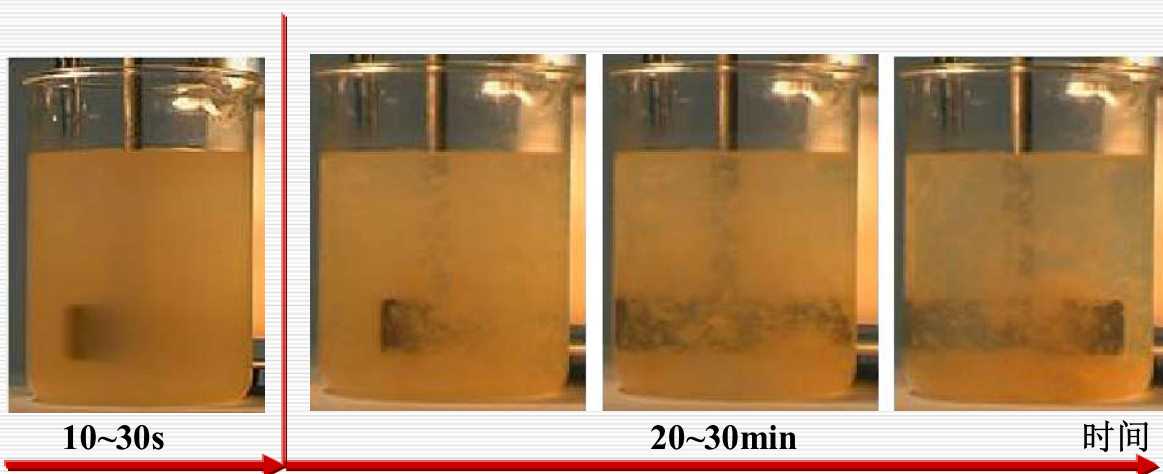
---

### □ 烧杯试验



混凝搅拌装置

## 3.5 混凝试验



快速混合

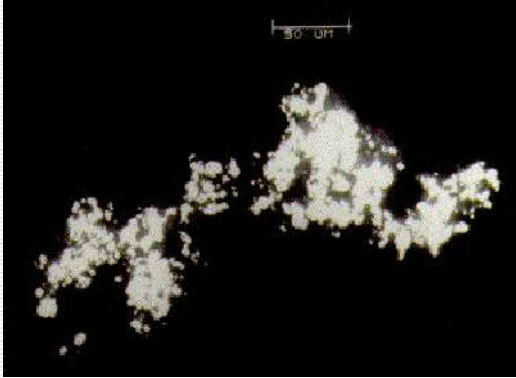
絮凝反应

混凝烧杯试验



## 3.5 混凝试验

---



混凝产生的絮体

# 致谢

---



THANKS

for your keeping the water quality  
after you use it.

