

4.2 化学沉淀

4.3 混凝与絮凝

4.4 氧化还原

第5章 废（污）水物理化学处理过程

5.1 吸附

5.2 离子交换

5.3 膜分离

5.4 萃取

5.5 吹脱与汽提

第6章 废（污）水生物处理基本原理

6.1 废（污）水生物处理基本原理

6.2 废（污）水生物处理微生物学原理

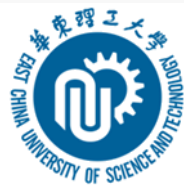
6.3 废（污）水的可生物处理性

第7章 活性污泥生物处理过程

7.1 活性污泥净化过程的基本原理

7.2 活性污泥反应过程分析

5.1 吸附-基本理论



吸附的定义

一种物质的分子或原子附着在另一种物质表面上的过程，或物质在**固体表面上**或**微孔容积内**积聚的现象。

吸附的类型

气-液、气-固、液-固

污水处理中吸附的适用范围及目的

类型：多孔性固体吸附剂，**固-液**两相间，通过相转移变化去除底物。

对象：低浓度工业废水

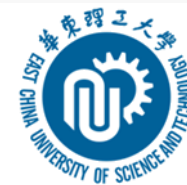
目的：脱色、除臭、脱除重金属、各种溶解性有机物、放射性元素等。

应用：离子交换、膜分离等预处理，以去除有机物、胶体物及余氯等；
作为二级处理后的深度处理手段。

优点：适用范围广，效果好，可回收有用物料，吸附剂可重复使用。

缺点：对进水预处理要求较高，运转费用较贵，系统庞大，操作麻烦。

5.1 吸附-基本理论

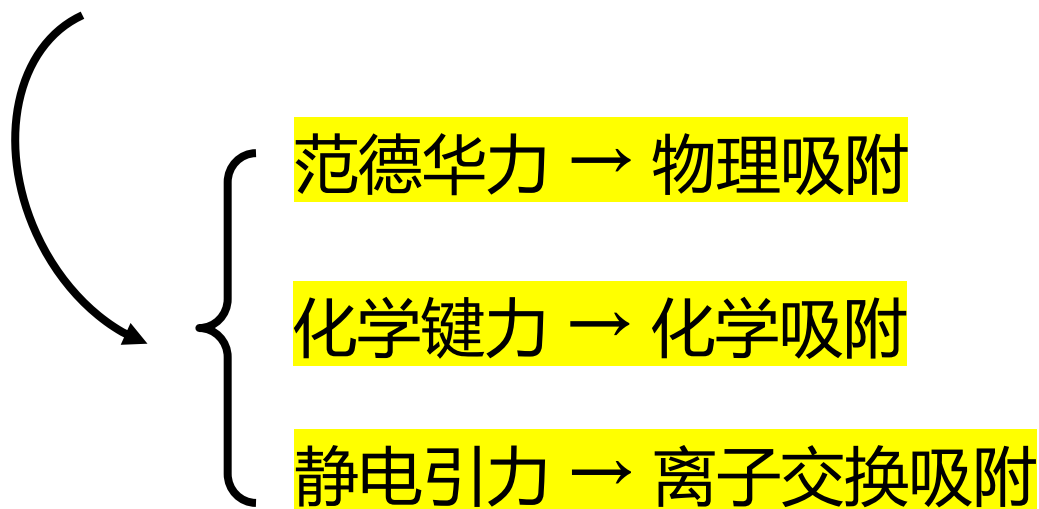


固液吸附机理及其分类

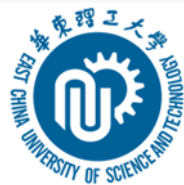
固体表面分子、原子、离子力场不饱和

导致 ↓ 产生

固体表面力：吸附分子、原子或离子。



5.1 吸附-基本理论



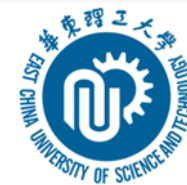
➤物理吸附

- 影响因素** { **范德华力**：包括定向力（分子极性正相关）、色散力（分子极化度正相关）、诱导力（次级效应），只表现为互相吸引；
分子间氢键：水分子间及水与化合物中F、O、N等原子间形成氢键，吸附时须克服氢键作用或将水与化合物共同吸附；
吸附剂的比表面积和细孔分布。
- 特点** { **放热过程**，**吸附热较小**，约42 kJ/mol或更少，低温下就可进行；
无选择性，溶质不固定在吸附剂表面特定位置，界面范围内自由移动；
可逆过程，吸附和解吸都较快，易达到平衡状态；
可单分子或多分子层吸附，**以多分子层吸附为主。**

➤化学吸附

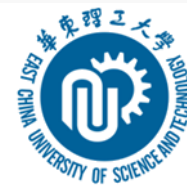
- 影响因素** { **化学性质**：与吸附剂和吸附质的化学性质，特别是表面化学性质关系很大；
温度：**吸附速度随温度升高而增加**，常在较高温度下进行。
- 特点** { **放热过程**，**吸附热较大**，约84 ~ 420 kJ/mol；
有选择性，形成牢固化学键和表面络合物，不能自由移动；
不可逆过程，不易解吸；**多为单分子层吸附。**

5.1 吸附-基本理论



项 目	物理吸附	化学吸附
吸附剂	一切固体	某些固体
温 度 范 围	接近沸点温度时发生，多孔固体颗粒微孔中的温度高于沸点温度。	在远高于沸点温度下发生。
吸附热	$< 42 \text{ kJ/mol}$	通常 $> 80 \text{ kJ/mol}$
活化能	低，吸附时 $< 8 \text{ kJ/mol}$	高，吸附时 $> 80 \text{ kJ/mol}$
覆盖度	多层吸附	单层吸附或不满一层
可逆性	高度可逆	常为不可逆
应 用	测定固体表面积，孔大小；分离或净化气体或液体。	测定表面浓度，吸附/解吸速率；估计活性中心面积。

5.1 吸附-基本理论



➤ 水污染控制过程吸附规律

溶解度越小的物质越易被吸附；

吸附剂与吸附质间极性相似，易被吸附；

吸附温度对物理吸附不利，对化学吸附有利；

吸附剂与吸附质接触面越大，越有利，吸附剂比表面积和细孔分布。

➤ 吸附平衡

吸附平衡即吸附速度等于解吸速度，吸附达到平衡时液相中吸附质浓度 C_e 和单位重量吸附剂的吸附量 q_e 不再变化。

衡量吸附剂吸附能力的指标

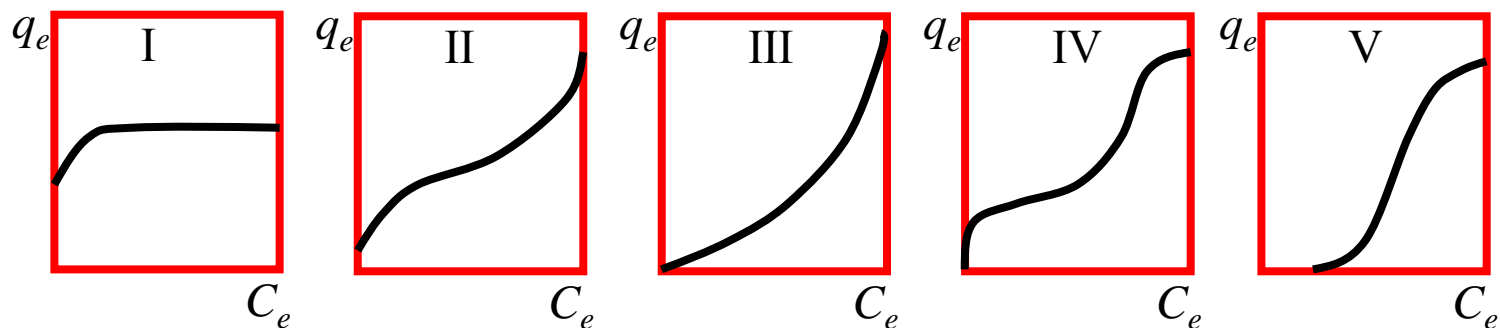
溶液体积 原水溶质浓度

$$q_e = \frac{V(C_0 - C_e)}{W}$$

吸附剂投加量

5.1 吸附-基本理论

➤ 物理吸附平衡5种等温线



I型：吸附剂表面都发生单分子层吸附，饱和时吸附量趋于定值；

II型：普遍，相当于多分子层吸附，溶质极限值对应于物质的溶解度；

III型：少见，特征是吸附热等于或小于纯溶质的溶解热；

IV型、V型：反映了毛细管冷凝现象和孔容的限制，达饱和浓度前吸附已平衡，因而显著滞后。

➤ 吸附等温式

描述吸附等温线的数学表达式为**吸附等温式**；

Langmuir等温式、B.E.T.等温式、Freundltch等温式。

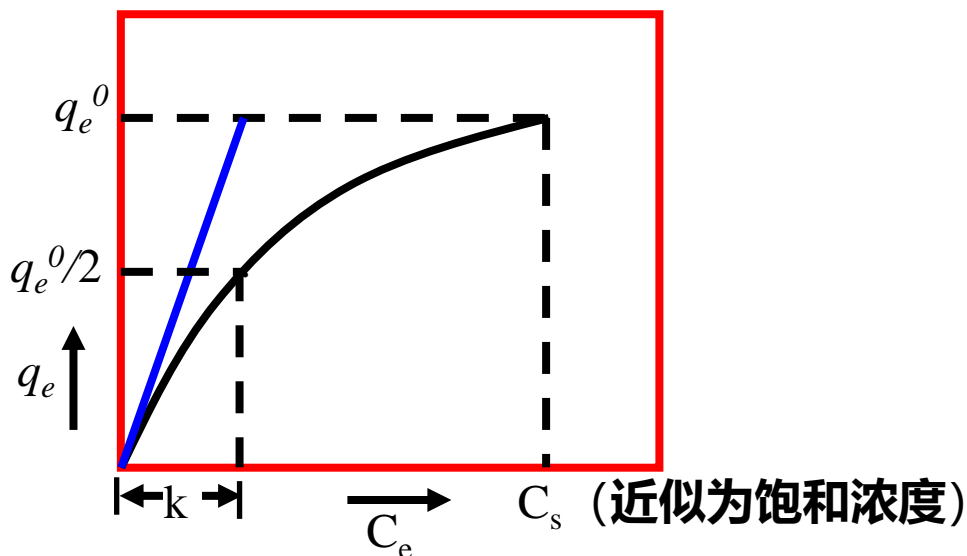
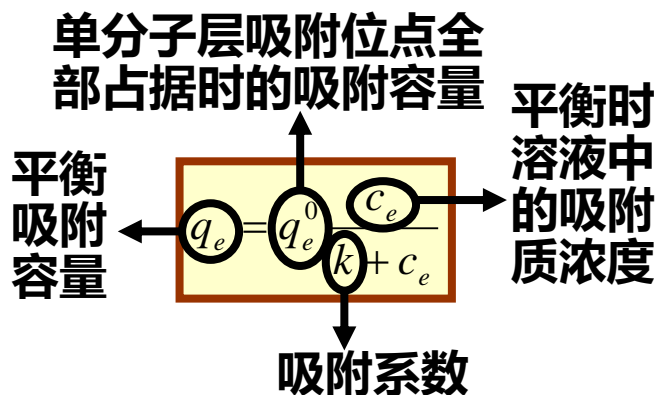
5.1 吸附-基本理论

Langmuir 吸附等温式 → I 型等温线

解释 单分子层化学吸附

➤ 假设条件

吸附只发生在固体表面 **吸附活性中心点**，每个活性中心只能吸附一个分子，是单分子层吸附，当活性中心被占满时，吸附达到饱和，吸附量达到最大值。



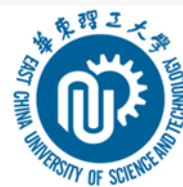
➤ 讨论

$$c_e \gg k \longrightarrow q_e = q_e^0$$

$$c_e \ll k \longrightarrow q_e = \frac{q_e^0}{k} c_e$$

$$c_e = k \longrightarrow q_e = \frac{1}{2} q_e^0$$

5.1 吸附-基本理论



B.E.T.吸附等温式 → II型多分子层吸附

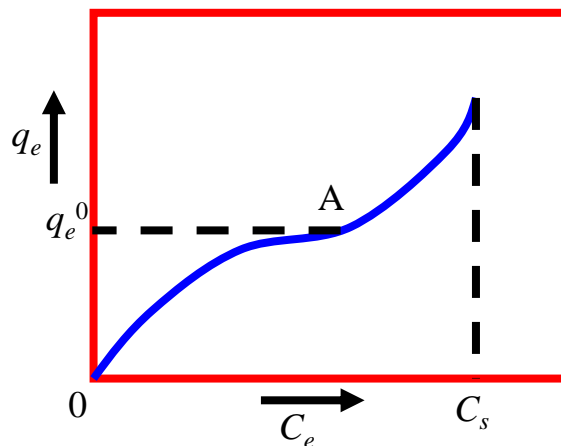
➤ 假设条件

适于描述多分子层吸附；不一定待第一层吸满后再吸附第二层；每个单层可用 *Langmuir* 式描述；第一层吸附靠吸附剂与溶质间分子引力；第二层以后靠溶质分子间引力；两类引力不同，故吸附热也不同。

有关表面作用能的常数

$$q_e = \frac{B c_e \cdot q_e^0}{(c_s - c_e) [1 + (B-1) c_e / c_s]}$$

溶质饱和浓度



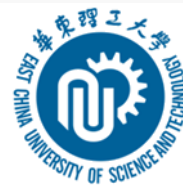
➤ 讨论

第一层吸附为主时 $c_e \ll c_s$ 令 $\frac{B}{c_s} = b$ BET式可转化为 *Langmuir* 式
(详见课本第151页)

S形曲线的拐点A以前的部分相当于单分子层吸附平衡区段

BET吸附等温线适用于更广泛的吸附现象

5.1 吸附-基本理论



Freundltch吸附等温式

Freundltch为经验式，在一般的浓度范围内与Langmuir式较接近，但高浓度时不像后者那样趋于定值；低浓度时，不会还原为直线关系。

讨论

$$0.1 < \frac{1}{n} < 0.5$$

易于吸附

$$\frac{1}{n} > 2$$

难于吸附

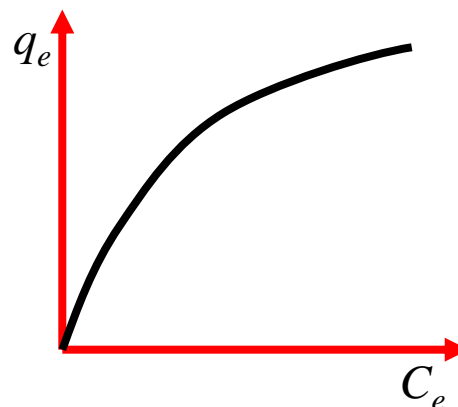
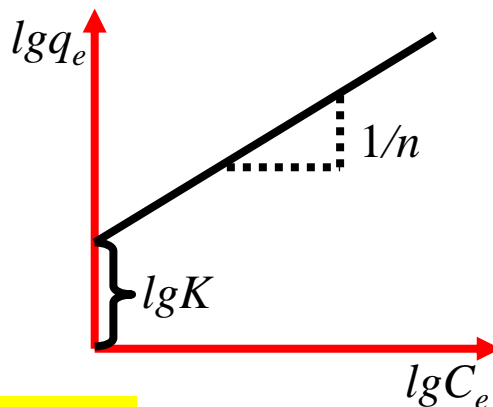
由常数 K 与 $1/n$ ，可比较不同吸附剂特性

$$\lg q_e = \lg K + \frac{1}{n} \lg c_e$$

大于1的常数

$$q_e = K \cdot c_e^{1/n}$$

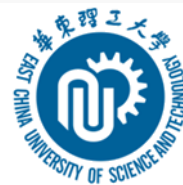
Freundlich吸附系数



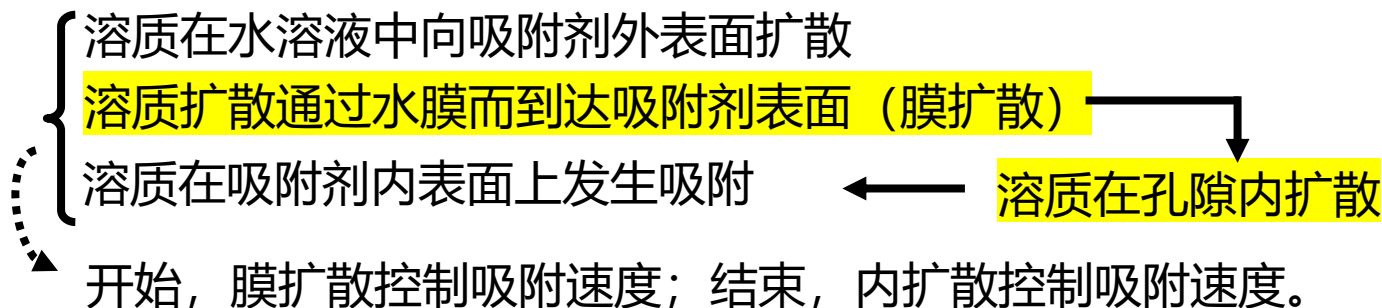
等温吸附方程的工程意义

由吸附容量确定吸附剂用量；选择最佳吸附剂；比较选择同种吸附剂对不同吸附质的最佳吸附条件；通过不同吸附质的吸附特性对比及混合物质的竞争吸附对比，指导动态吸附的过程设计。

5.1 吸附-动力学



➤ 吸附过程4阶段



➤ 水膜内的物质迁移速度

Fick定律, 水膜内传质速度为

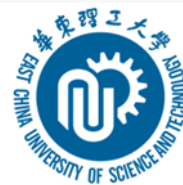
$$-\frac{dC}{dt} = \frac{D}{\delta} \cdot A \cdot (c - c_i) = k_f \cdot A \cdot (c - c_i)$$

Diagram labels and arrows:

- D : 扩散系数 (Diffusion coefficient)
- δ : 水膜厚度 (Water film thickness)
- k_f : 传质系数 (Mass transfer coefficient)
- A : 液膜表面积 (Liquid film surface area)
- c : 水中溶质浓度 (Solute concentration in water)
- c_i : 颗粒表面浓度 (Concentration at particle surface)

加速液体流动和改填充床为沸腾床, 可增加剪切力, 降低液膜厚度, 增加扩散系数, 强化传质, 从而将膜扩散的控制阶段转变为孔扩散的控制阶段。

5.1 吸附-动力学



➤ 内孔扩散速度

吸附质在吸附剂内部孔结构中扩散速率为

传质系数 与 C_i 相平衡时的吸附量

$$-\frac{dq}{dt} = k_s \cdot A \cdot (q_i - q)$$

某时刻吸附量或平均吸附量

吸附剂内表面积

孔扩散时的扩散传递速率表现出为吸附量差值的一级反应速率

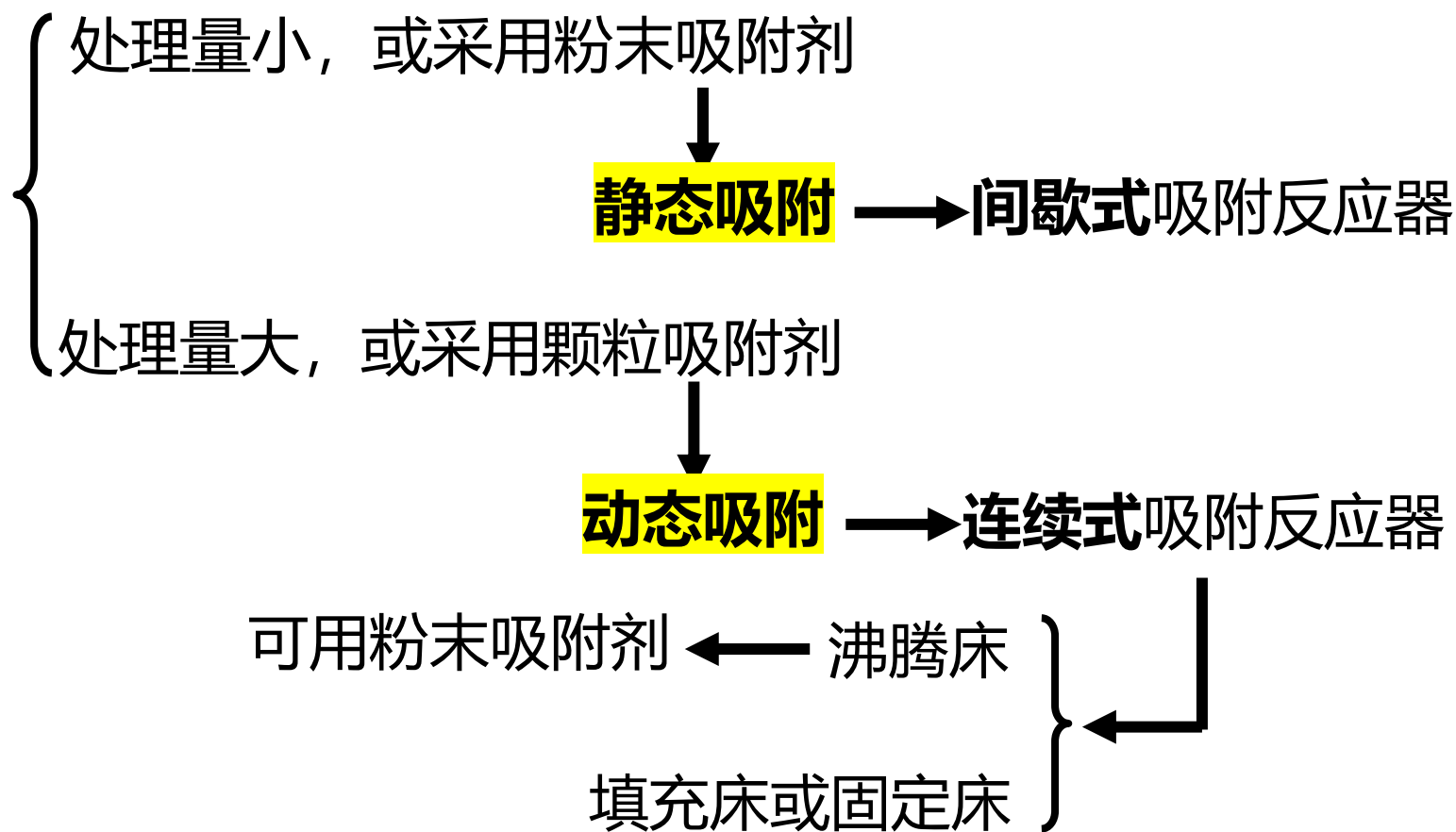
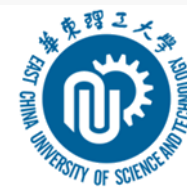
➤ 影响吸附的因素

① **吸附质的物理化学性质**: 溶解度越低, 越易被吸附; 极性, 化学活泼性和分子大小也有影响。

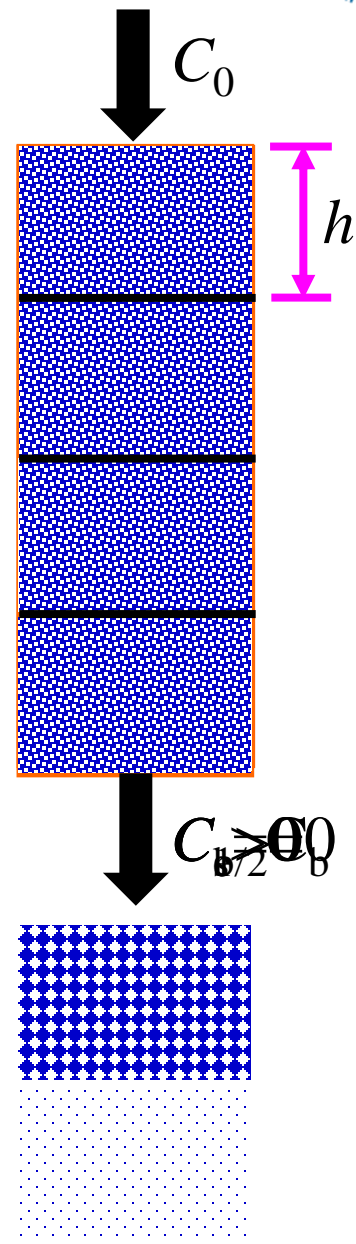
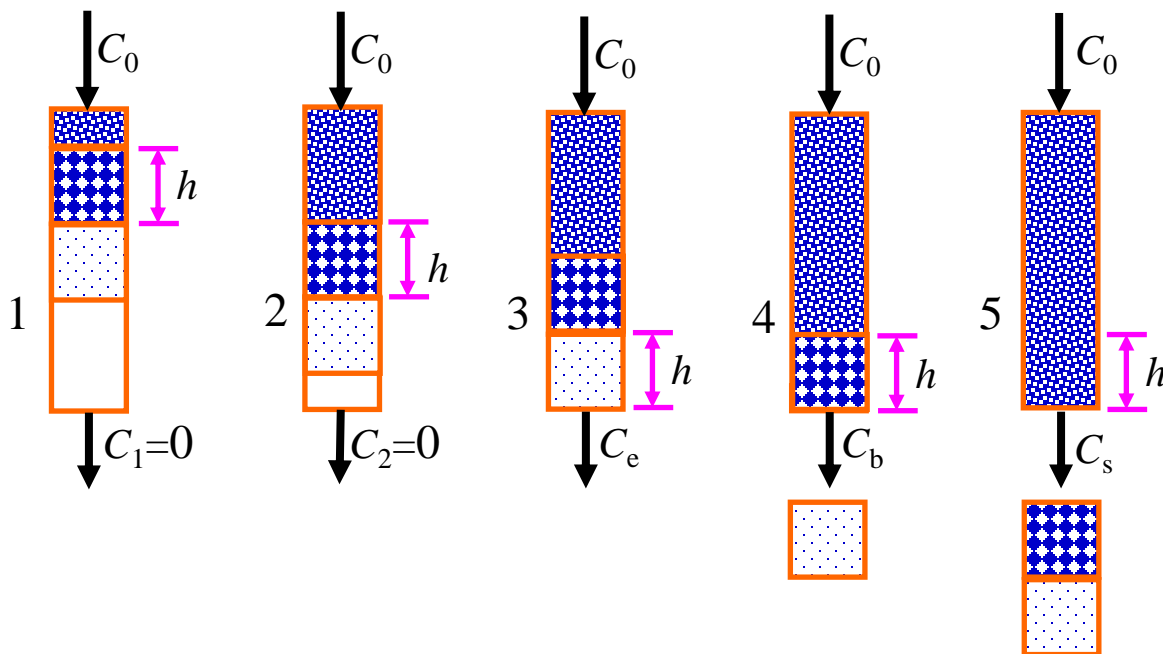
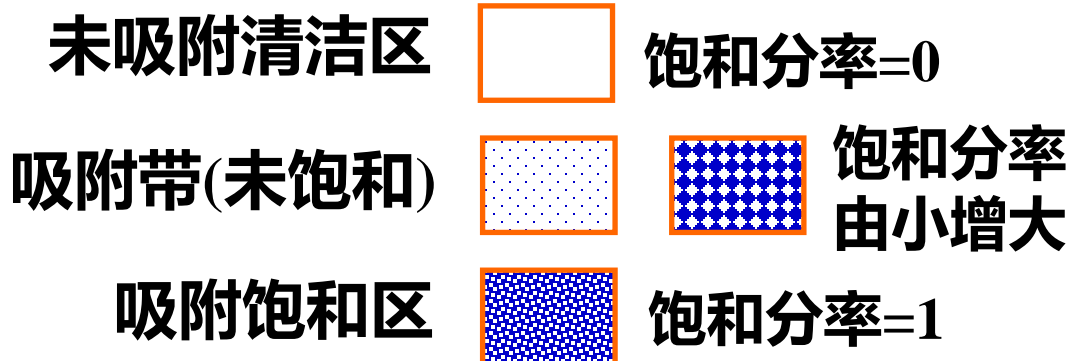
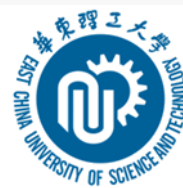
② **吸附剂的物理化学性质**: 比表面积越大, 吸附能力强; 吸附剂与吸附质极性相似性越强, 吸附效果越好; 孔径太大, 表面积小, 吸附能力差; 孔径太小, 不利扩散, 屏蔽大分子;

③ **操作条件**: pH、温度 (物理吸附无需加温)、共存物 (SS堵塞孔隙, 吸附质间竞争)

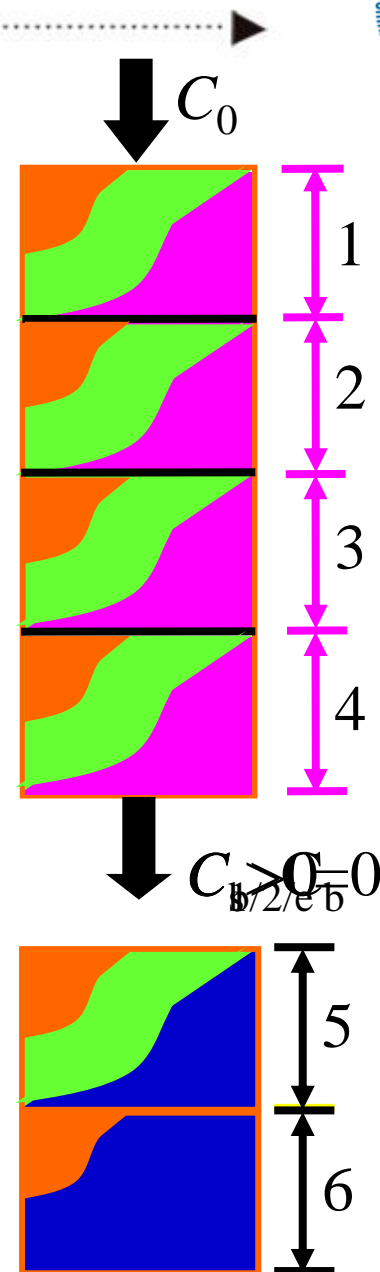
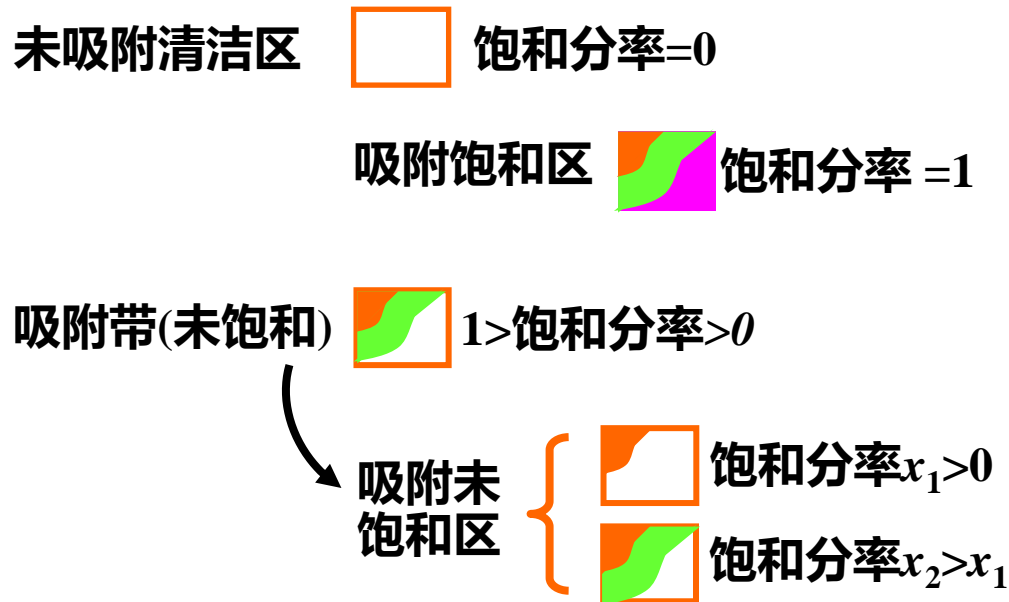
5.1 吸附-反应器分类



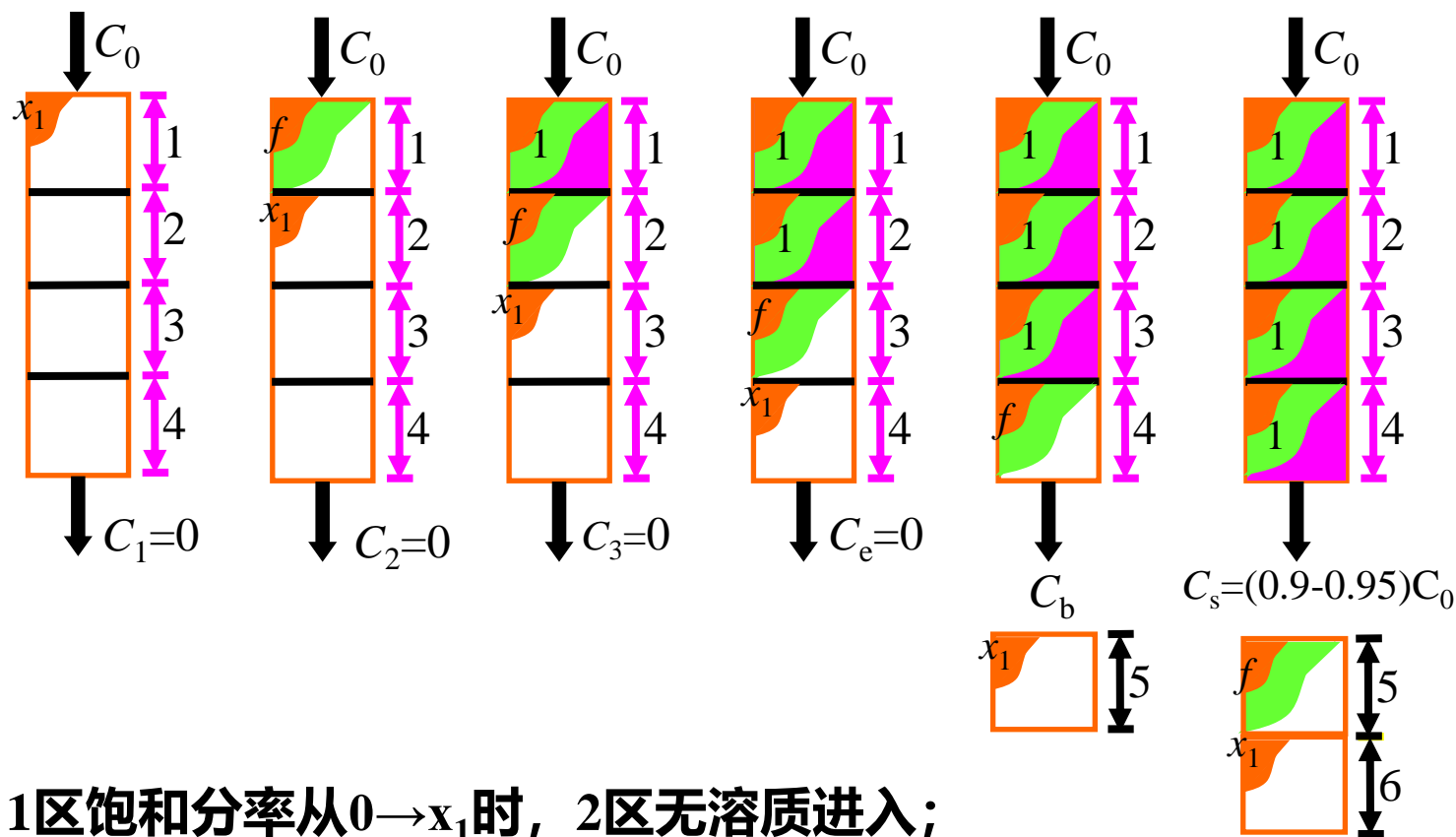
5.1 吸附-动态过程描述



5.1 吸附-动态过程分析



5.1 吸附-动态过程分析



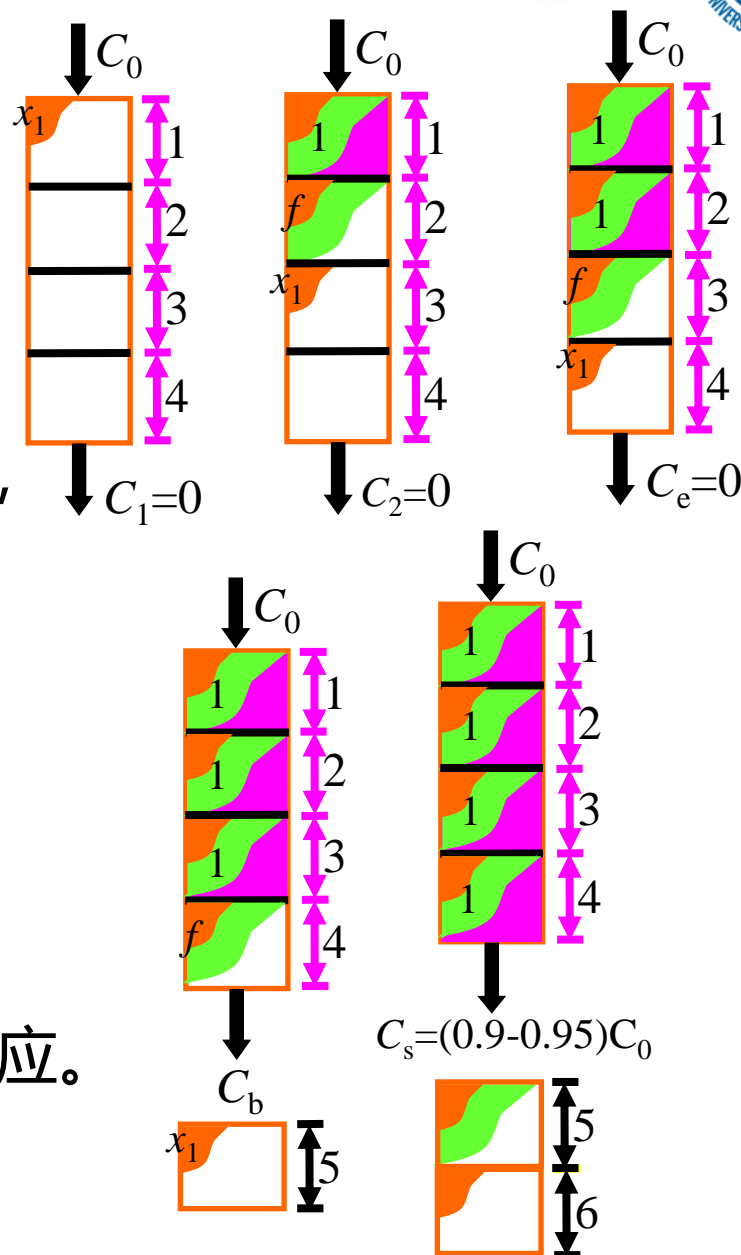
- 1区饱和分率从 $0 \rightarrow x_1$ 时, 2区无溶质进入;
- 1区饱和分率从 $x_1 \rightarrow f$ 时, 2区有溶质进入, 饱和分率从 $0 \rightarrow x_1$;
- 1区饱和分率从 $f \rightarrow 1$ 时(即1区占满吸附位 $1-f$ 分率), 2区饱和分率从 $x_1 \rightarrow f \dots$

5.1 吸附-动态过程分析

吸附带：

溶质分散吸附 h 高度的1区，随着1区吸附容量增大， h 高度的2区开始分散吸附溶质，1区逐步达到饱和时，2区形成不饱和吸附区...， h 高度物质传输区称为**吸附带**，动态吸附相当于吸附带向下匀速移出吸附柱的过程。

吸附带高度 h 与工况条件相对应。



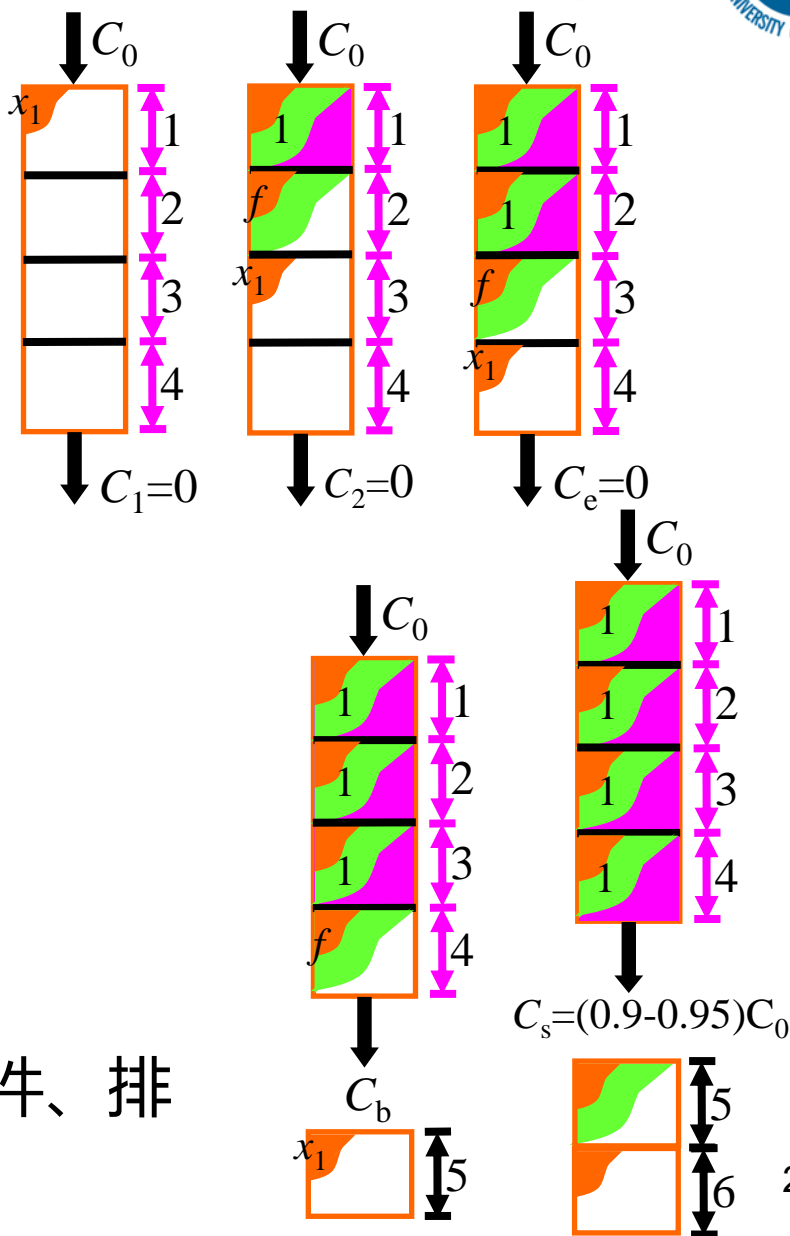
5.1 吸附-动态过程分析

饱和分率 f 的确定

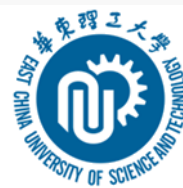
吸附带中饱和吸附剂量占总量的分率，为**饱和分率**。

吸附带下缘移动到吸附柱底端时，整柱由上部饱和区与末端吸附带组成，随末端吸附带逐步饱和，出水中开始出现溶质且浓度增大，**当达到排放标准 C_b 时，对应的末端吸附带饱和分率，以 f 表示。**

溶质不同时，吸附剂、操作条件、排放标准 C_b 、 f 值也不同。



5.1 吸附-反应器及其设计 (单级连续式吸附)



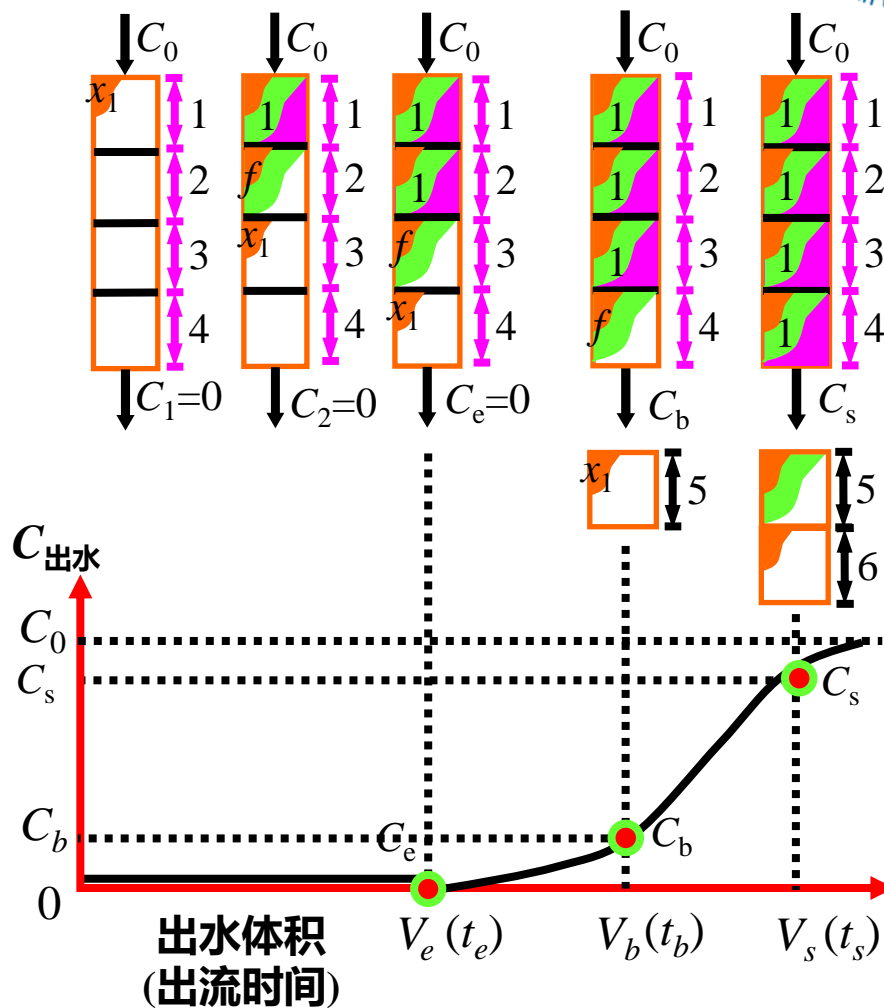
➤ 动态吸附 单级连续式吸附

1, 2: 形成吸附带, 下移,
上部床区饱和, 下部空白,
 $C_1=C_2=0$;

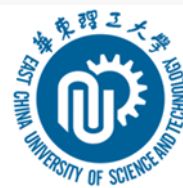
3: 吸附带传至床底, 上部
为饱和区, 底端吸附带饱和
分率较低, 出水未出现溶质
($C_e=0$), 为**泄漏点**;

4: 底端吸附带逐步饱和,
上部为饱和区, 出水出现溶
质, 且浓度逐步升至排放标
准 C_b , 为**穿透点**;

5: 底端吸附带全部饱和, 相当于未饱和吸附带移出床区, 床层皆饱和, 出水浓度 $C_s=(0.90 \sim 0.95)C_0$, 为**饱和点或耗竭点**。



5.1 吸附-反应器及其设计 (单级连续式吸附)



➤ 动态吸附容量 $q_{\text{动}}$ 单级连续式吸附

曲线左上侧面积除以吸附剂重量 W 等于动态吸附容量 $q_{\text{动}}$ ，由穿透前吸附容量 $q_{\text{穿}}$ 和由穿透点到饱和点时吸附容量 $q_{\text{耗}}$ 组成。

$$q_{\text{动}} = \frac{V_e C_0 + \int_{V_e}^{V_s} (C_0 - C) dV}{W}$$

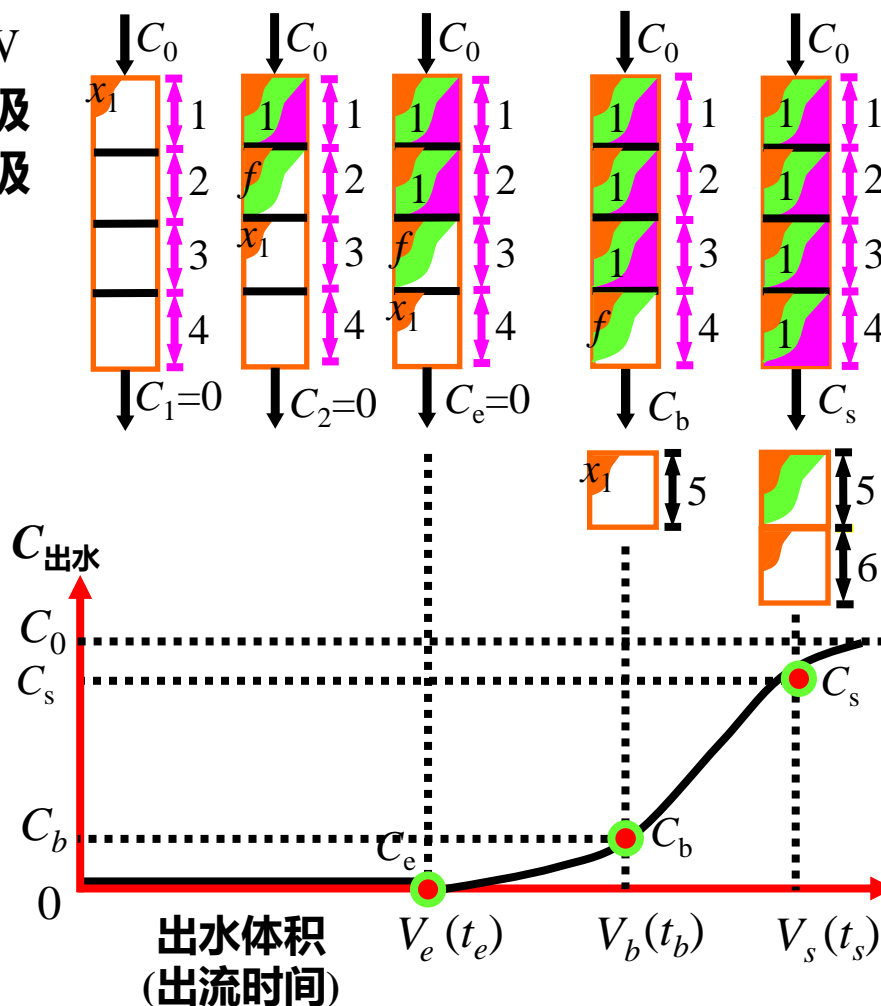
$$q_{\text{动}} = q_{\text{穿}} + q_{\text{耗}}$$

$$q_{\text{穿}} = \frac{V_e C_0 + \int_{V_e}^{V_b} (C_0 - C) dV}{W}$$

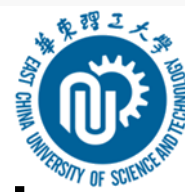
V_e 与 V_b 较近

$$q_{\text{穿}} = \frac{V_e C_0 + 0}{W}$$

$$q_{\text{耗}} = \int_{V_b}^{V_s} (C_0 - C) dV / W$$



5.1 吸附-反应器及其设计 (单级连续式吸附)



➤ 吸附带饱和分率 f 的计算 单级连续式吸附

穿透点末端吸附带饱和分率为 f 。

耗竭点末端吸附带饱和分率为 1。

穿透点到耗竭点被吸附溶质占据吸附带内吸附剂分率为 $1-f$

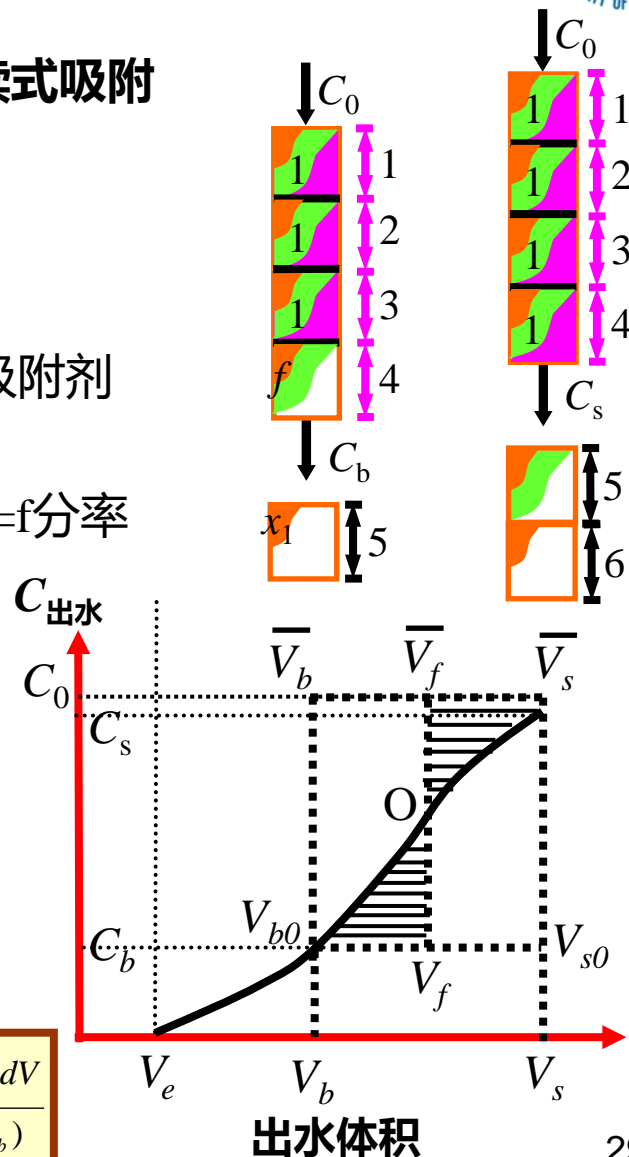
穿透点到耗竭点吸附柱流出溶质可被 $(f+x_1)-x_1=f$ 分率吸附剂所吸附

穿透点到耗竭点流入柱的溶质为被吸附和流出量之和，可占据吸附剂分率为 $(1-f)+f=1$

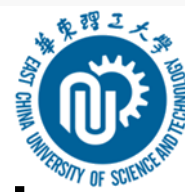
$$1-f = \frac{\text{曲线 } V_{b0} \bar{V}_s \text{ 上侧面积}}{\text{矩形 } V_b V_s \bar{V}_s \bar{V}_b \text{ 面积}}$$

III

$$1-f = \frac{V_b \rightarrow V_s \text{ 末端吸附带空位数}}{\text{末端吸附带所有吸附位数}} = \frac{V_b \rightarrow V_s \text{ 所吸附溶质量}}{V_b \rightarrow V_s \text{ 流入溶质量}} = \frac{\int_{V_b}^{V_s} (C_0 - C) dV}{C_0 (V_s - V_b)}$$



5.1 吸附-反应器及其设计 (单级连续式吸附)



➤ 吸附带饱和分率 f 的计算 单级连续式吸附

作穿透曲线 $V_{b0}O\bar{V}_s$ 的中心线 $V_f\bar{V}_f$, 使得

三角形 $V_{b0}V_fO$ 与三角形 $\bar{V}_s\bar{V}_fO$ 的面积相等, 则

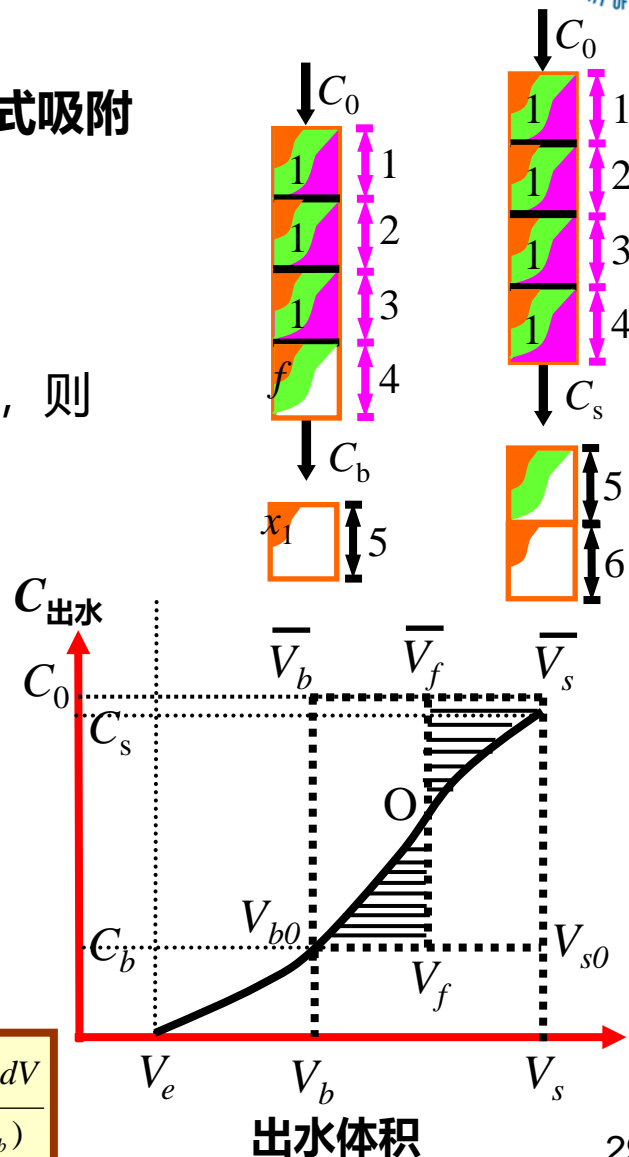
四边形 $V_{b0}V_f\bar{V}_f\bar{V}_b$ 与类三角形区域 $V_{b0}O\bar{V}_s\bar{V}_b$ 面积相等

III

$$1-f = \frac{\text{曲线 } V_{b0}\bar{V}_s \text{ 上侧面积}}{\text{矩形 } V_bV_s\bar{V}_s\bar{V}_b \text{ 面积}}$$

III

$$1-f = \frac{V_b \rightarrow V_s \text{ 末端吸附带空位数}}{\text{末端吸附带所有吸附位数}} = \frac{V_b \rightarrow V_s \text{ 所吸附溶质量}}{V_b \rightarrow V_s \text{ 流入溶质量}} = \frac{\int_{V_b}^{V_s} (C_0 - C) dV}{C_0 (V_s - V_b)}$$



5.1 吸附-反应器及其设计 (单级连续式吸附)

➤ 吸附带推进速度 S

假设：吸附过程达到穿透点前，进入吸附柱的污染物全部被吸附。

废水流量 $\leftarrow Q$ $C_0 = S \cdot q_{\text{动}} \cdot \gamma_B \cdot A_B$ \rightarrow 吸附柱横截面积

柱内吸附剂填充密度

➤ 吸附带高度 h_{MTZ}

$$S = \frac{Q \cdot C_0}{q_{\text{动}} \cdot \gamma_B \cdot A_B}$$

$$t_S = t_H + t_{MTZ}$$

$$t_{MTZ} = \frac{q_{MTZ} h_{MTZ} A_B \gamma_B}{C_0 Q}$$

$$t_H = \frac{H}{S}$$

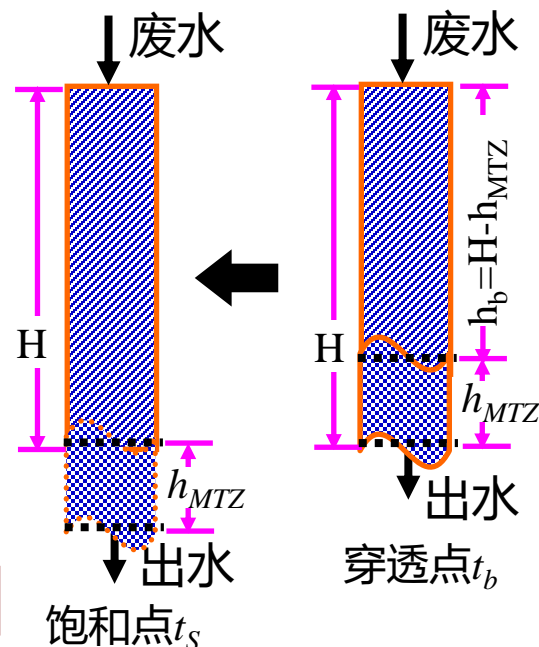
$$t_{MTZ} = \frac{h_{MTZ} \cdot q_{MTZ}}{S \cdot q_{\text{动}}}$$

$$t_S = \frac{H}{S} + \frac{h_{MTZ} \cdot q_{MTZ}}{S \cdot q_{\text{动}}}$$

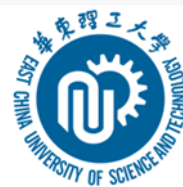
$$t_b = \frac{H - h_{MTZ}}{S} + \frac{h_{MTZ} \cdot q_{MTZ}}{S \cdot q_{\text{动}}}$$

$$t_b = t_{h_b} + t_{MTZ}$$

$$h_{MTZ} = S \cdot (t_S - t_b) \rightarrow h_{MTZ} \text{ 小, 利于吸附}$$



5.1 吸附-反应器及其设计 (单级连续式吸附)



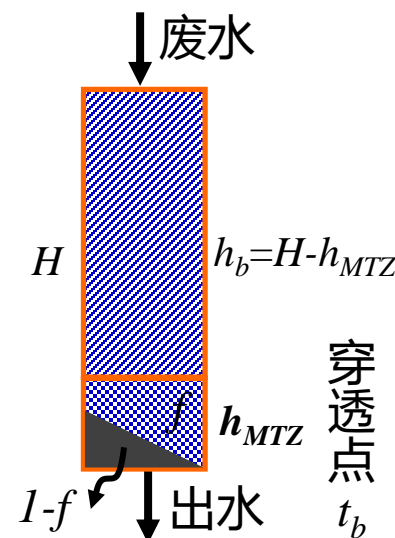
➤ 动态吸附柱效率与高度的计算

吸附柱效率 → 吸附柱高度 H

穿透点前，吸附带到达末端，尚有 $(1-f)$ 区域未吸附

穿透点时，动态吸附饱和部分总体积

$$V_{\text{动}} = h_b \cdot A + h_{MTZ} \cdot f \cdot A$$



穿透点时，吸附柱效率为饱和吸附剂量占柱内吸附剂总量分率，即吸附剂利用率

$$\eta = \frac{V_{\text{动}}}{V_{\text{总}}} = \frac{h_b \cdot A + h_{MTZ} \cdot f \cdot A}{H \cdot A}$$

$$H = h_b + h_{MTZ}$$

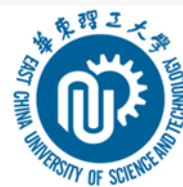
取 $f=0.5$

$$\eta = 1 - (1-f) \frac{h_{MTZ}}{H}$$

$$\eta = 1 - \frac{h_{MTZ}}{2H}$$

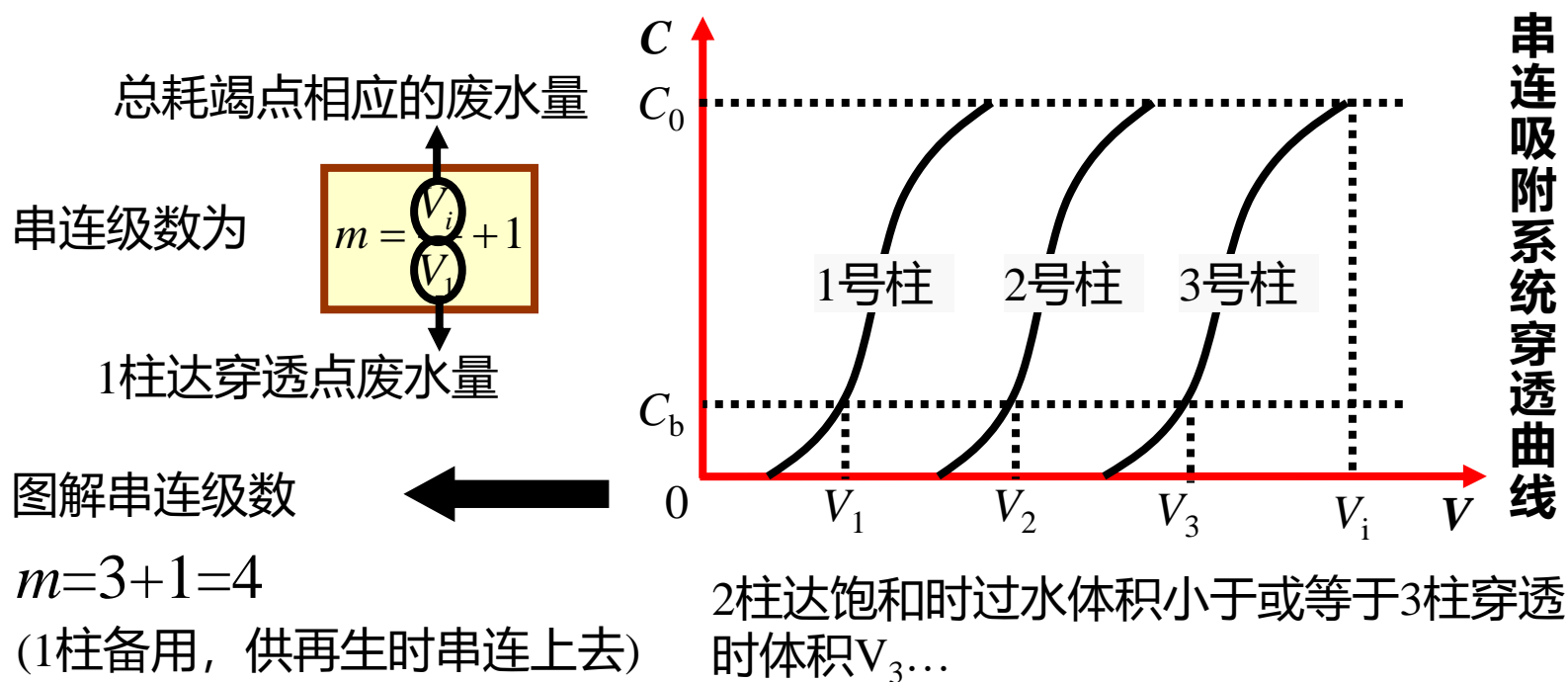
试验得 h_{MTZ} ，可求 H 和 η 。

5.1 吸附-反应器及其设计 (多级连续式吸附)

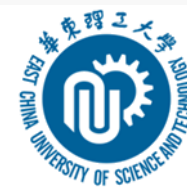


多级串连目的： 更好地利用吸附柱中未被利用的吸附剂

多级串连操作： 第一柱出水达穿透点后，可继续通水，出水必须串连至第二柱，作为第二柱的进水，直至第一柱吸附剂完全饱和，停止进水，回收吸附质和再生吸附剂。



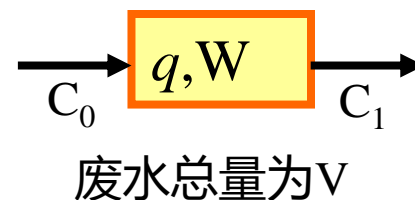
5.1 吸附-反应器个数及系统 (间歇式)



➤ **单级吸附** → 一个反应器，单次吸附。

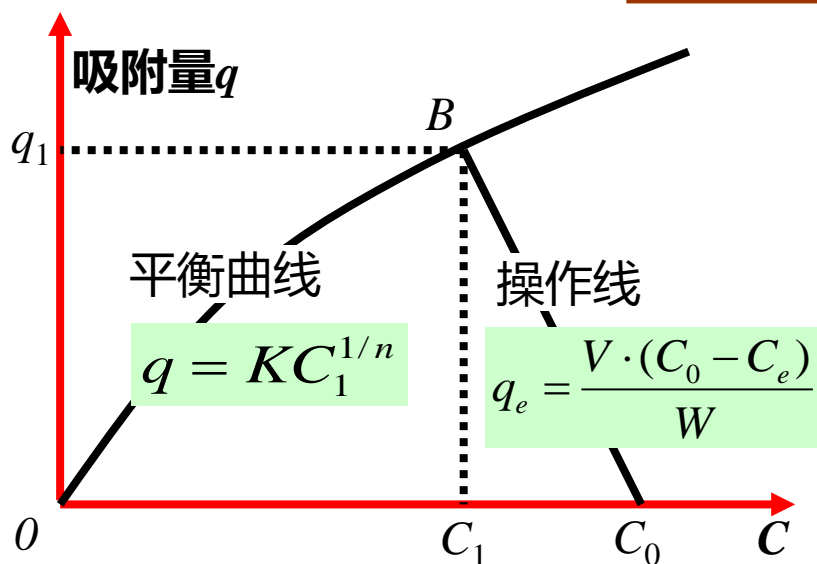
吸附剂上的吸附质量(物料衡算)

$$W \cdot q = V(C_0 - C_1)$$



Freundltch静态吸附平衡式

$$q = KC_1^{1/n}$$



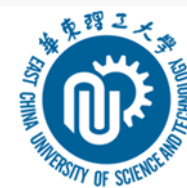
$$q = KC_1^{1/n} = \frac{V(C_0 - C_1)}{W} = q$$

平衡曲线 操作曲线

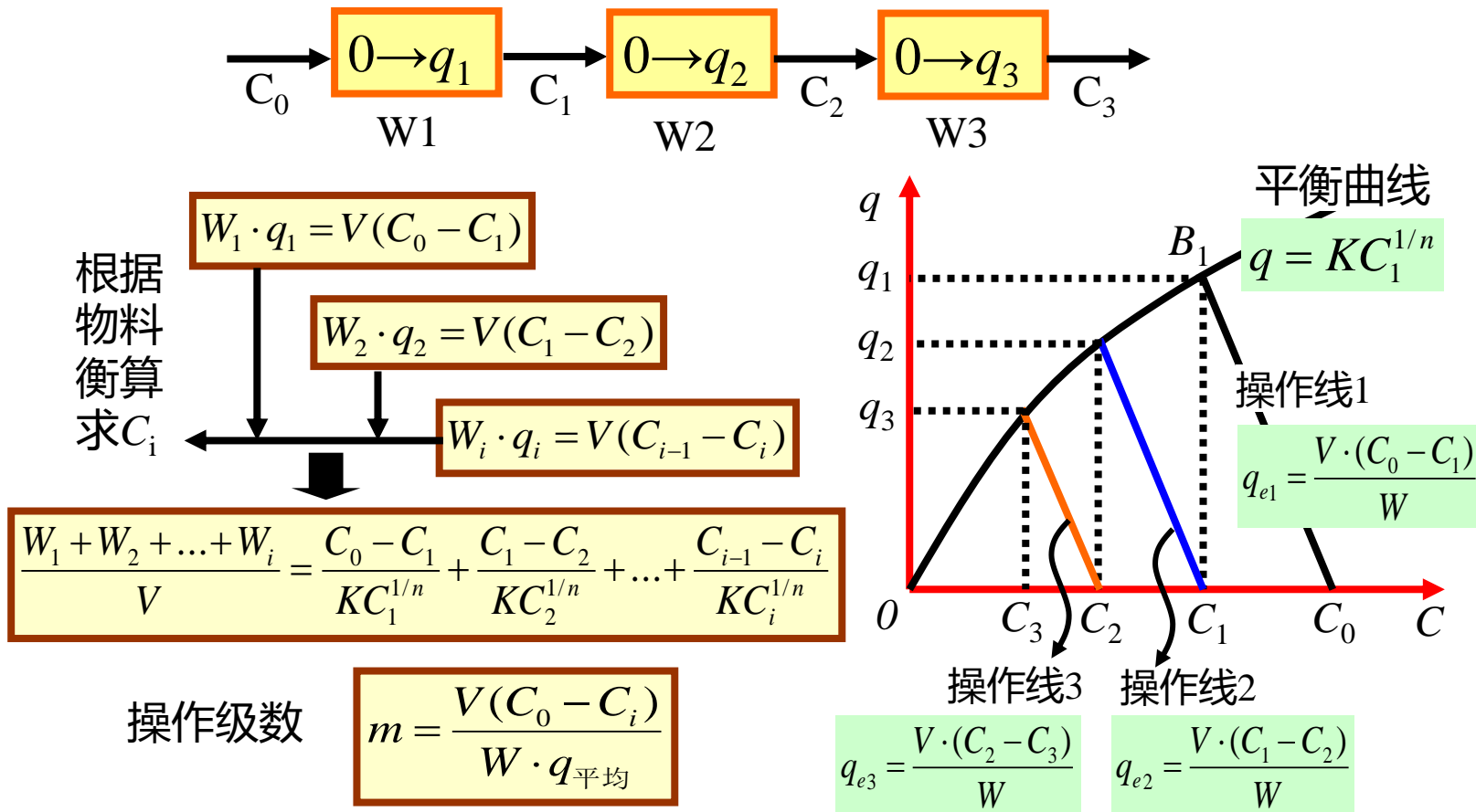
B点为两曲线交点，此时单级吸附达最大吸附量 q_1 ，出水浓度为 C_1 。

单级吸附出水吸附质浓度较高，往往不能达到处理要求。

5.1 吸附-反应器个数及系统 (间歇式)



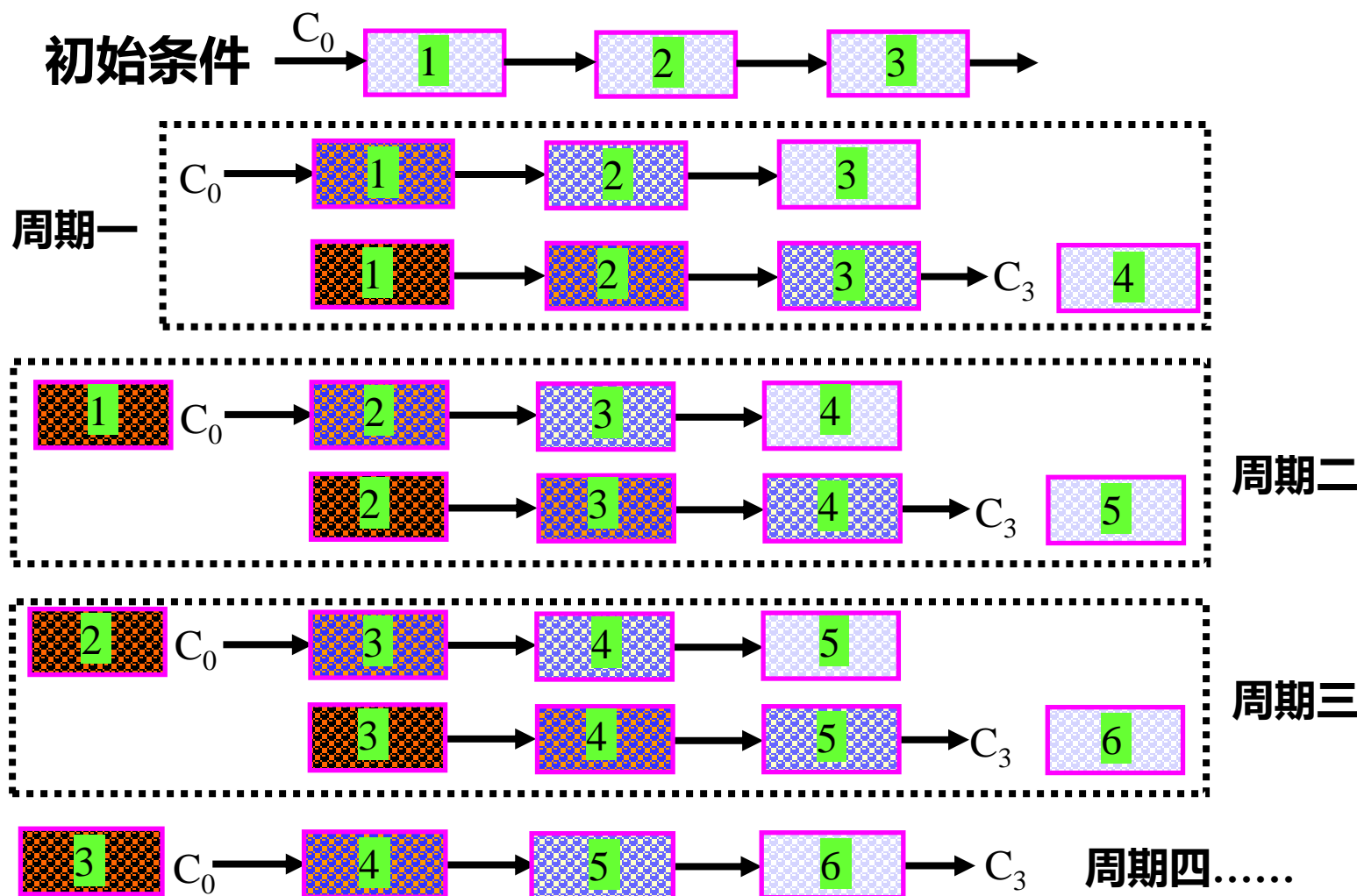
➤ 多级吸附 - 并流系统 → 水单次通过串连清洁吸附剂系统



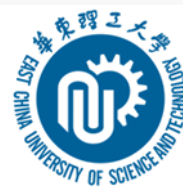
操作级数 m 越多, 终端 C_i 越小, 吸附剂总量消耗越多, 常为3~5级。

5.1 吸附-反应器个数及系统 (间歇式)

➤ 多级吸附 - 逆流系统 → 吸附剂与多次进水逆向接触

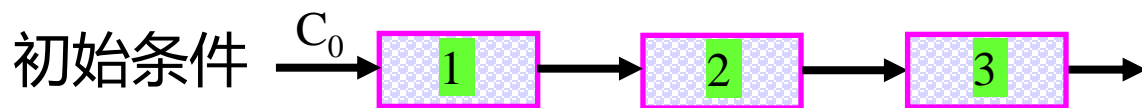


5.1 吸附-反应器个数及系统 (间歇式)

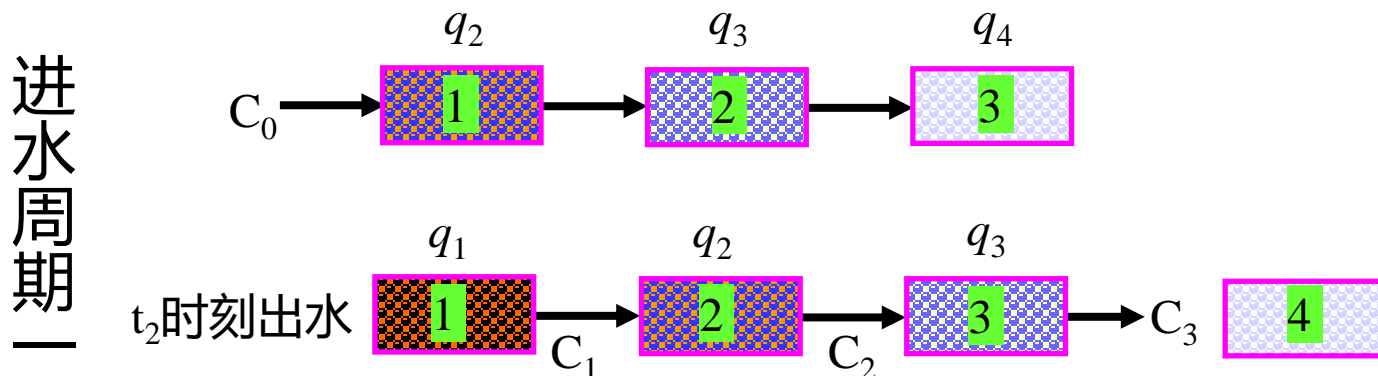


➤ 多级吸附 - 逆流系统 → 吸附剂与多次进水逆向接触

每一进水周期，水单次通过，但每级吸附剂从清洁到高浓度的吸附平衡都经历多次进水，与水多次逆向接触。



t_1 时刻进水 吸附剂在低浓度下达吸附平衡（吸附容量为 q_2 ），进入1#池，1#池起始溶质浓度为 C_0 。



$t_1 \sim t_2$ 期间溶质浓度 $C_0 \sim C_1$ 并稳定，对应 C_1 浓度的 t_2 时刻平衡吸附容量为 q_1

5.1 吸附-反应器个数及系统 (间歇式)

➤ 多级吸附 - 逆流系统 → 吸附剂与多次进水逆向接触

由物料衡算, 有 $W(q_1 - q_2) = V(C_0 - C_1)$

从 t_1 时刻进水至 t_2 时刻出水, 每级反应池

$$W(q_2 - q_3) = V(C_1 - C_2)$$

从 t_1 时刻进水至 t_2 时刻出水, 对于整个吸附剂系统物料衡算为:

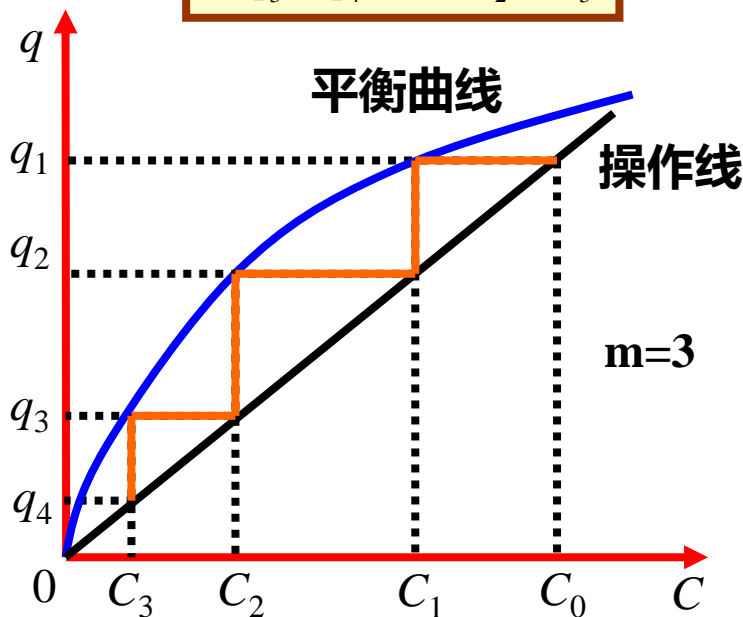
$$W(q_3 - q_4) = V(C_2 - C_3)$$

$$W \cdot (q_1 - q_{i+1}) = V(C_0 - C_i)$$

所需反应器级数 m 为:

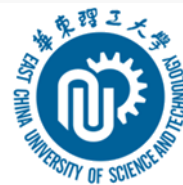
$$m = \frac{\lg[C_0(K \frac{W}{V} - 1) + C_n] - \lg C_n K \frac{W}{V}}{\lg K \frac{W}{V}}$$

弗兰德利希等温常数



达到同样的处理效果, 逆流吸附比并流吸附少用吸附剂。

5.1 吸附-吸附剂



➤ 工业吸附剂的要求

吸附能力强；吸附选择性好；吸附平衡浓度低；容易再生和再利用；机械强度好；化学性质稳定；来源广；价廉。

➤ 废水处理中的吸附剂

活性炭、磺化煤、白土、硅藻土、活性氧化铝、焦炭、树脂吸附剂、炉渣、木屑、煤灰、腐殖酸等。

➤ 活性炭

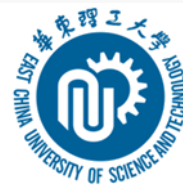
分类：颗粒活性炭和粉末活性炭；

物理吸附活性点：数量多、无极性、是吸附能力的主体部分；

化学吸附活性点：有机官能团、如羧基(-COOH)、羟基(-OH)等，使表面弱极性。

吸附剂的主要应用：废水中微生物难以降解的或用一般氧化法难于氧化的溶解性有机物；与生物处理过程复合，组成生物活性炭处理技术。 304

5.1 吸附-吸附剂类型、特点及再生



➤树脂吸附剂

新型有机吸附剂，立体网状结构，可在150 °C下使用，不溶于一般溶剂及酸、碱。

主要类型：

非极性、中极性、极性和强极性

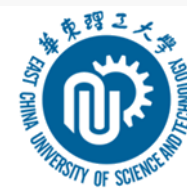
主要特点：

- ✓ 主要以物理吸附为主，可呈单分子层吸附，亦可呈多分子层吸附；
- ✓ 吸附能力接近活性炭，但比活性炭容易再生；
- ✓ 结构容易人为控制，因而它具有适应性大，应用范围广，吸附选择性特殊，稳定性高等优点，并且再生简单，多数为溶剂再生。

主要应用：

废水中微溶于水，极易溶于甲醇，丙酮等有机溶剂，分子量略大和带有极性的有机物，如脱酚、除油、脱色等。

5.1 吸附-吸附剂类型、特点及再生



➤再生类型:

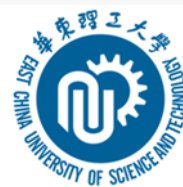
加热再生、药剂再生、化学氧化再生、湿式氧化再生、生物再生等。

➤选择再生方法须考虑因素:

溶质的理化性质、吸附机理、溶质的回收价值。

种 类		处 理 温 度	主 要 条 件
加 热 再 生	加热解吸 高温加热再生 (炭化再生)	100 ~ 200℃ 750 ~ 950℃ (400 ~ 500℃)	水蒸气、惰性气体 水蒸气、燃烧气体、CO ₂
药 剂 再 生	无机药剂 有机药剂 (萃取)	常温 常温 ~ 80℃	HCl、H ₂ SO ₄ 、NaOH、氧化剂、 有机溶剂(苯、丙酮、甲醇等)
生物再生 湿式氧化分解 电解氧化		常温 180 ~ 220℃, 加压, 常温	好气菌、厌气菌、O ₂ O ₂ 、空气、氧化剂 O ₂

5.1 吸附-吸附剂类型、特点及再生



➤ 药剂再生：

在饱和吸附剂中加入适当溶剂 ↘

改变体系亲水-憎水平衡，吸附剂与溶质间分子引力，改变介质介电常数。

└→ 吸附崩解，从而再生和回收。

➤ 再生药剂类型及应用：

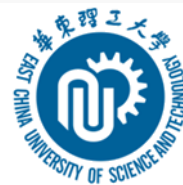
有机溶剂类型：苯、丙酮、甲醇、乙醇、异丙醇、卤代烷等；

有机溶剂应用：树脂吸附剂吸附酚类后，一般采用丙酮或甲醇解吸；

吸附TNT，采用丙酮解吸；吸附DDT类物，采用异丙醇解吸。

无机酸碱再生剂：活性炭吸附苯酚后可用热NaOH溶液再生，生成酚钠盐回收利用。

5.1 吸附-吸附剂类型、特点及再生



➤ 药剂再生操作原则：

能电离物质以分子形式吸附，以离子形式解吸：即酸性物质在酸里吸附，碱里解吸；碱性物质在碱里吸附，酸里解吸。

溶剂及酸碱用量应控制2~4倍吸附剂体积为宜。

解吸速度比吸附速度慢一倍以上。

➤ 热再生：

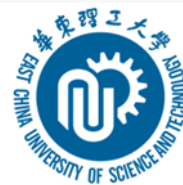
用外部加热方法，改变吸附平衡关系，达到解吸和分解的目的。

➤ 热再生类型及应用：

低温加热再生：适于吸附低分子碳氢化合物和芳香族有机化合物等

高温加热再生：适用于污水处理过程中酚、木质素、萘酚等与活性炭、结合牢固过程的再生

5.1 吸附-吸附剂类型、特点及再生



➤ 高温加热再生过程

脱水：活性炭和液体分离；

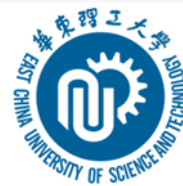
干燥：加热到 $100 \sim 130^{\circ}\text{C}$ ，蒸发细孔中水分，使低沸点有机物挥发；

炭化：升温至 $300 \sim 700^{\circ}\text{C}$ ，高沸点有机物热分解，一部分挥发，另一部分碳化留在细孔中；

活化：升温至 $700 \sim 1000^{\circ}\text{C}$ ，通入水蒸气、 CO_2 、 O_2 等，将微孔中炭化物分解为 CO 、 CO_2 、 H_2 等逸出，重新造孔；

冷却：活化后的活性炭用水急剧冷却，防止氧化。

5.5 吹脱与汽提



基本概念:

吸收的逆过程——**解吸**，使其中的溶解气体和易挥发溶质穿过气液界面，向气相转移的过程；

吹脱以空气、 CO_2 、 N_2 等为解吸剂；

汽提以水蒸汽为解吸剂。

汽提法适用范围:

脱除废水中的挥发性溶解物质，如挥发酚、甲醛、苯胺、硫化氢、氨等。

吹脱法适用范围:

去除废水中的 CO_2 、 H_2S 、 HCN 、 CS_2 等溶解性有毒气体；

吹脱可脱除原来存在于废水中的，和化学转化而形成的溶解气体。

吹脱和汽提基本理论:

气液相平衡和传质速度理论

5.5 吹脱与汽提

污染物与水沸点不同 \longrightarrow 挥发度不同 \longrightarrow 污染物从水中分离

两组分相对挥发度

$$\alpha_{AW} = \frac{P_A / X_A}{P_W / X_W}$$

污染物挥发度

$$V_A = \frac{P_A}{X_A}$$

水的挥发度

$$V_W = \frac{P_W}{X_W}$$

P_A : 污染物的蒸汽压

X_A : 污染物的摩尔浓度

P_W : 水的蒸汽压

X_W : 水的摩尔浓度

呈现汽相时

服从道尔顿定律

$$\alpha_{AW} = \frac{Y_A / X_A}{Y_W / X_W} = \frac{Y_A / Y_W}{X_A / X_W}$$

讨论

$\alpha > 1$: 污染物A易用汽提法分离

$\alpha = 1$: 污染物A在汽液两相中组成相同

$\alpha < 1$: 水比污染物A更易挥发, 不适用汽提。

$$\frac{Y_A}{X_A} = \alpha_{AW} \frac{Y_W}{X_W}$$

..... 废水为污染物A的稀水溶液, 故 Y_W/X_W 为一定值

$$\alpha_{AW} \frac{Y_W}{X_W} = K = \frac{Y_A}{X_A}$$

..... 挥发性化合物稀水溶液服从亨利定律的表示

研究表明: 温度越高, 气相A分压越大, 相对挥发度越大, 越利于汽提分离A。

5.5 吹脱与汽提

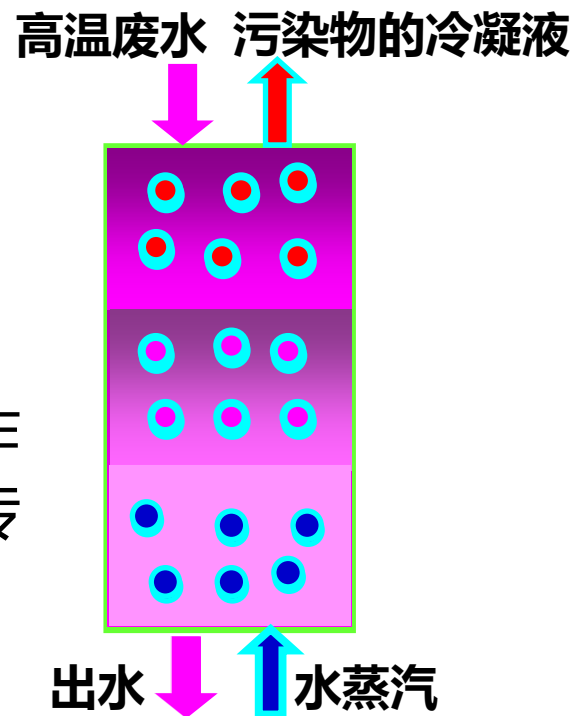
汽提分离过程

高温废水与水蒸汽对流进入汽提塔。

高温废水内污染物在水蒸汽加热作用下挥发为气态（水不挥发），传质进入水蒸汽气泡。

废水内污染物浓度降低，出水处浓度达最低。

水蒸汽气泡内污染物量升高，到塔顶端时，水蒸汽冷凝为液体，冷凝液中大量污染物被回收。



汽提分离过程的影响因素

➤ 温度对汽提过程的影响

影响汽提塔内温度三因素：

塔顶进水温度、塔底的汽提用蒸汽供热、塔身的热损失

进水温度范围90 ~ 95℃

温度过低： 污染物挥发不足，水蒸汽在塔内冷凝，
气/液传质弱，塔顶无冷凝，无法分离污染物；

温度过高： 污染物与水同时挥发，且蒸汽气泡大，
传质比表面积小，不利传质。

➤ 气水比(S/W)和凝水比(V/W)

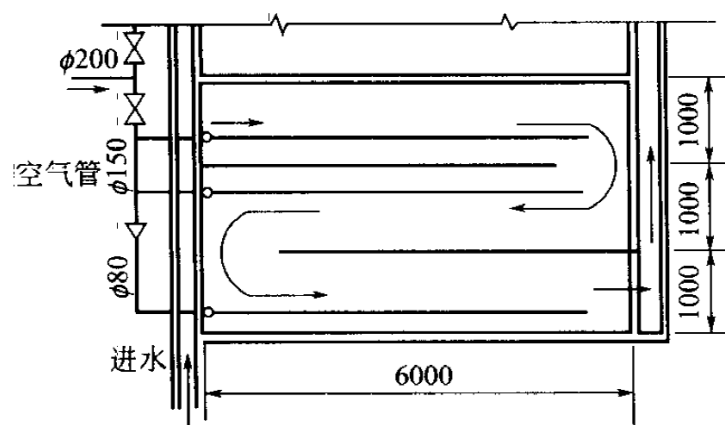
蒸汽量太大：塔内蒸汽冷凝量大，则稀释废水，降低传质推动力，减少传质HRT，经济上不利。

蒸汽量太小：废水加热不足，污染物挥发不够，汽提效果差。

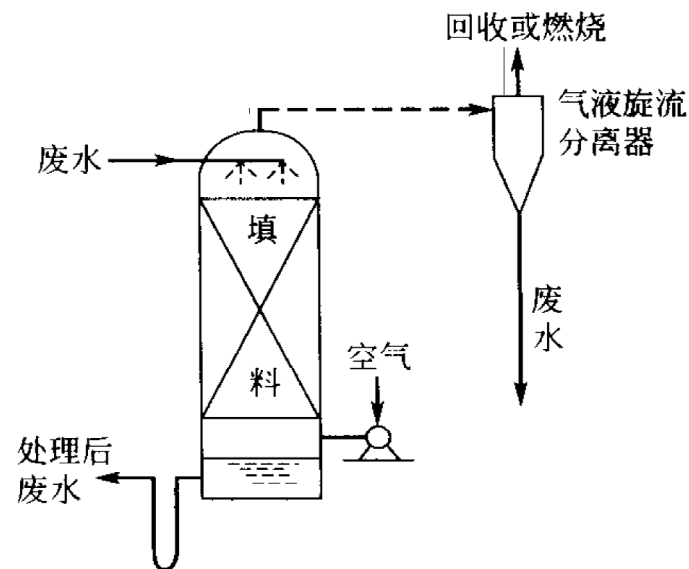
➤ 废水中挥发物浓度

➤ 汽提塔高（填料层高和空塔高度）

5.5 吹脱与汽提-吹脱的应用



折流式吹脱池（尺寸单位：mm）

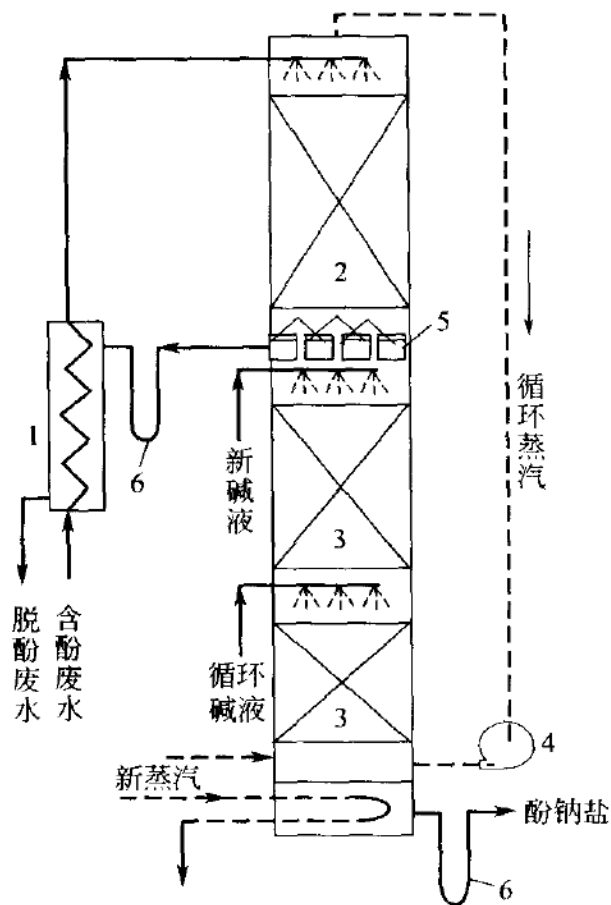


吹脱塔流程示意图

5.5 吹脱与汽提-汽提的应用

填料塔 (传统逆流结构)

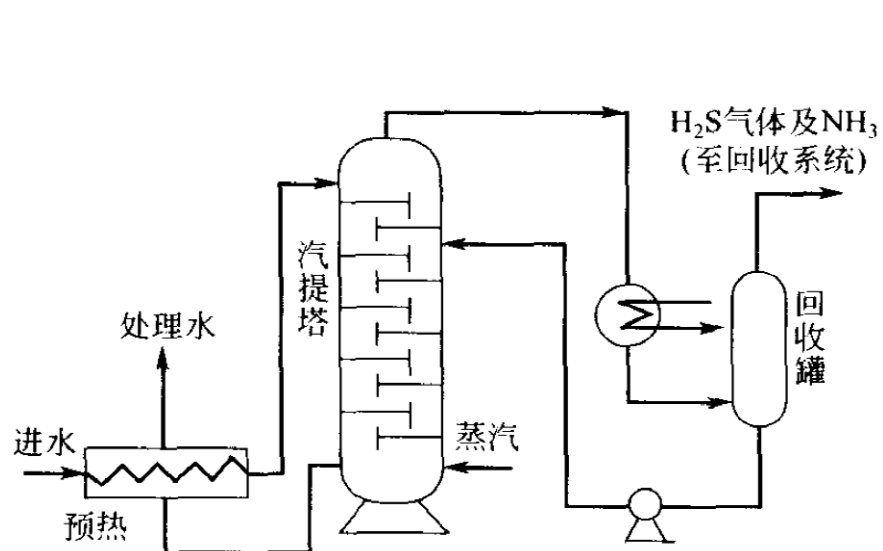
板式塔 (据塔板结构分为泡罩塔、浮阀塔和筛板塔)



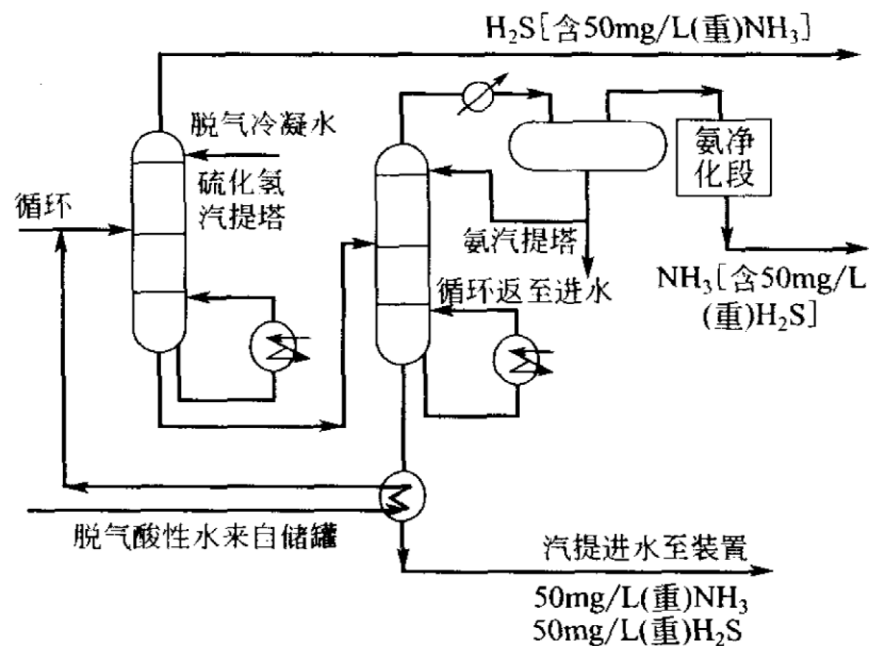
汽提法脱酚装置

- 1—预热器；2—汽提段；3—再生段；
4—鼓风机；5—集水槽；6—水封

5.5 吹脱与汽提-汽提的应用



蒸汽单塔汽提过程流程



双塔汽提废水处理（WWT 过程）流程

1. 什么叫吸附等温线?它的物理意义是什么?
2. 什么叫静态吸附和动态吸附?两者有何不同之处?
3. 如何绘制动态吸附的穿透曲线?它能为设计提供什么资料?
3. 吸附柱有几种运行方式?通常采用何种方式?为什么?
5. 比较固定床和流动床的优缺点?
6. 污水中哪些物质适宜用吹脱过程去除?对某些盐类物质, 如NaCl、KCN等, 能否用吹脱过程去除?需采取什么措施?
7. 影响吹脱的因素有哪些?为什么?如何控制不利的因素来提高吹脱效率?
8. 什么情况下需要回收吹脱出来的挥发性物质?回收过程有哪些?
9. 汽提过程主要用于处理哪些污水?
10. 汽提过程处理含酚废水有哪些特点?