

## 第1章 总论

### 1.1 天然水资源及其循环

### 1.2 水体污染

### 1.3 水体污染控制

## 第2章 水污染控制工程的理论基础

### 2.1 反应过程动力学

### 2.2 物料衡算

### 2.3 反应器及其选择

## 第3章 废（污）水物理处理过程

### 3.1 水量与水质的调节

### 3.2 隔滤与离心分离

### 3.3 沉降（淀）

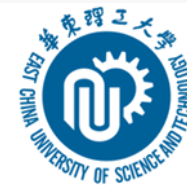
### 3.4 气浮

### 3.5 隔油

## 第4章 废（污）水化学处理过程

### 4.1 中和

# 2.1 反应过程动力学



## ➤ 反应速率

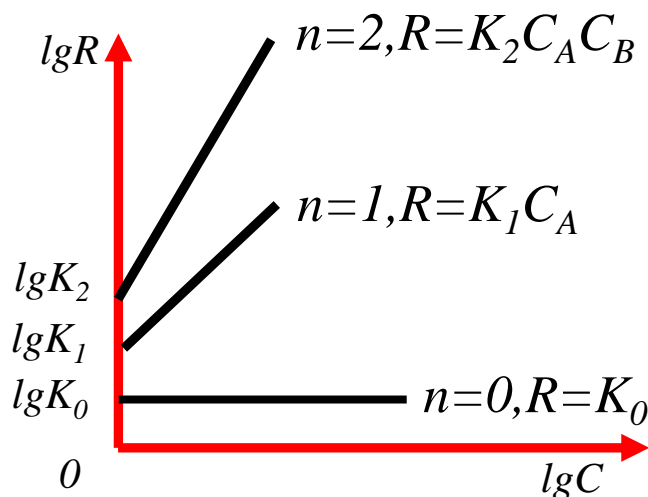
单位体积、单位时间反应物或产物的数量变化

$$R = \frac{1}{V} \frac{dN}{dt} = \frac{1}{V} \frac{VdC}{dt} = \frac{dC}{dt}$$

## ➤ 反应级数

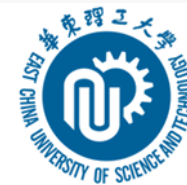
反应速率与反应物浓度之间的定量关系，可表示为：

$$R = KC^n \quad \text{or} \quad \lg R = \lg K + n \lg C$$



😊 生物处理混合废水时的反应，通常不是整数级反应

## 2.1 反应过程动力学



### ➤ 基元反应

在化学反应方程式中，**反应物分子式的系数之和即为反应级数**



若**反应速率** $R_p = K_I C_A^x C_B^y$ ，则**反应级数** $= x + y$

### ➤ 非基元反应

反应级数无法由反应方程式中反应物分子式系数直接判断得出



若**反应速率** $R_p = (K_I C_A^x C_B^y) / (K_2 + C_P / C_B)$ ，**反应级数** $\neq x + y$

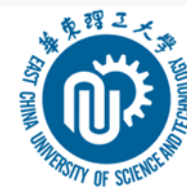
### ➤ 均相反应

在同一相中进行的化学反应，反应物与产物等无界面

### ➤ 非均相反应

化学反应在两个以上的相内或相界面上进行

# 2.1 反应过程动力学



均相反应或非均相反应

简单反应

可逆

单分子



双分子



不可逆

单分子



双分子

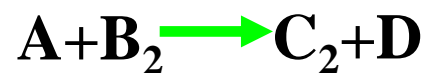


复杂反应

连串反应



系列平行反应

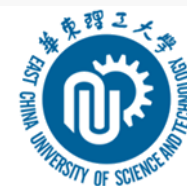


.....

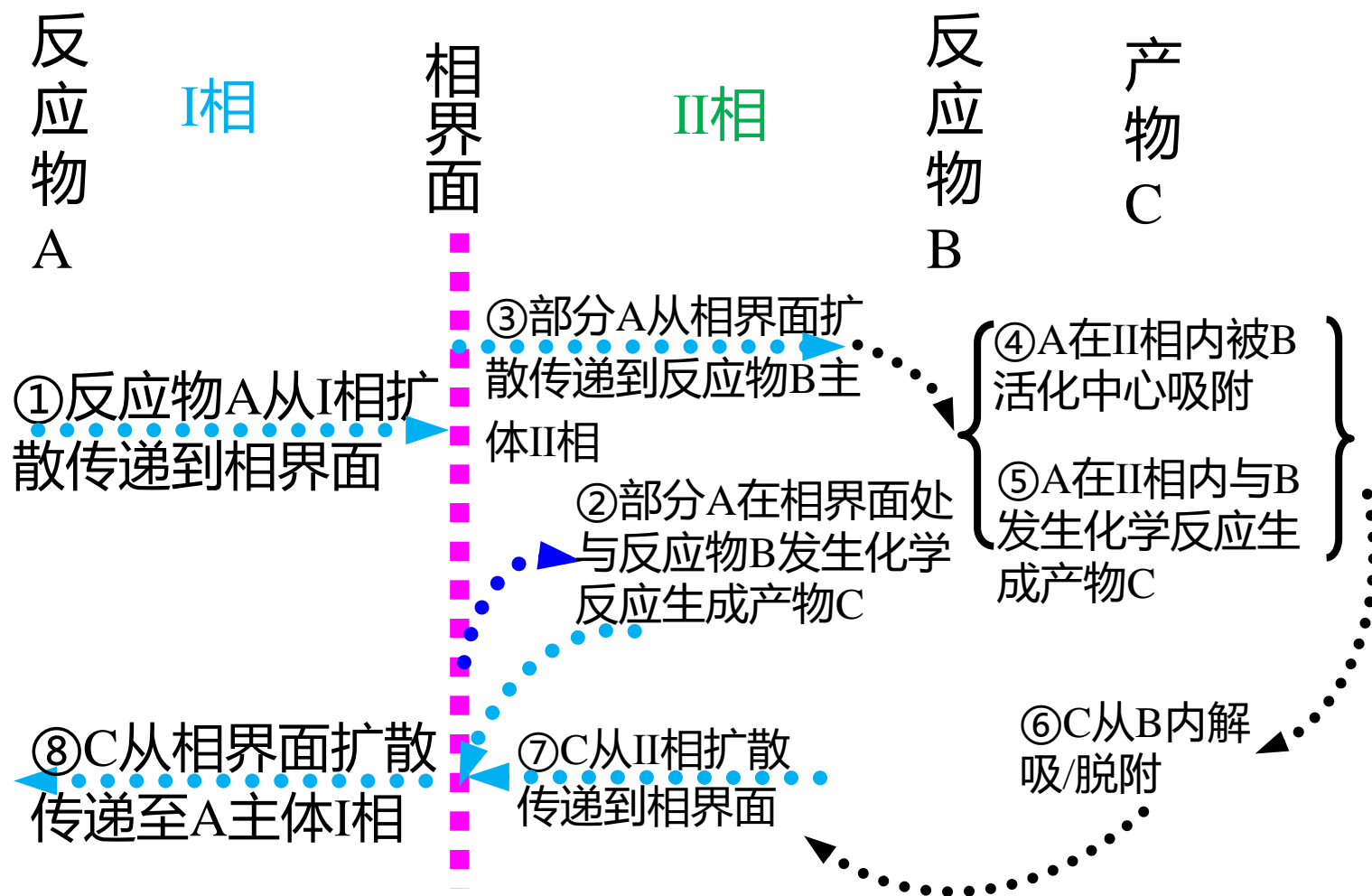
准稳态反应



## 2.1 反应过程动力学

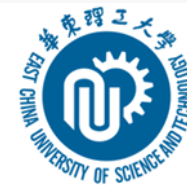


### 非均相反应模式示意图



🕒 最慢一步决定非均相反应速率：化学反应速率  $\gg$  扩散传输速率

# 2.1 反应过程动力学



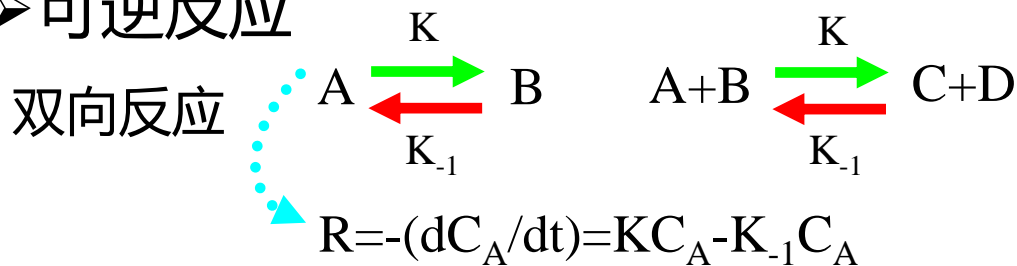
## ➤ 伪一级反应

反应物A与B,  $C_{B0} > 20 \cdot C_{A0}$ , 可视 $C_{B0}$ 为常数, 则

$$R = K_2 C_A C_B = K_1 C_A$$

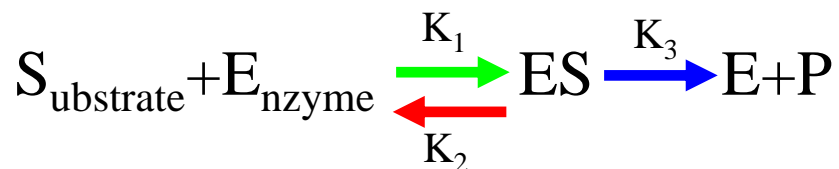
(水的浓度远大于底物浓度)

## ➤ 可逆反应



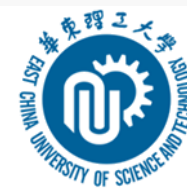
## ➤ 准稳态反应

运输载体、催化转化、复合体ES不积累

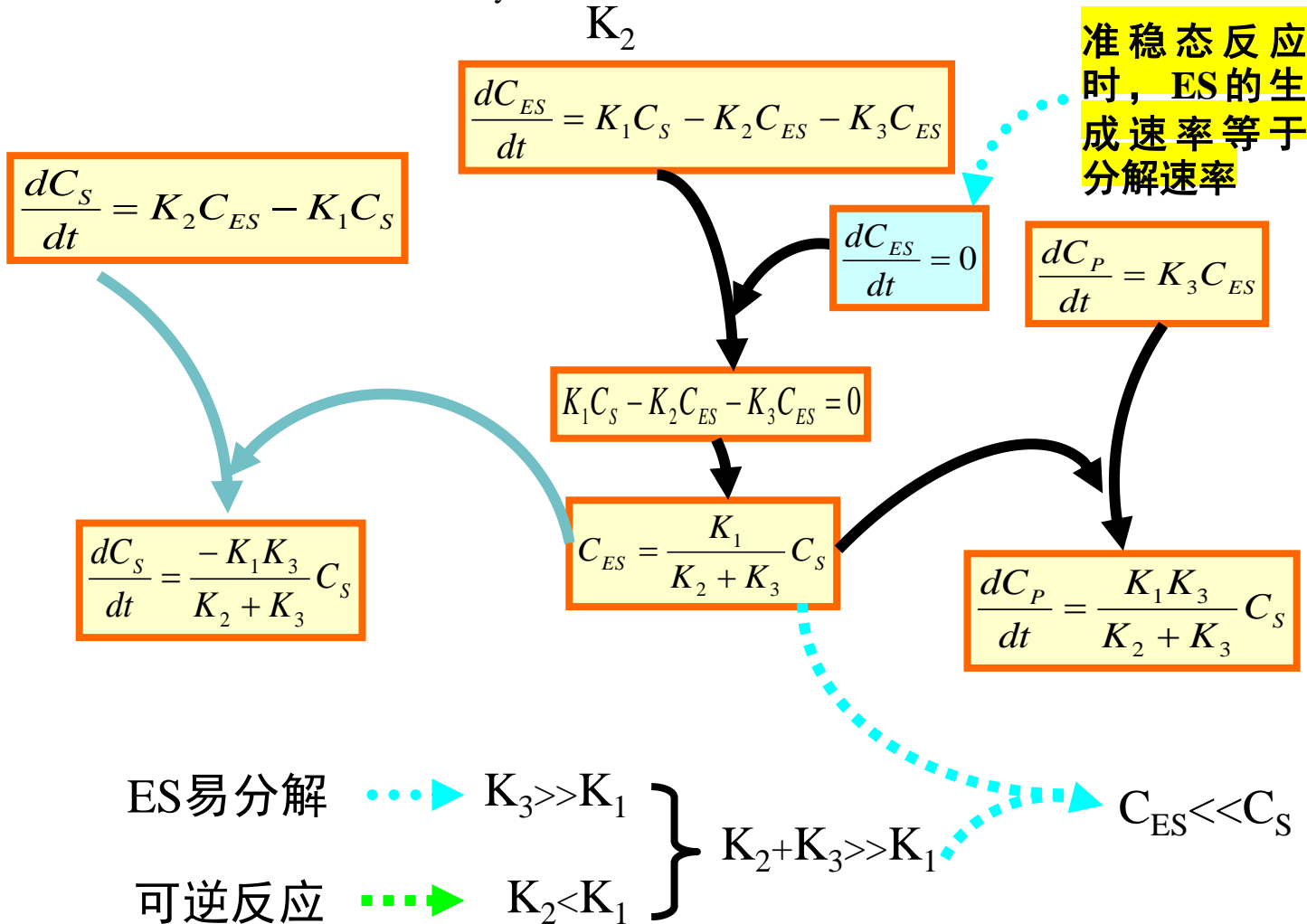
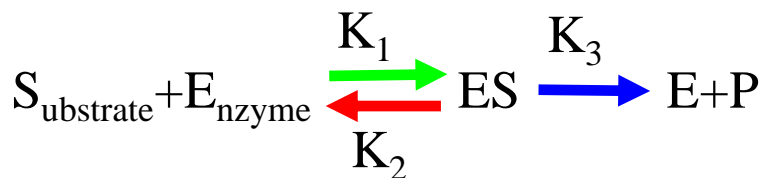


伪一级准稳态反应 and 二级准稳态反应

# 2.1 反应过程动力学

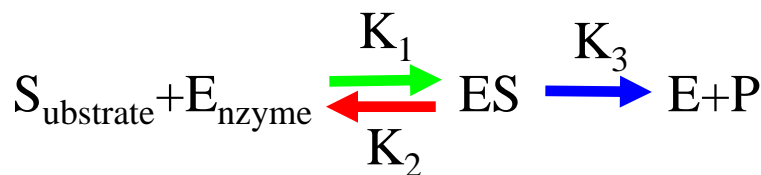


## 准稳态伪一级反应特性探讨



# 2.1 反应过程动力学

由准稳态二级反应推导米门方程



$$\frac{dC_{ES}}{dt} = K_1 C_S C_E - (K_2 + K_3) C_{ES}$$

$$\frac{dC_S}{dt} = K_2 C_{ES} - K_1 C_E C_S$$

$$\frac{dC_{ES}}{dt} = 0$$

准稳态反应时，ES的生成速率等于分解速率

$$\frac{C_S C_E}{C_{ES}} = \frac{K_2 + K_3}{K_1} = K_m$$

$$[E_t] = C_E + C_{ES}$$

$$\frac{dC_S}{dt} = -K_3 C_{ES} = \frac{dC_P}{dt}$$

$$C_{ES} = \frac{[E_t] C_S}{K_m + C_S}$$

$$R_{\max} = K_3 [E_t] = K_3 (C_E + C_{ES})$$

$$-\frac{dC_S}{dt} = \frac{K_3 [E_t] C_S}{K_m + C_S}$$

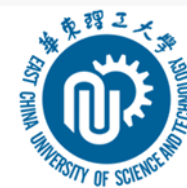
$$R = \frac{-dC_S}{dt} = \frac{R_{\max} C_S}{K_m + C_S}$$

令  $R=V$ 、 $R_{\max}=V_{\max}$ 、 $C=[S]$ 、 $C_{\max}=[S]_{\max}$

$$V = \frac{V_{\max} [S]}{K_m + [S]}$$



# 2.1 反应过程动力学

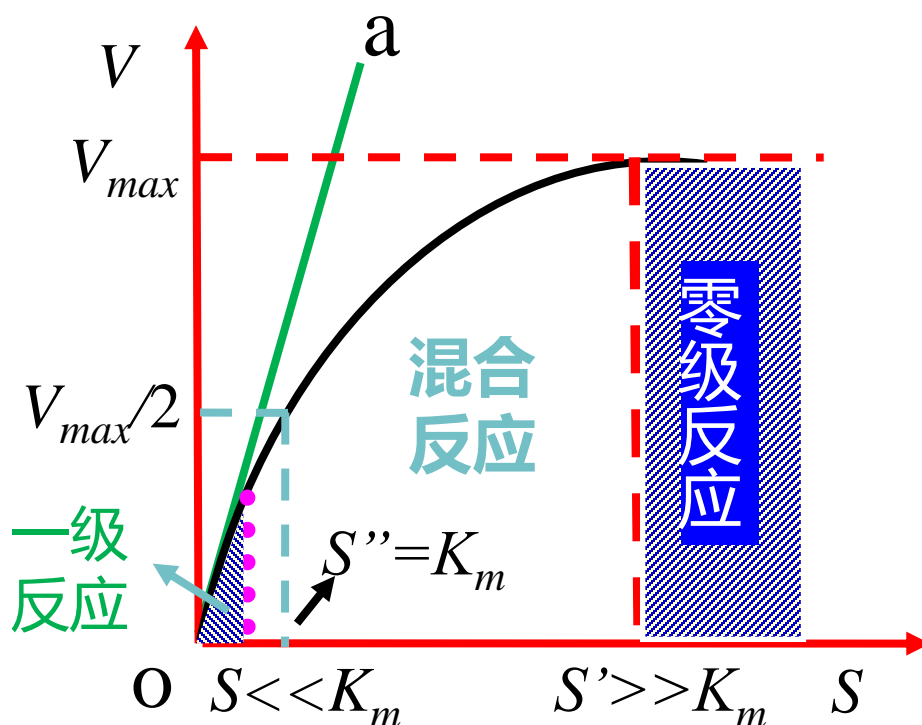


## 米-门方程特性曲线分析

➤一级反应

$S \ll K_m$ , 则

$$V = \frac{V_{\max}}{K_m} [S]$$



➤零级反应

$S' \gg K_m$ , 则

$$V = V_{\max}$$

➤混合反应

$$V = \frac{V_{\max} [S]}{K_m + [S]}$$

底物分解速率与底物浓度关系图

### ➤ 物料衡算概念

计算物质通过处理系统前后的变化情况

### ➤ 物料衡算的前提和考虑的要素

前提：物质在整个系统中变化前后的质量守恒性质

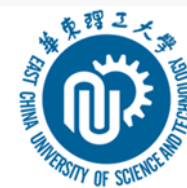
要素：物料、系统

### ➤ 物料衡算考虑的变化范围

物理：物料流入流出引起物料变化	{	流入模式	间断流or连续流
		流体系统	稳态流or非稳态流

化学：化学反应引起物料变化

## 2.2 物料衡算-不同系统的基本特性



### ➤ 间断流与连续流

间断流  $\longrightarrow$   $Q = 0$

连续流  $\longrightarrow$   $Q = C$

### ➤ 稳态与非稳态流体系统

稳态流  $\longrightarrow$  流入量=流出量  $\longrightarrow$   $\frac{dC_A}{dt} = 0$

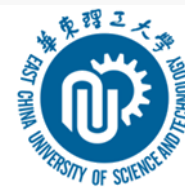
非稳态流  $\longrightarrow$  流入量 $\neq$ 流出量  $\longrightarrow$   $\frac{dC_A}{dt} \neq 0$

### ➤ 单组分与多元系统

单组分系统：系统中物料由单一组分组成

多元系统：系统中存在复杂组分，或复杂的化学反应

## 2.2 物料衡算-不同系统的物料衡算



### ➤ 单一组分、无化学反应系统

物质在系统内积累率=流入系统的质量输入率-流出系统的质量输出率

Diagram showing a system  $V$  with input flow  $Q_1, C_{A1}$  and output flow  $Q_2, C_{A2}$ . The accumulation rate equation is:

$$V \frac{dC_A}{dt} = Q_1 C_{A1} - Q_2 C_{A2}$$

### ➤ 多元组分、无化学反应系统

各物质在系统内积累率之和=流入系统各物质质量输入率之和-流出系统各物质质量输出率之和

Diagram showing a system  $V$  with input flow  $Q_{i1}, C_{i1}$  and output flow  $Q_{i2}, C_{i2}$ . The accumulation rate equation for component  $i$  is:

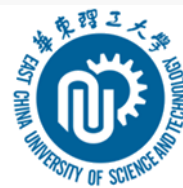
$$V \frac{dC_i}{dt} = Q_{i1} C_{i1} - Q_{i2} C_{i2}$$

Let  $x_i = \frac{C_i}{C}$

The overall accumulation rate equation for the system is:

$$\sum_{i=1}^n Q_{i2} X_{i2} - \sum_{i=1}^n Q_{i1} X_{i1} + V \sum_{i=1}^n \frac{dX_i}{dt} = 0$$

## 2.2 物料衡算-系统存在化学反应的物料衡算



组分在控制体内的**积累率** = 组分流入控制体的质量**输入率** - 组分流出控制体的质量**输出率** + 组分在化学反应中的**变化率**

进流和出流速率各为常数  
各组分在控制体内不挥发

各组分在控制体内混合均匀  
存在的化学反应为一级反应

化学反应产物无积累

$$V \frac{dC_i}{dt} = QC_{i0} - QC_i + V(-K_i C_i)$$

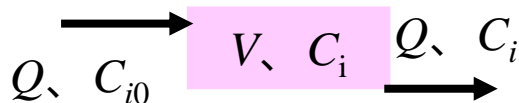
化学反应产物有积累

$$V \frac{dC_i}{dt} = QC_{i0} - QC_i + V(-K_i C_i) + VK_j C_j$$

n个组分 ↓ m个产物

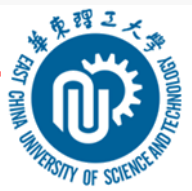
$$V \left( \sum_{i=1}^n \frac{dC_i}{dt} \right) = \sum_{i=1}^n QC_{i0} - \sum_{i=1}^n QC_i + V \sum_{i=1}^n (-K_i C_i) + V \left( \sum_{j=1}^m K_j C_j \right)$$

间歇过程or间断流中,  $Q=0$



$$\frac{dC}{dt} = \sum_{i=1}^n (-K_i C_i) + \sum_{j=1}^m K_j C_j$$

## 2.2 物料衡算-单组分稳态流系统有化学反应的物料衡算



稳态流、单组分系统中，有  $\frac{dC}{dt} = 0$

有化学反应的单组分系统中，有  $V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC + V(-KC)$

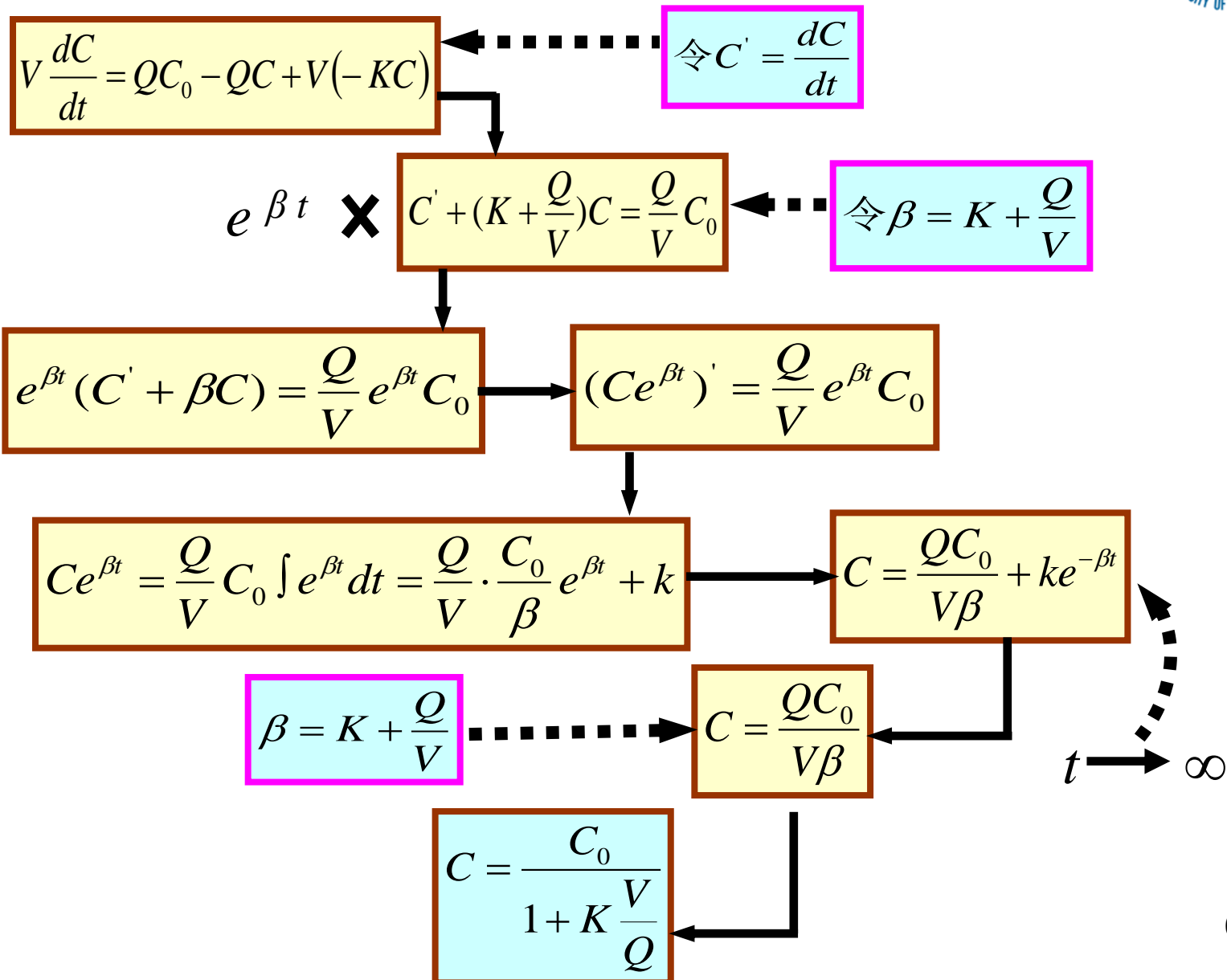
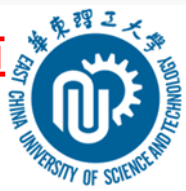
$$V \frac{dC}{dt} = QC_0 - QC + V(-KC) = 0$$

$$VKC + QC = QC_0$$

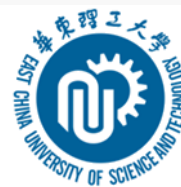
$$C(VK + Q) = QC_0$$

$$C = \frac{QC_0}{VK + Q} = \frac{C_0}{1 + K \frac{V}{Q}}$$

## 2.2 物料衡算-单组分非稳态流系统有化学反应的物料衡算



## 2.2 物料衡算-总结



在其他条件（组分、有无化学反应、反应级数等）均相同的前提下，稳态流与非稳态流两个不同系统中浓度的变化是相同的。

$$C = \frac{C_0}{1 + K \frac{V}{Q}}$$

稳态系统注重考察结果，中间过程无变化；非稳态系统注重考察过程，可考察过程中某点的变化情况。

过程终点，稳态和非稳态对浓度的变化是没有影响的。

为简化计算过程，水污染控制工程系统往往作稳态系统考虑来进行工程计算。



### 反应器是废水处理的主要容器

处理对象：废水中的各种污染物质(底物Substrate)

主体物：药剂、细菌、微生物

变化过程：物理、化学、物理化学、生物化学

限制因素：反应动力学、流体力学、处理效果

### 废水处理反应器的一般特征

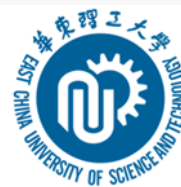
体 积 大 - 底物浓度低、水量大

常 温 常 压 - 水量大

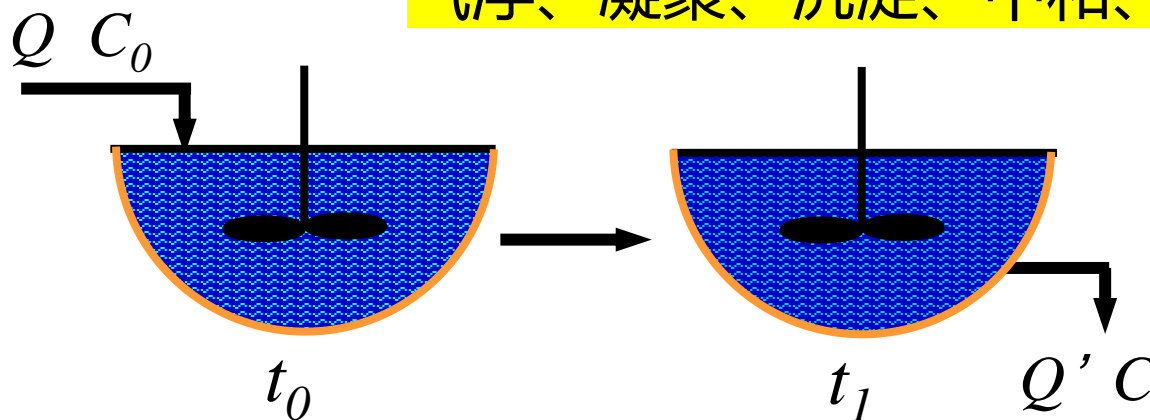
反应效率高 - 化工生产不一定有此要求

材质防腐蚀 - 同化工生产要求材质耐酸、耐碱及生物腐蚀

## 2.3 反应器及其选择-间歇式反应器一般特性描述



气浮、凝聚、沉淀、中和、SBR...

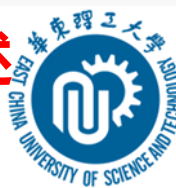


### 间歇式反应器特性描述

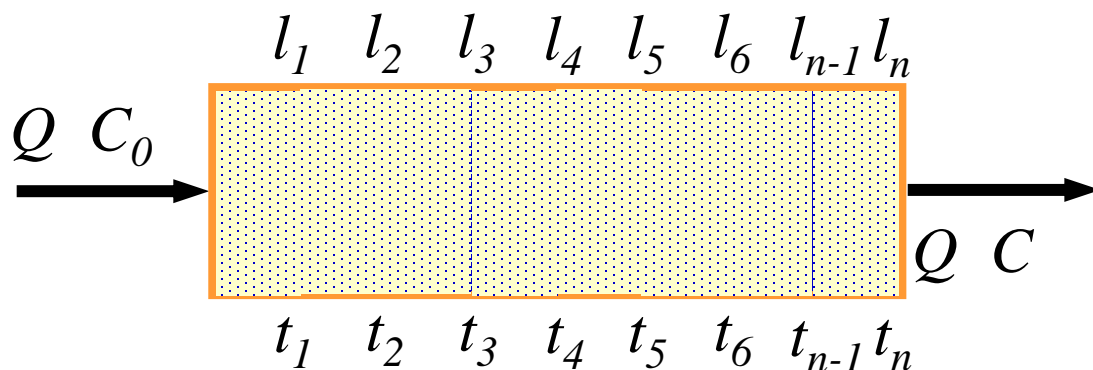
- 物料一次性加入，经过 $t_0$ 到 $t_1$ 时间后，将物料一次性同时排出
- 对反应物和产物而言  $(\frac{\partial C}{\partial V})_t = 0$  ;  $\frac{dC}{dt} \neq 0$  ; 反应器内温度一致
- 因不同时刻反应物浓度不同，反应速率随时间变化而不同
- 物料衡算(一级反应)反应器内 $i$ 组分变化= $i$ 组分反应速率

则：  $V(\frac{dC_i}{dt}) = V(-K_i C_i)$  ■■■  $t = -\frac{1}{K_i} \ln \frac{C_i}{C_0}$

## 2.3 反应器及其选择-活塞流式反应器一般特性描述



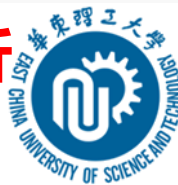
推流式曝气池、接触消毒池、沉降池...



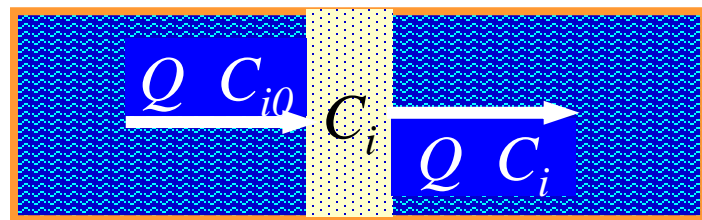
### 活塞流式反应器特性描述

- 物料依次、均匀、连续地流经反应器,无轴向扩散(返混)
- 物料中任何组分在反应器中停留时间都一致, 为  $t_T = \frac{V}{Q}$
- 反应时间  $t$  • 反应速度  $r$  • 物料浓度  $C_A = f(l)$ ,  $l$  为反应器长度
- 一级反应速率反应器内  $i$  组分反应速率  $r = \left(\frac{\partial C}{\partial t}\right)_i = -kC_i$

## 2.3 反应器及其选择-活塞流式反应器物料衡算分析



$i$  组分通过反应器 $dx$ 长度(流速 $v_x$ )的物料衡算为



$dx$

$$V \frac{dC_i}{dt} = Q(C_{i0} - C_i) + V(-K_i C_i)$$

$$Q = \frac{V}{t}$$

and

$$t = \frac{dx}{v_x}$$

→

$$Q = \frac{V}{dx} \cdot v_x$$

$$C_{i0} - C_i = dC_i$$

连续流为稳流系统, 则

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = 0$$

$$\frac{dC_i}{dt} = -v_x \frac{dC_i}{dx} - K_i C_i$$

$$\int_0^l \frac{dx}{v_x} = \int_{C_{i0}}^{C_i} -\frac{dC_i}{K C_i}$$

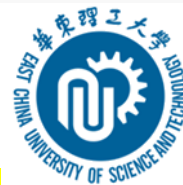
$$0 = -v_x \frac{dC_i}{dx} - K_i C_i$$

$$\frac{l}{v_x} = t_T = -\frac{1}{K} \ln \frac{C_i}{C_{i0}}$$

$$t_T = \frac{V}{Q}$$

$$\frac{l}{v_x} = t_T = \frac{V}{Q} = -\frac{1}{K} \ln \frac{C_i}{C_{i0}}$$

## 2.3 反应器及其选择-完全混合式反应器特性描述



完全混合式曝气池、曝气氧化塘...

### ●完全混合式反应器特性

➤物料在反应器内连续流动、均匀搅拌、混合充分

$$\frac{dC}{dt} = 0$$

➤反应器内任一点反应速率相同

$$r = -KC_i \quad (\text{一级反应})$$

➤出水底物浓度等于反应器内任一点浓度  $C_i$

➤物料中任一组分在反应器内停留时间可在  $0 \rightarrow \infty$  范围变化，即不同部分物料停留时间不同，以平均停留时间  $\bar{t}$  描述

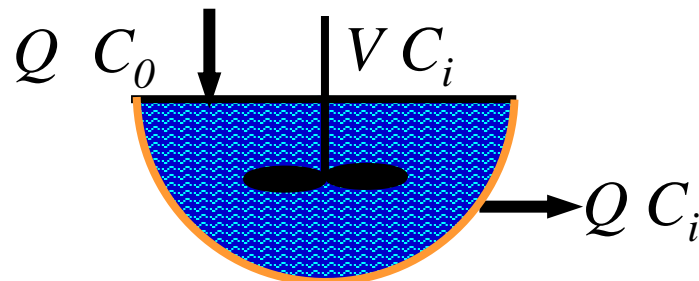
### ●物料衡算(一级反应):

稳态条件时

$$\frac{dC_i}{dt} = 0$$

$$V \frac{dC_i}{dt} = Q(C_{i0} - C_i) + V(-K_i C_i)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{K} \left( \frac{C_{i0}}{C_i} - 1 \right)$$

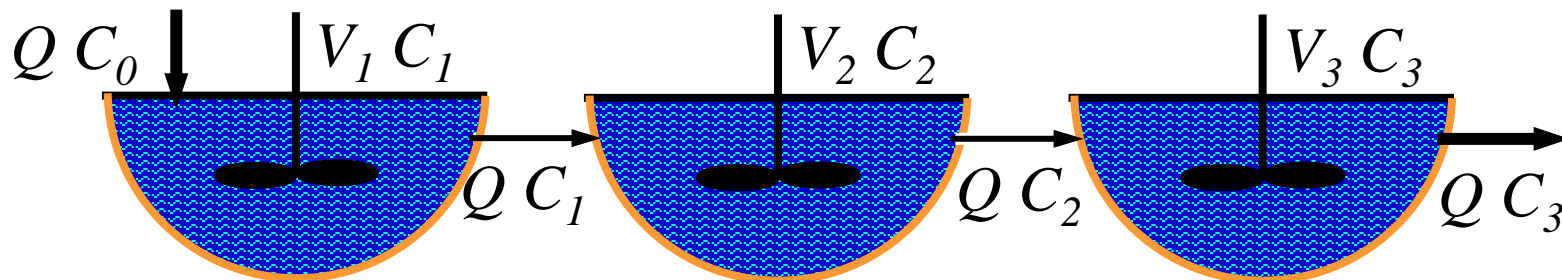


## 2.3 反应器及其选择-随意流式反应器一般特性描述



### 活塞流与完全混合流的混合

or 多级串连完全混合流反应器



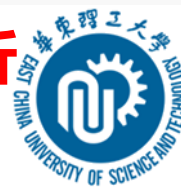
### ● 随意流式反应器特性描述

- 物料连续地流经反应器，活塞流动叠加轴向扩散
- 不同部分物料停留时间不同，受限于反应器长度、流体线速度和扩散过程
- 任一组分物料浓度及反应速率随所处位置和停留时间而不同

浓度差



## 2.3 反应器及其选择-随意流式反应器物料衡算分析



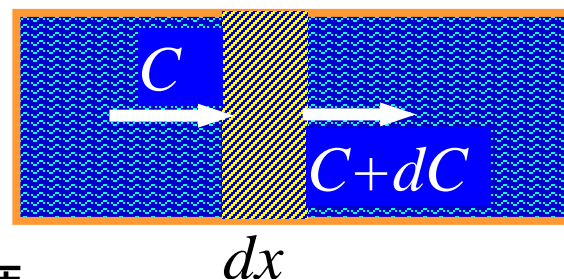
### ●物料衡算

反应器内组分*i*在活塞流物料衡算基础上附加轴向扩散

按菲克定律轴向扩散表示为

轴向扩散量  $\leftarrow N = -D_x \left( \frac{dC}{dx} \right) \rightarrow$  轴向浓度梯度

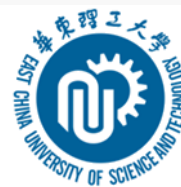
轴向扩散系数



随意流反应器中，组分*i*物料衡算为(一级反应)

$$V \frac{\partial C_i}{\partial t} = Q(C_{i0} - C_i) - V \cdot (K_i C_i) + V \frac{\partial N_i}{\partial t} \rightarrow \frac{\partial C_i}{\partial t} = -v_x \frac{\partial C_i}{\partial x} - K C_i + \frac{\partial N_i}{\partial t}$$

## 2.3 反应器及其选择-填充床反应器一般特性描述



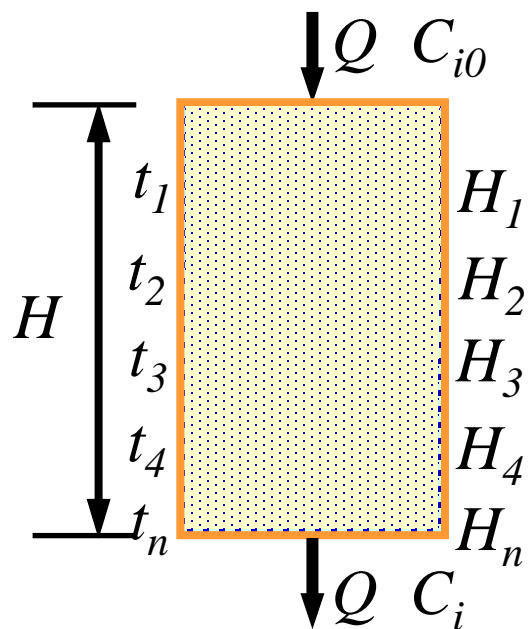
活性炭吸附柱、生物滤池...

### 填充床反应器特性描述

- 连续流,理论上呈活塞流
- 床层充满固定不动的介质,床层内发生非均相反应
- 床层内流体和流出液中某组分浓度随时间  $t$  和高度  $H$  而变,故:

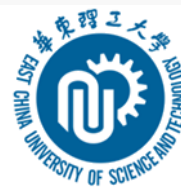
$$(C_i)_{\text{床层内流体}} = f(t, H); (C_i)_{\text{固相}} = f(t, H); (C_i)_{\text{流出液}} = f(t)$$

填充床反应器物料衡算随过滤、吸附、离子交换等过程不同而不同



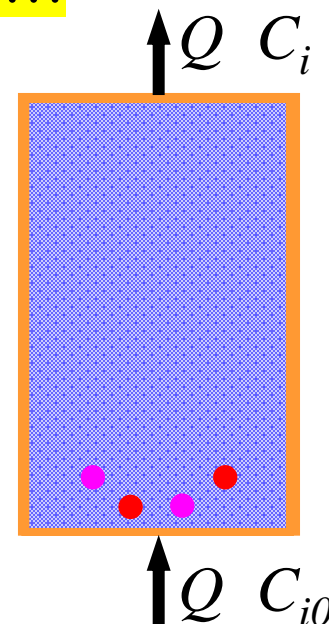


## 2.3 反应器及其选择-沸腾床反应器一般特性描述



### 沸腾床反应器

流化床...



- 连续流，理论上完全混合流
- 床层内介质不固定，固、液or气相在床层内均匀相对运动，床层内为非均相反应
- 相间接触界面比其他反应器大，传质、传热效率高，废水处理效率高or底物负荷高
- 流出相内物料浓度与反应器内每一点浓度相同
- 物料在反应器内浓度变化随时间 $t$ 而变，不随床层高度而变，同完全混合反应器
- 物料衡算基本同完全混合反应器，主要区别在于填充介质亦与流体一同流出，与填充床类似，要考虑物料在相间分配

### 反应器内流体流动的类型

- 理想的不完全混合流动和完全混合流动、任意流动
- 实际工程中：反应器容积大，死角、短路流、沟流等

**总停留时间：**水力停留时间 + 化学反应时间

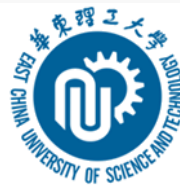
物料进入反应器后，在反应器内流动和进行化学反应所需时间，流体在反应器内无化学反应时，

$$t = \frac{V}{Q}$$

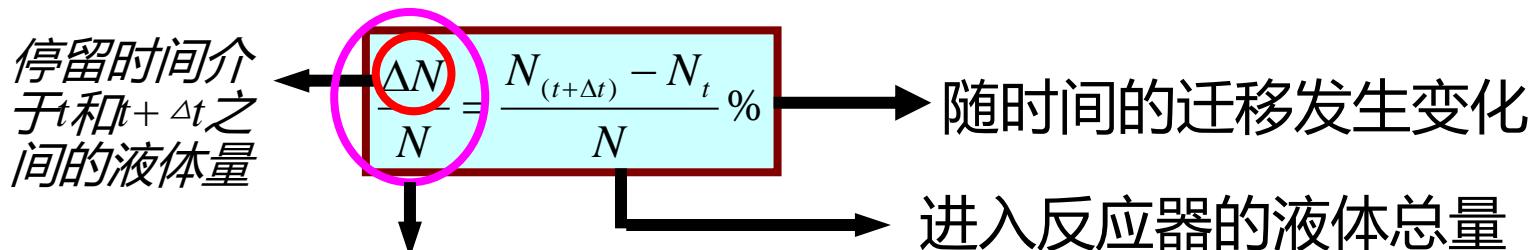
### 停留时间分布

组成流体的无数微元在反应器的停留时间皆不同(理想活塞流例外)，停留时间分布情况反映流体流动类型

## 2.3 反应器及其选择-反应器的水力学特性



### 停留时间分布密度函数or液龄分布函数



停留时间介于  $t$  和  $t + \Delta t$  之间的液体量占最初流入量的分率

#### 停留时间分布密度函数定义:

停留时间介于  $t$  和  $t + dt$  之间流出反应器的流体占最初流入量的分率

$dt \rightarrow 0$  时, 图中长方形越来越多, 连接各点得曲线, 为停留时间分布密度曲线:

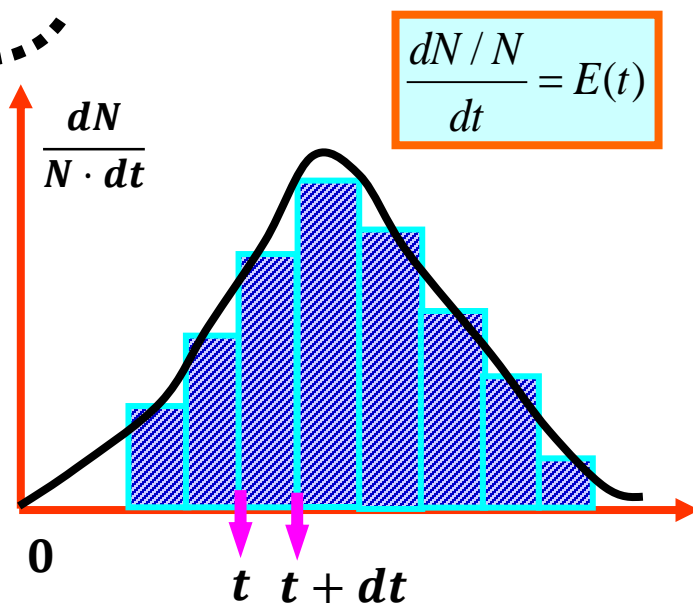
$$E(t) \sim t$$

$$\frac{\Delta N}{N} = \int_{t_1}^{t_2} \frac{dN}{N} = \int_{t_1}^{t_2} E(t) dt$$

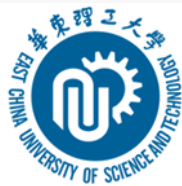
$$\frac{\Delta N}{N} = \int_0^{\infty} E(t) dt = 1$$

曲线下面积为1

全部分率的总和恒等于1



## 2.3 反应器及其选择-反应器的水力学特性



### 累计停留时间分布函数or累计液龄分布函数:

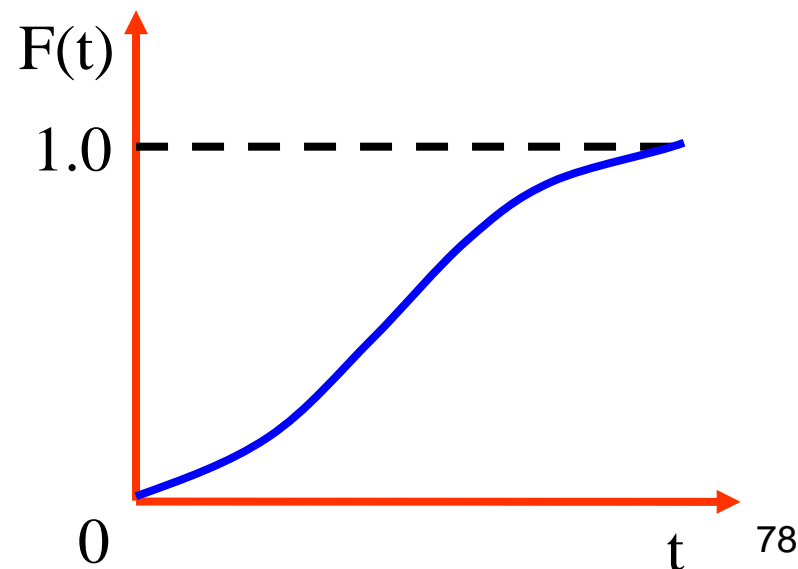
函数 $E(t)dt$ 在 $0 \sim t$ 的变化, 即计算从 $0 \sim t$ 的累积分数, 反映反应器内液体停留时间由 $0 \sim t$ 的累积分布状况。

$$F(t) = \int_0^t E(t)dt = \frac{\Delta N}{N}$$

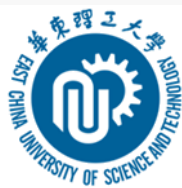
$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt}$$

$$F(t)_{t \rightarrow \infty} = \int_0^{\infty} E(t)dt = 1$$

即 $F(t)$ 最大值为1.0, 故右图中的纵坐标最高值为1.0

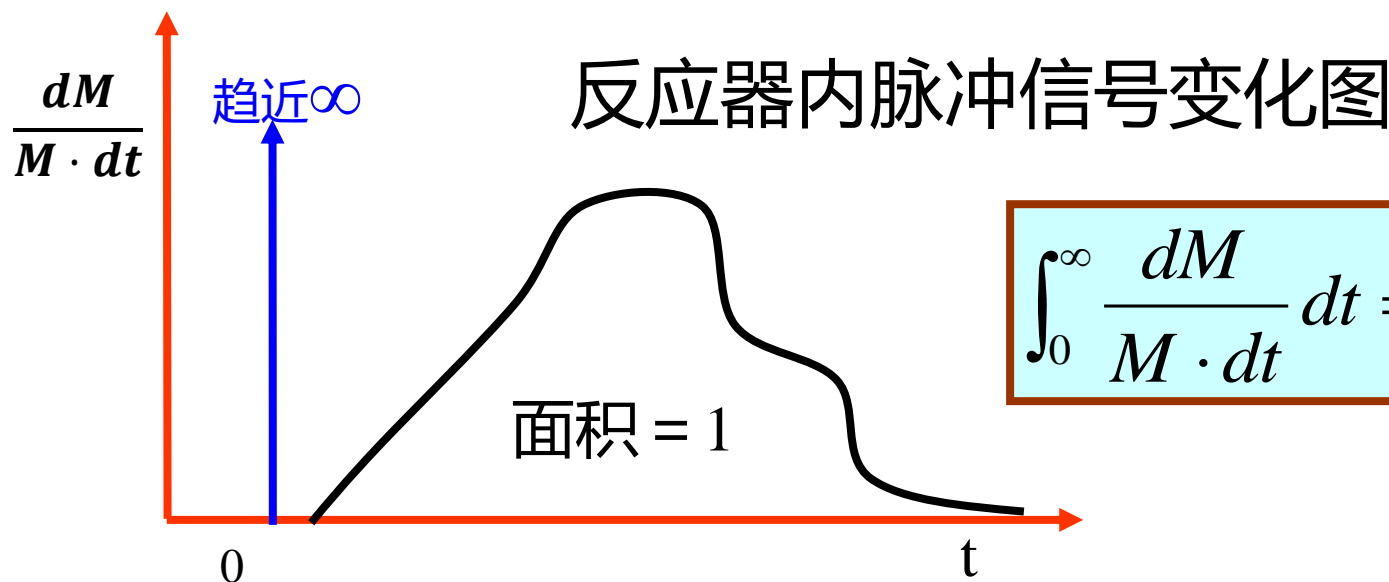
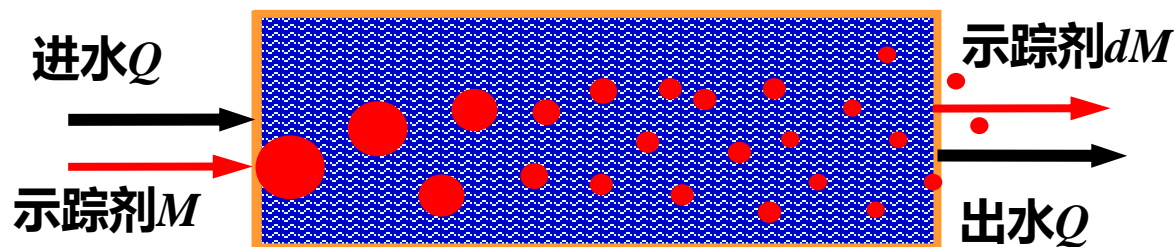


## 2.3 反应器及其选择-反应器的水力学特性

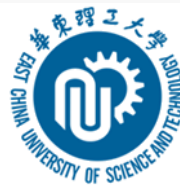


### 停留时间分布密度函数的测定

#### 脉冲示踪物信号法 与 连续示踪信号法

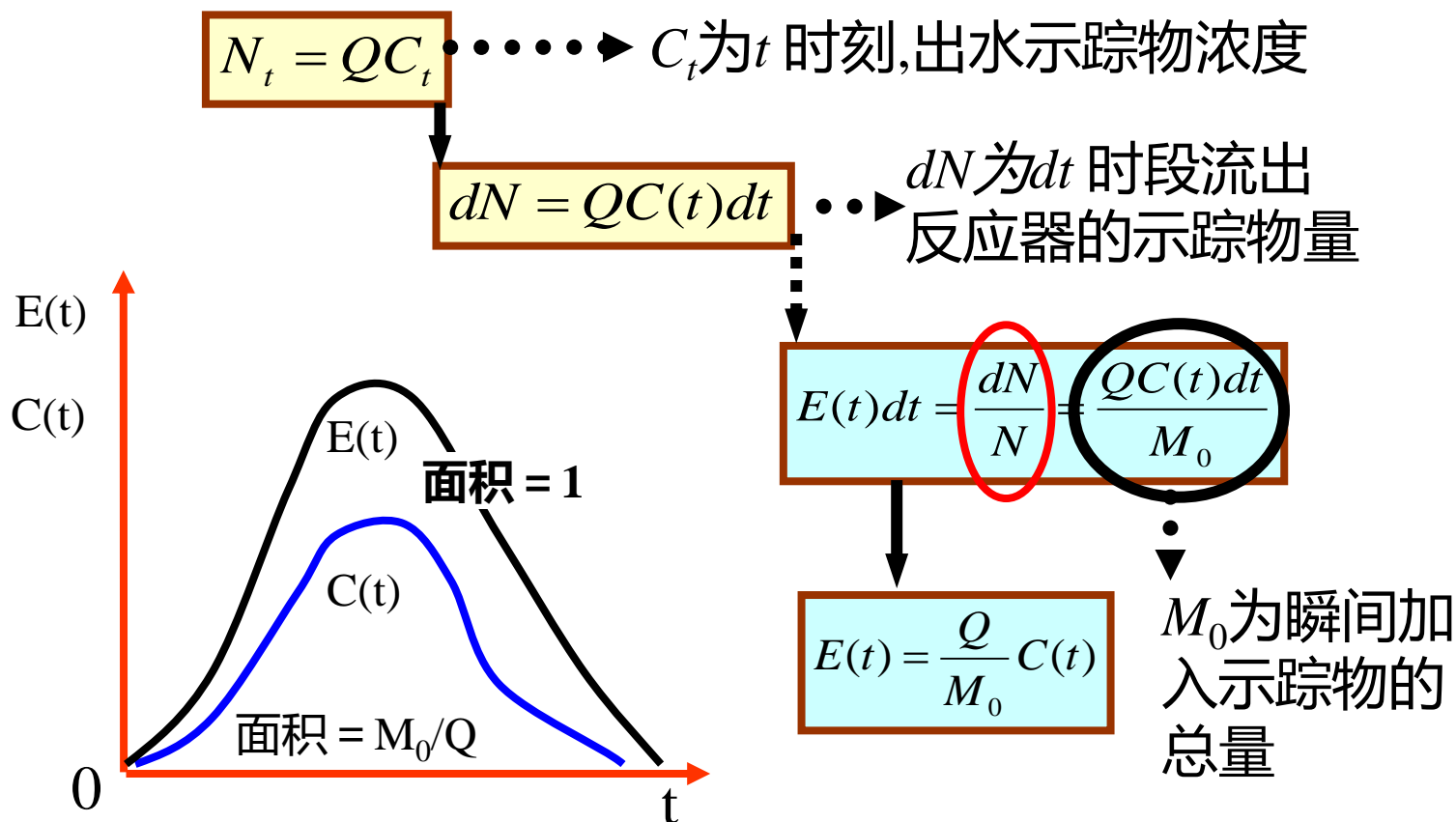


## 2.3 反应器及其选择-反应器的水力学特性



### 连续流停留时间的一般描述

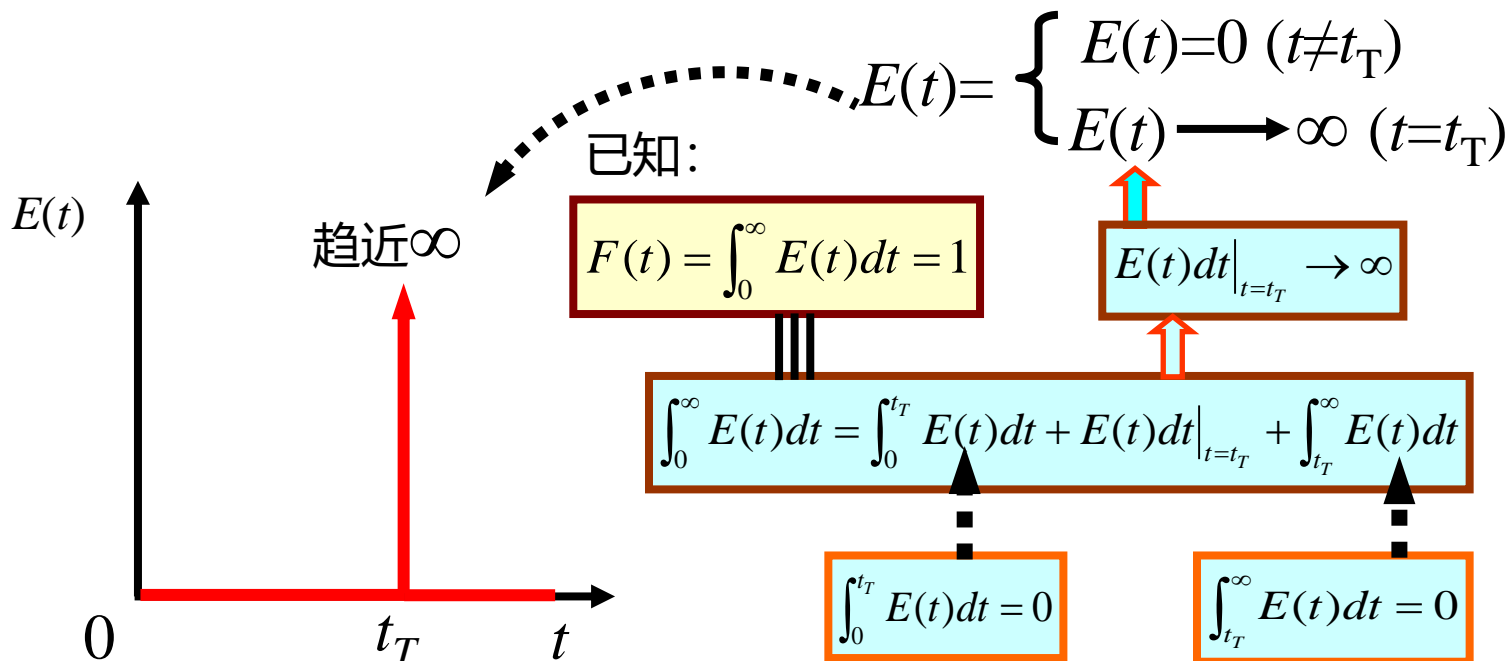
$t$  时刻,  $Q$  流量出水内示踪物总量



### 无化学反应的活塞流反应器

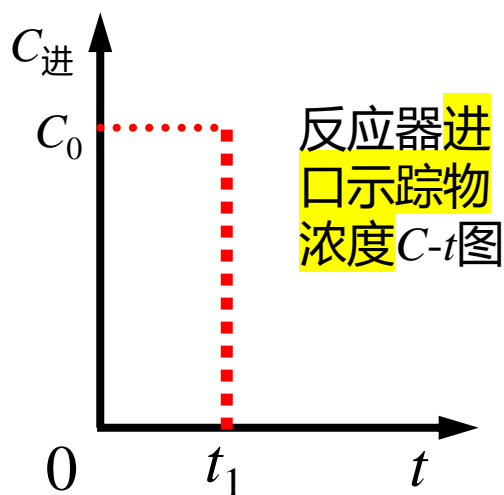


流体的任何组分均以同一停留时间 $t_T$ 流经反应器，在 $t_T$ 之前之后均无示踪物流出，在 $t_T$ 时刻以浓度 $C_0$ 、流量 $Q$ 流出，所以：

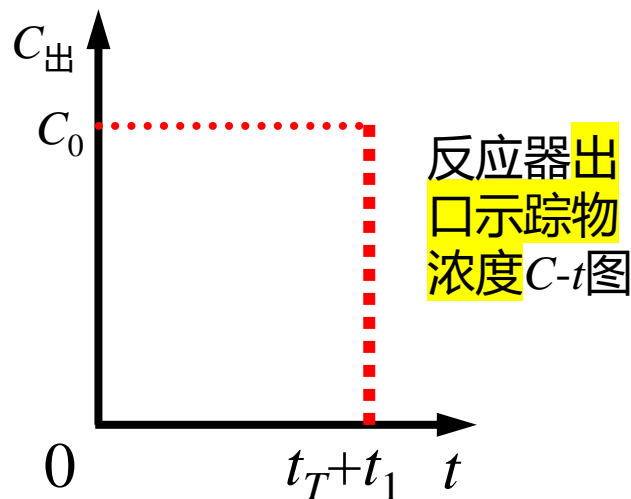


### 无化学反应的活塞流反应器

$$E(t) = \begin{cases} E(t) = 0 & (t \neq t_T) \\ E(t) \rightarrow \infty & (t = t_T) \end{cases}$$



示踪物  $M_0$  在  $t_1$  时刻瞬间加入时，其在水溶液中浓度为  $C_0$ 。过了  $t_1$  时刻后，不再有示踪物加入，以后的  $C_{\text{进}}$  永远为 0，即  $C_0=0$



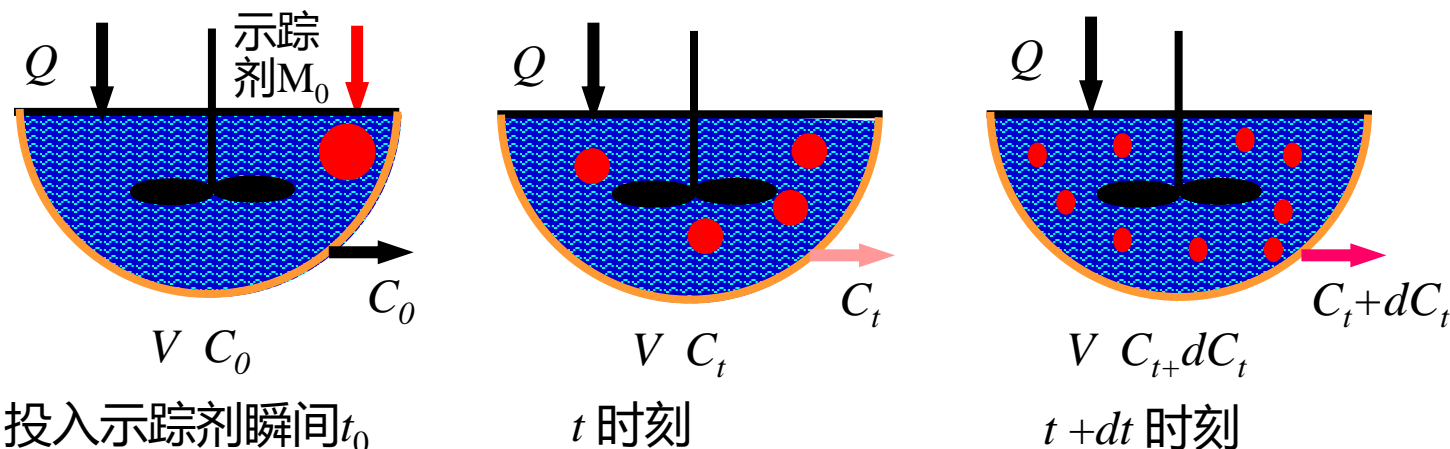
瞬间加入的示踪物以  $C_0$  的浓度在活塞流反应器中经理论停留时间  $t_T$  的前和后均无示踪物出现，故  $C_{\text{出}} = 0 (t_1 < t_T < t_2)$ ，在  $t_T$  时刻  $C_{\text{出}} = C_0$



## 2.3 反应器及其选择-不同类型反应器流动状况描述



### 无化学反应的完全混合流反应器CMR



#### $t \rightarrow t+dt$ 时间里CMR中示踪剂物料衡算

$t$  时间里CMR中示踪剂量 =  $t+dt$ 时间里反应器内示踪剂量 +  $dt$ 时间间隔中流出的示踪剂量

$C_t + dC_t$ 为 $t+dt$ 时间点的  
示踪剂在反应器内浓度

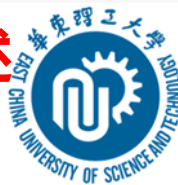
$$V \cdot C_t = V \cdot (C_t + dC_t) + QC_t dt$$

$C_t$ 为 $t$ 时间点示踪剂在反应器内浓度

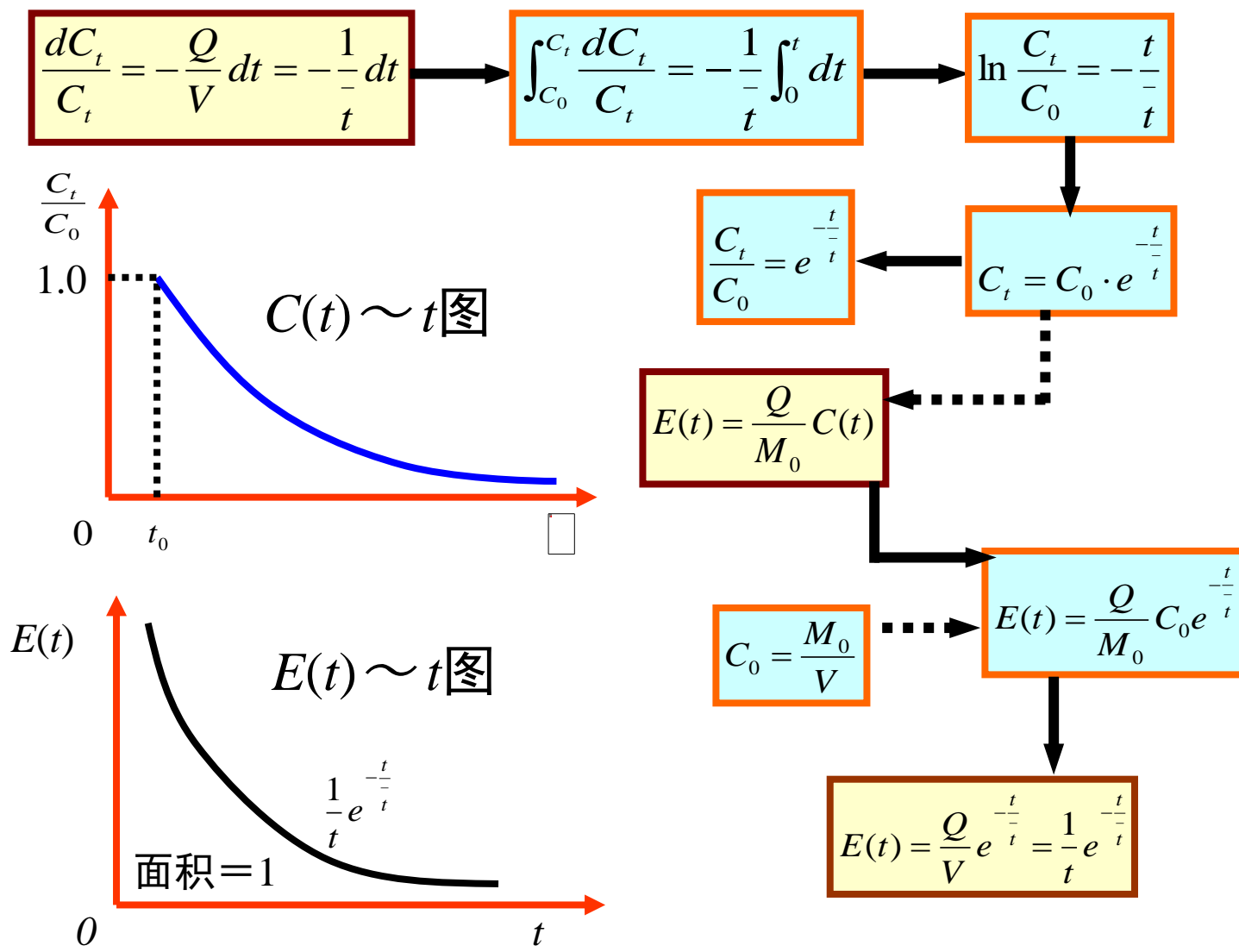
$$\frac{dC_t}{C_t} = -\frac{Q}{V} dt = -\frac{1}{t} dt \dots$$

示踪剂在完全混合反  
应器中平均停留时间

## 2.3 反应器及其选择-不同类型反应器流动状况描述

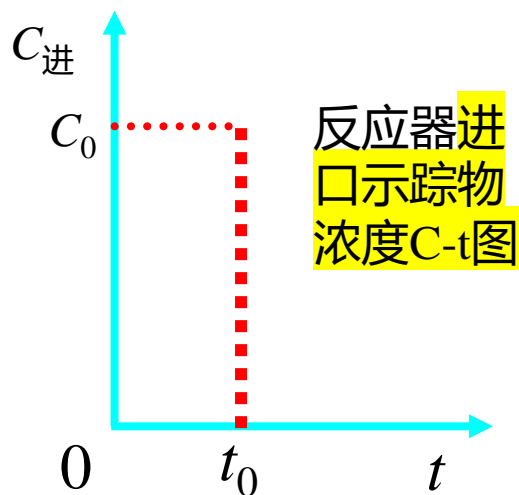


### 无化学反应完全混合流反应器 $E(t) \sim t$ 曲线特征

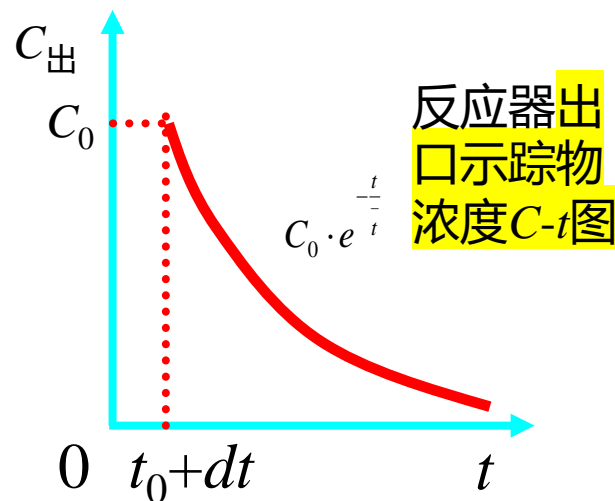


### 无化学反应完全混合流反应器

#### 进出口浓度曲线



示踪物 $M_0$ 在 $t_0$ 时刻瞬间加入时, 其在水溶液中浓度为 $C_0$ 。过了 $t_0$ 时刻后, 不再有示踪物加入, 以后的 $C_{\text{进}}$ 永远为0。

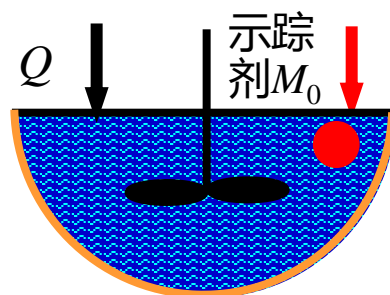
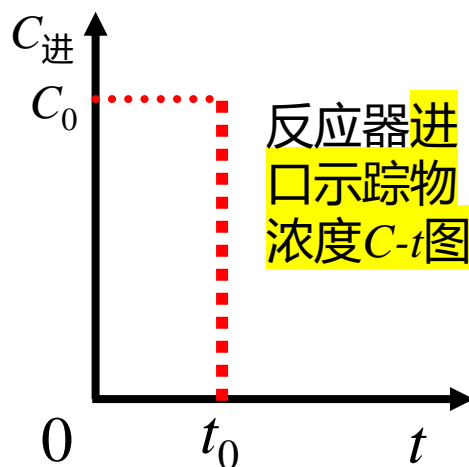
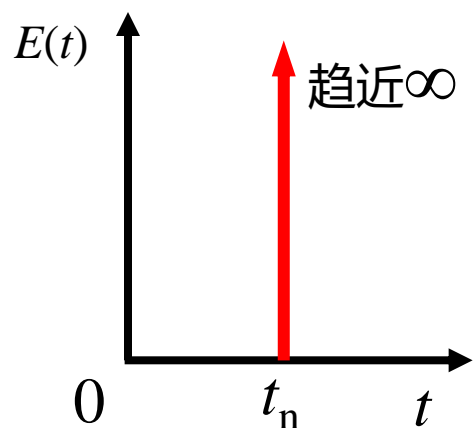


瞬间加入示踪物 $M_0$ , 浓度 $C_0$ , 在 $t+dt$ 时间后, 出口处马上有示踪物出现, 浓度变化按的规律流出

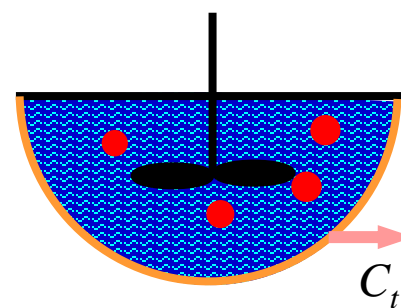
$$C_t = C_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

### 无化学反应的间歇式反应器CMBR

$$E(t) = \begin{cases} E(t)=0 & (t \neq t_n) \\ E(t) \rightarrow \infty & (t=t_n) \end{cases}$$

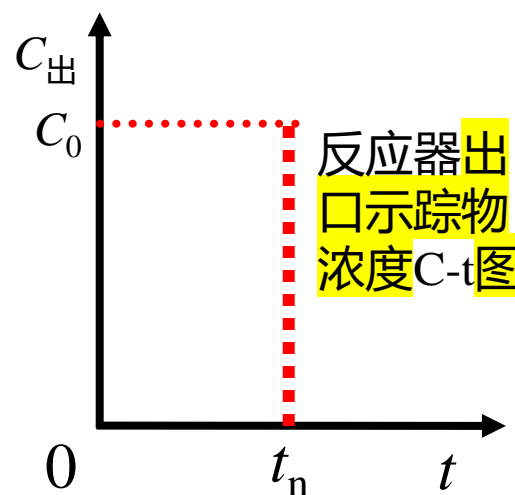


$V \ C_0$   
 $t_0$  时刻

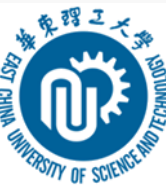


$V \ C_t$   
 $t_n$  时刻

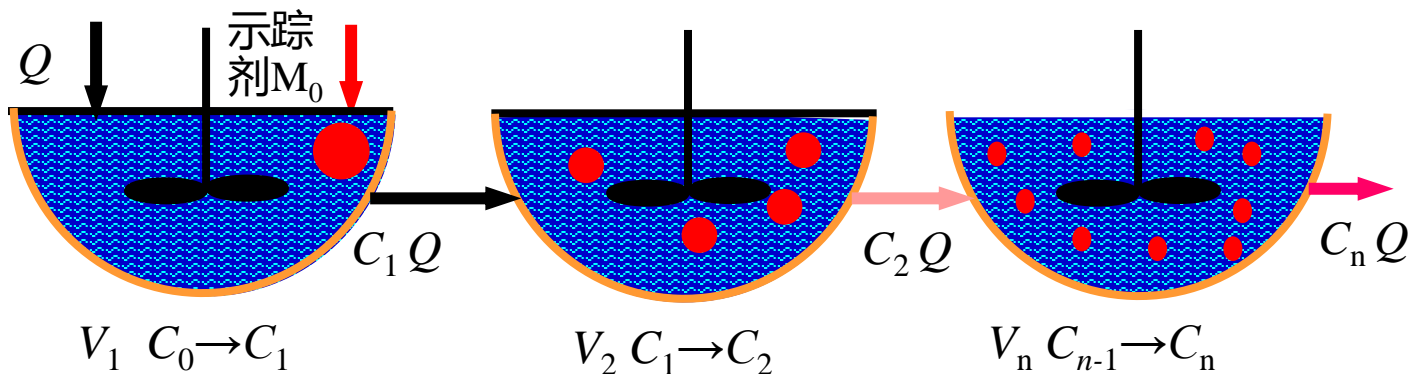
示踪物 $M_0$ 在 $t_0$ 时刻加入后被瞬间搅拌均匀, 浓度一直为 $C_0$ ;  $t_n$ 时刻示踪物与水同时流出反应器,  $C_t=C_0$



## 2.3 反应器及其选择-不同类型反应器流动状况描述



### 无化学反应的任意流反应器AFR



多个完全混合反应器串连:  $C_0 \neq C_1 \neq C_2 \neq \dots \neq C_n$ ;  $V_1 = V_2 = \dots = V_n = V/n$

第一级

$$C_1 = C_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

第二级物料衡算

$$\frac{V dC_2}{n dt} = Q C_1 - Q C_2$$

$$\frac{dC_2}{dt} + \frac{nQ}{V} C_2 = \frac{nQ}{V} C_1$$

$$\frac{C_n}{C_0} = \frac{1}{(n-1)!} \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

第  $n$  级反应器中  
示踪物浓度

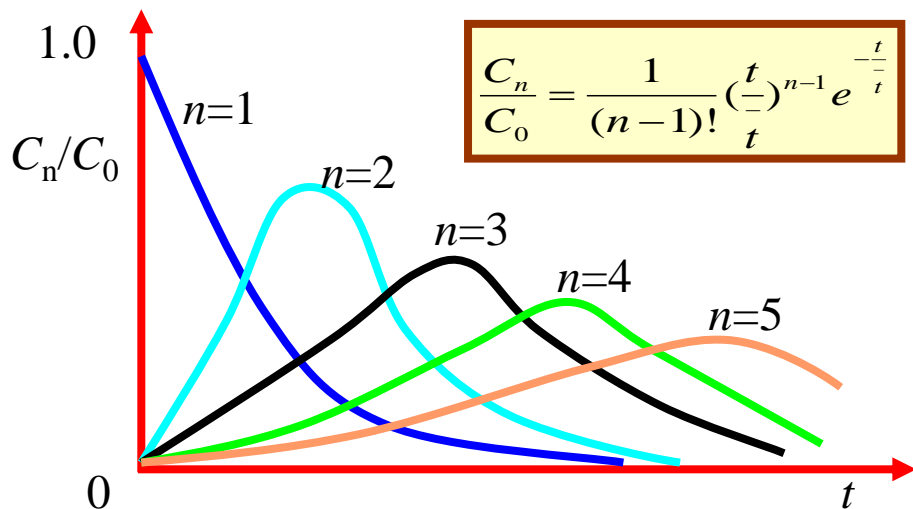
$$C_n = \frac{1}{(n-1)!} C_0 \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$C_2 = \frac{1}{(2-1)!} C_0 \left(\frac{t}{\tau}\right)^{2-1} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

## 2.3 反应器及其选择-不同类型反应器流动状况描述



### 无化学反应的任意流反应器AFR

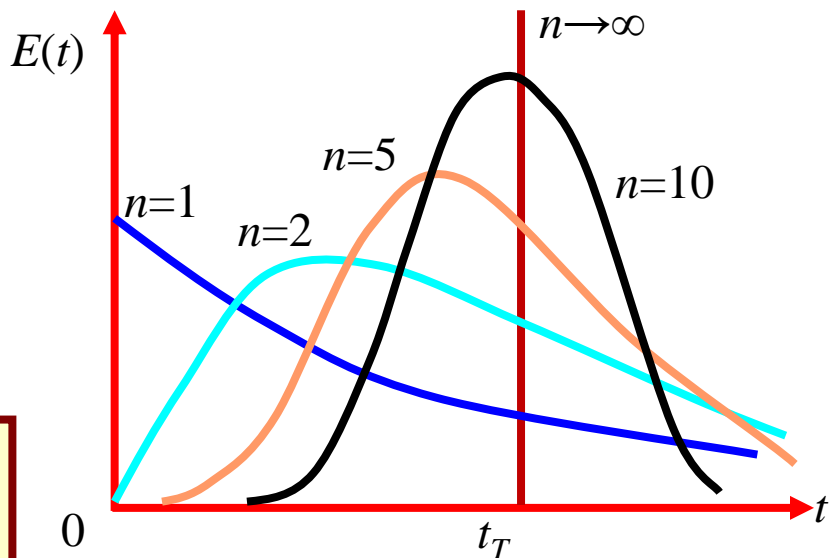


每级进出口浓度与单级完全混合流反应器进出口浓度一致，在  $n \rightarrow \infty$  时，则最后一级出口示踪物浓度与活塞流出口浓度相同，为  $C_0$

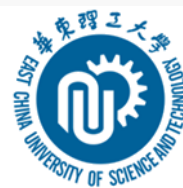
$$E(t)_1 = \frac{Q}{M_0} C_1 = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$E(t)_2 = \frac{Q}{M_0} C_2 = \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$E(t)_n = \frac{1}{(n-1)!} \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \left(\frac{t}{\tau}\right)^{n-1} e^{-\frac{t}{\tau}}$$



## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算



### 反应器计算的目的

用计算方法找到生产规模的化学反应转化率，并在转化率基础上设计反应所需的体积及生产率

化学反应转化率是水处理过程中的污染物去除率或去除百分数，以 $\eta$ 表示

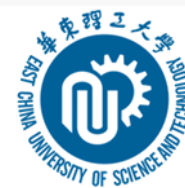
$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} = 1 - \frac{C}{C_0}$$

生产率是每批生产去除的物质与每批生产所需总时间(包括物料在反应器停留时间 $t$ 和生产辅助时间 $t_r$ 之总和)之比，即单位时间处理废水中污染物的能力，以 $P_r$ 表示

反应器体积

$$P_r = \frac{V \cdot C_0 \cdot \eta}{t + t_r} = \frac{\overset{\text{反应器体积}}{V} \cdot C_0 \cdot \eta}{t} \cdot \frac{1}{1 + \underset{\text{非生产时间消耗率 } t_r/t}{E}}$$

## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算



### 间歇式反应器的计算

#### 生产时间的计算

按一级反应动力学模式

$$\eta = 1 - \frac{C}{C_0} \rightarrow \frac{d\eta}{dt} = -\frac{1}{C_0} \cdot \frac{dC}{dt} \leftarrow \dots \leftarrow -\frac{dC}{dt} = KC$$
$$-\frac{1}{C_0} \cdot \frac{dC}{dt} = K \frac{C}{C_0} = K(1-\eta) = \frac{d\eta}{dt} \rightarrow \frac{d\eta}{1-\eta} = Kdt \rightarrow -\int_0^\eta \frac{d(1-\eta)}{1-\eta} = K \int_0^t dt$$

#### 反应器容积计算

间歇式反应器

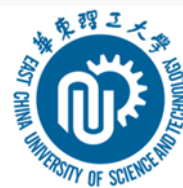
物料恒算也可得出

已知

$$P_r = \frac{V \cdot C_0 \cdot \eta}{t} \cdot \frac{1}{1+E}$$
$$\frac{V_B C_0 \eta K}{(P_r)_B \cdot (1+E)} = \ln \frac{1}{1-\eta}$$
$$V_B = \frac{(P_r)_B \cdot (1+E)}{C_0 \eta K} \ln \frac{1}{1-\eta}$$



## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算



### 活塞流反应器的计算

活塞流为连续流, 故  $t_r = 0$  即  $E = 0$

已知

$$V_P = \frac{(P_r)_P \cdot (1 + E)}{C_0 \eta K} \ln \frac{1}{1 - \eta}$$

$$(P_r)_P = \frac{V_P \cdot C_0 \cdot \eta}{t} \cdot \frac{1}{1 + E}$$

反应器容积  $V_P$

$$V_P = -\frac{Q}{K} \ln \frac{C_0}{C}$$

$$V_P = \frac{(P_r)_P}{C_0 \eta K} \ln \frac{1}{1 - \eta}$$

$$(P_r)_P = \frac{V_P \cdot C_0 \cdot \eta}{t}$$

生产时间  $t$   
物料恒算  
也可得出  
(同SBR)

$$t = \frac{1}{K} \ln \frac{C_0}{C}$$

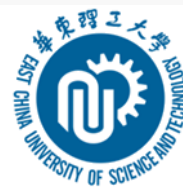
$$t = \frac{V_P}{Q}$$

$$(P_r)_P = Q \cdot C_0 \cdot \eta$$

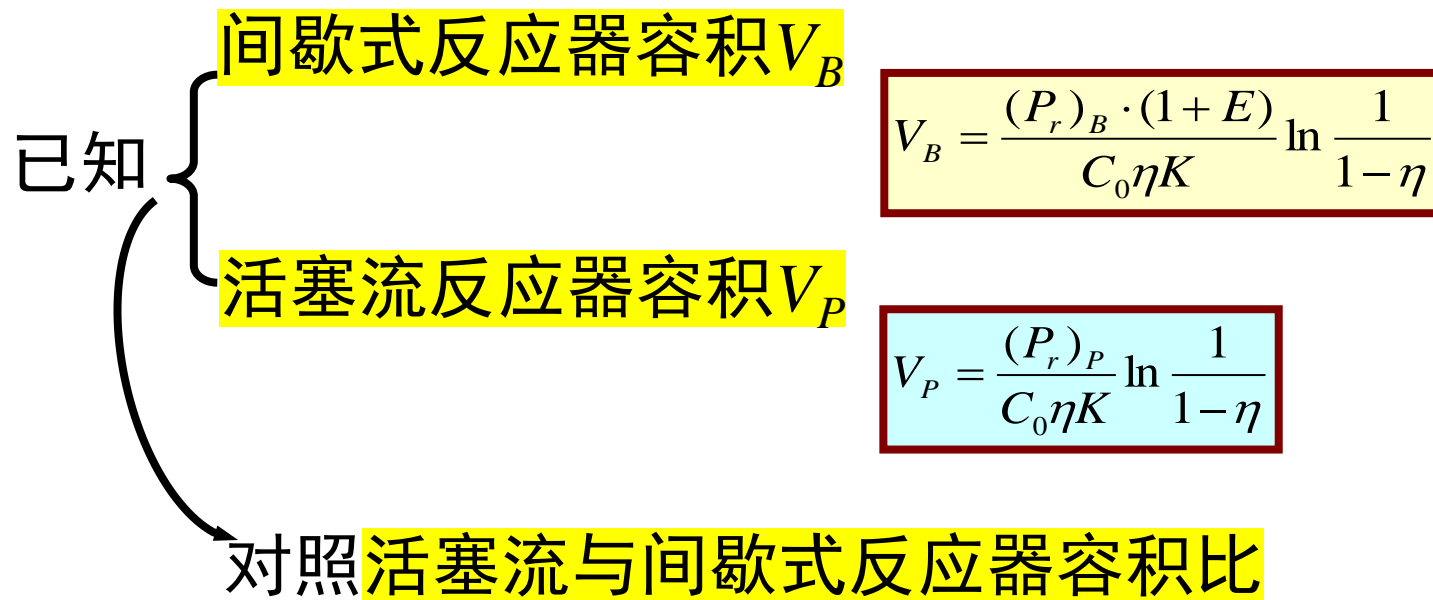
注:

对照活塞流与间歇式反应器容积, 在  $C_{0B} = C_{0P}$ ,  $(P_r)_B = (P_r)_P$ ,  $\eta_B = \eta_P$  时,  $(V_B/V_P) = 1 + E$

## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算



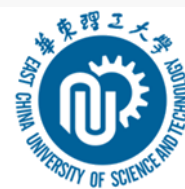
### 间歇式反应器与活塞流反应器容积对照 (一级反应)



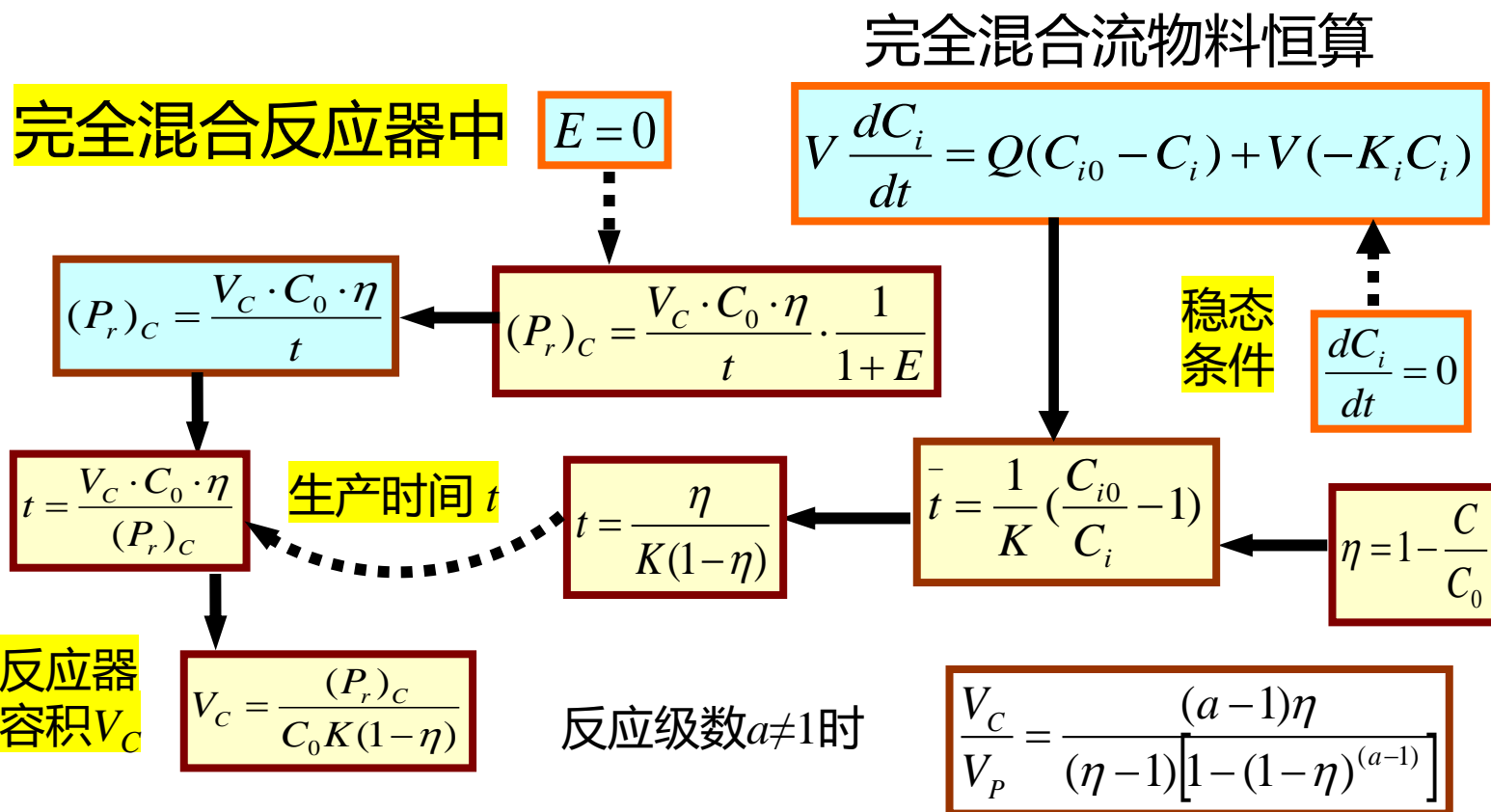
$$(V_B/V_P) = 1 + E$$

前提:  $C_{0B} = C_{0P}$ ,  $(P_r)_B = (P_r)_P$ ,  $\eta_B = \eta_P$

## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算

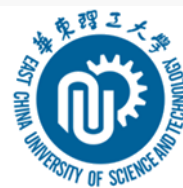


### 完全混合流反应器计算( $t$ 的推导1)



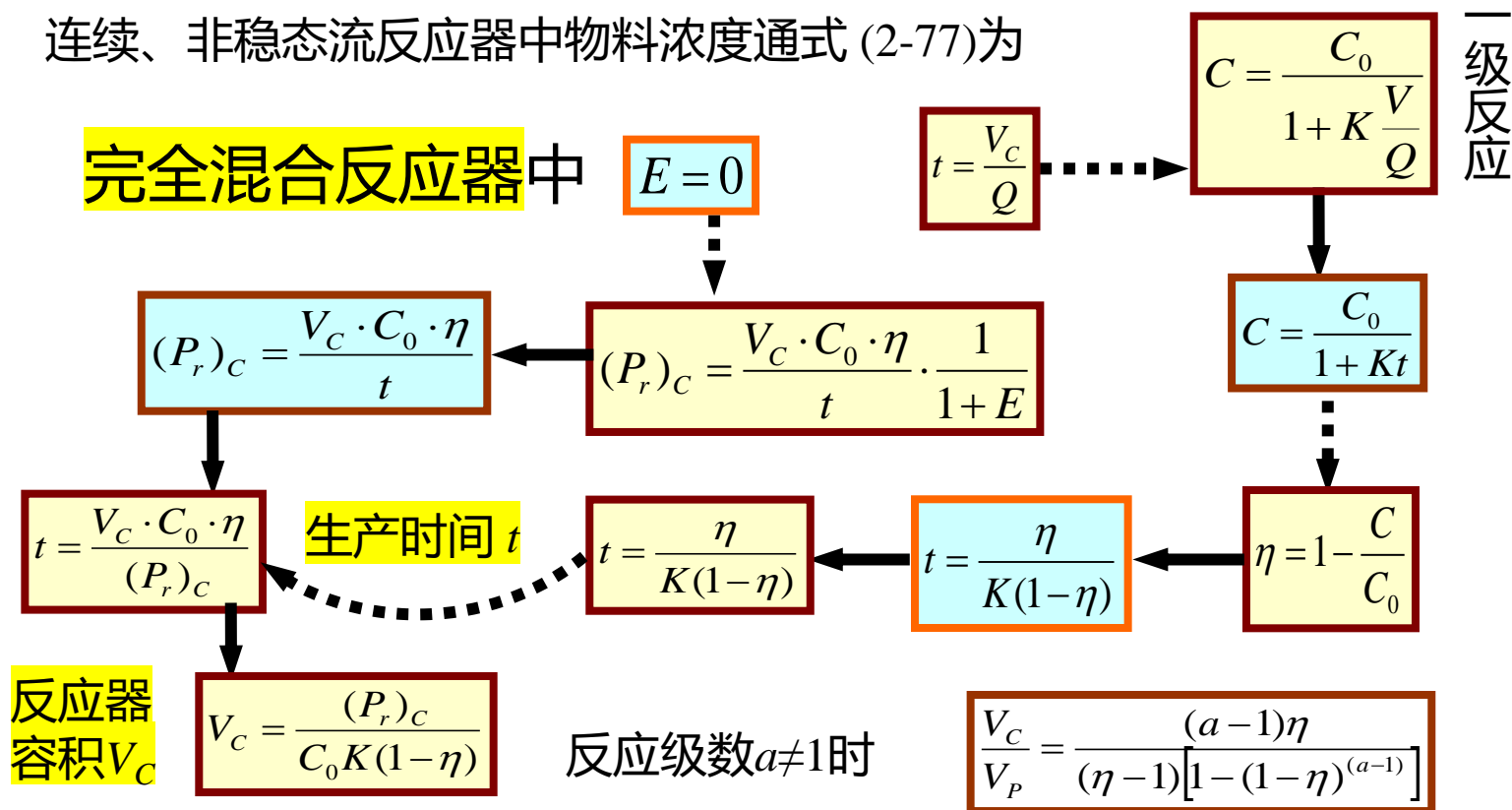
**注：** 对照活塞流与完全混合流反应器, 在  $C_{0C} = C_{0P}$ ,  $(P_r)_C = (P_r)_P$ ,  $\eta_C = \eta_P$  时,  $\frac{V_C}{V_P} = \frac{\eta}{(\eta-1) \ln(1-\eta)}$ , 因  $\eta < 1$ , 则  $V_C > V_P$  (一级反应)

## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算



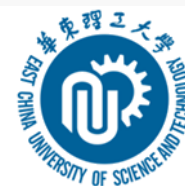
### 完全混合流反应器的计算( $t$ 的推导2)

连续、非稳态流反应器中物料浓度通式 (2-77)为



注：对照活塞流与完全混合流反应器,在  $C_{0C}=C_{0P}$ ,  $(P_r)_C=(P_r)_P$ ,  $\eta_C=\eta_P$  时,  $\frac{V_C}{V_P} = \frac{\eta}{(\eta-1) \ln(1-\eta)}$ , 因  $\eta < 1$ , 则  $V_C > V_P$  (一级反应)

## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算



### 完全混合流反应器与活塞流反应器容积对照

#### ➤一级反应(反应级数 $a=1$ )

活塞流反应器容积 $V_P$

$$V_P = \frac{(P_r)_P}{C_0 \eta K} \ln \frac{1}{1-\eta}$$

完全混合流反应器容积 $V_C$

$$V_C = \frac{(P_r)_C}{C_0 K (1-\eta)}$$

反应器  
容积比

$$\frac{V_C}{V_P} = \frac{\eta}{(\eta-1) \ln(1-\eta)}$$

$$0.5 < \eta < 1$$

$$V_C > V_P$$

前提:  $C_{0C} = C_{0P}$   
 $(P_r)_C = (P_r)_P$   
 $\eta_C = \eta_P$

#### ➤非一级反应(反应级数 $a \neq 1$ )

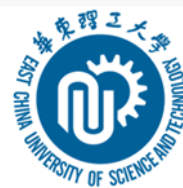
完全混合流反应器与活塞流反应器容积比

零级反应时,  $a=0$

$$\frac{V_C}{V_P} = \frac{(a-1)\eta}{(\eta-1)[1-(1-\eta)^{(a-1)}]}$$

$$\frac{V_C}{V_P} = 1, \text{即 } V_C = V_P$$

## 2.3 反应器及其选择-典型反应器的计算



### 任意流反应器的计算

将一级完全混合流反应器体积计算作n级的推算得：

任意流反应器体积

$$(V_C)_n = \frac{n(P_r)_C}{KC_0\eta} \left[ \left( \frac{1}{1-\eta} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]$$

$$\frac{(V_C)_n}{V_P} \Rightarrow 1$$

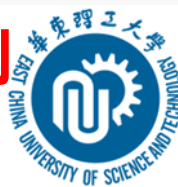
$n \rightarrow \infty$  时

$$\frac{(V_C)_n}{V_P} = \frac{n \left[ 1 - \left( \frac{1}{1-\eta} \right)^{\frac{1}{n}} \right]}{\ln(1-\eta)}$$

结论：

- $n$  个  $V_C$  的完全混合流反应器串连后，其效果同活塞流反应器，活塞流反应器可看成是无限多级完全混合流反应器的串连组合，每级相当于任意流中的断面；
- 活塞流反应器体积最小，但条件最为苛刻，要消除轴向返混；
- 设计中可按活塞流体积计算，稍加放大后，分级串连组合

## 2.3 反应器及其选择-工程应用中反应器选择的原则



### 处理水的特性与数量

处理水量大→连续流反应器,处理水量小→间歇式反应器  
混合程度高→完全混合流反应器,混合程度低→活塞流反应器

### 选用的处理过程

固液分离→活塞流反应器,气液分离→完全混合流反应器  
吸附,离子交换→填充床,强化反应过程→沸腾床反应器

### 反应动力学

反应速率快→完全混合流反应器,反应速率慢→活塞流反应器  
生物氧化速率低,曝气池内反应接近零级反应

**反应器体积**  $V_P < V_B$ 、 $V_P < V_C$ 、 $(V_C)_n \rightarrow V_P (n \rightarrow \infty)$

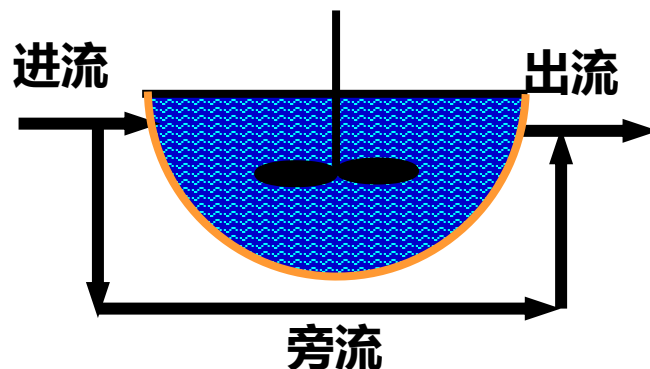
**当地环境条件** 占地、气温、风力、风向、河流  
**费用要求**

## 2.3 反应器及其选择-工程应用中反应器选择的原则



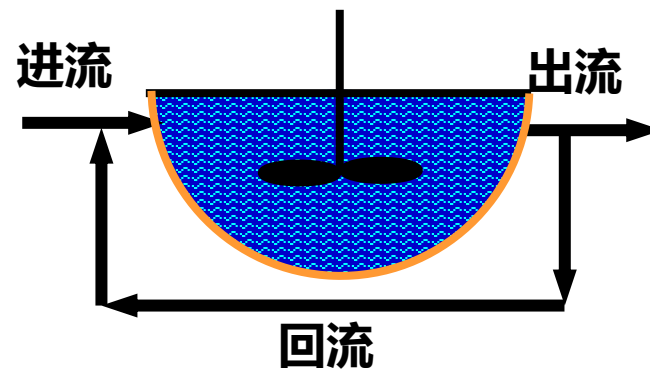
### 在旁流系统中

- 反应器处理效果高
- 反应器不耐负荷冲击
- 出水水质要求不高,有后续处理



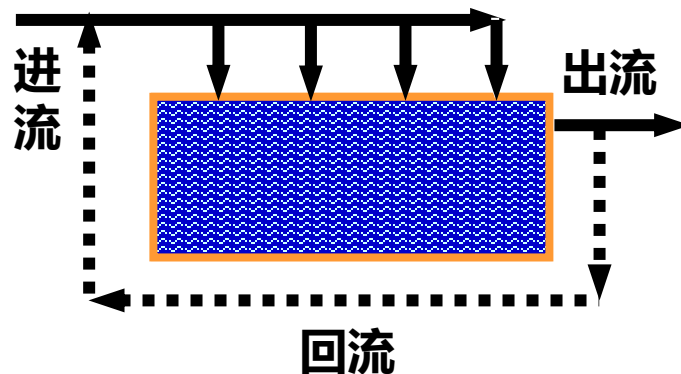
### 循环系统中

- 回用反应物
- 减少负荷冲击
- 反应器处理效能低,部分出水重新处理



### 分步进料系统中

- 减少负荷
- 强化处理效果
- 采用活塞流反应器的处理系统





- 1.在水污染控制工程中所用的反应器与化学工业生产中反应器相比，具有什么特点？为什么？
- 2.对于废水处理过程中的反应，为什么反应级数可以减少一级？
- 3.在废水的生物处理过程中，生化反应速率符合米-门方程，绘图并简述底物浓度与反应级数的关系。
4. 什么是稳态流和非稳态流？在物料衡算中，两者对最终浓度变化计算有何影响？为什么？
5. 对于几类典型反应器的计算，可得到什么具有指导意义的结论？
- 6.简述反应器选择的考虑因素。
- 7.在废水处理系统中，反应器可有几种安排？分别适用于什么情况？