

# 第四章

## 流体通过

## 颗粒层的流动

### 4.1 概述

### 4.2 颗粒床层的特性

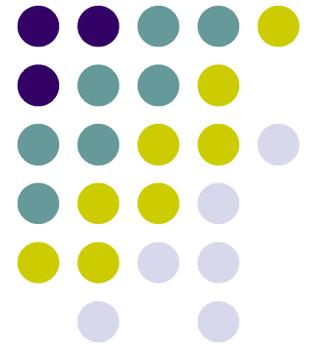
### 4.3 流体通过固定床的压降

### 4.4 过滤原理及设备

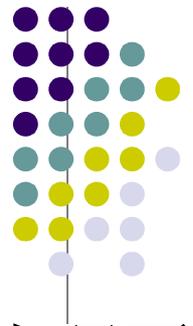
### 4.5 过滤过程计算

### 4.6 加快过滤速率的途径

主要内容：过滤机械分离方法的原理、过程及设备计算、影响因素分析及强化措施，进行设备选型。



# 介绍



## 一、物系的分类

均相物系：凡物系内部各处物料的性质均匀而不存在相界面的物系。

例：溶液、混合气体

非均相物系：凡物系内部有隔开两相的界面存在，而界面两侧的材料性质截然不同的物系。

气态非均相

气液相：如雾、泡沫液

气固相：如烟、含尘气体

液态非均相

液液相：如油水混合物、乳浊液

液固相：如泥浆、悬浮液

分散相与连续相

固固相：如矿石、泥砂

分散相：处于分散状态的物质，也称分散物质。

连续相：处于连续状态的物质，也称分散介质。



## 二、非均相分离的目的

- (1) 回收分散物质：如海盐结晶后从母液中分离结晶盐。
- (2) 净化分散介质：如江水处理制备自来水。
- (3) 环保：如化工厂污水处理。

## 三、常用的分离手段

(1) 沉降：分离气液、气固混合物。

(2) 离心分离：分离液液、液固混合物。

(3) 筛分：分离固固混合物。

(4) 过滤：分离液固混合物。

① 密度差异

颗粒相对流体运动

② 介质对物质的拦截作用

流体相对颗粒运动

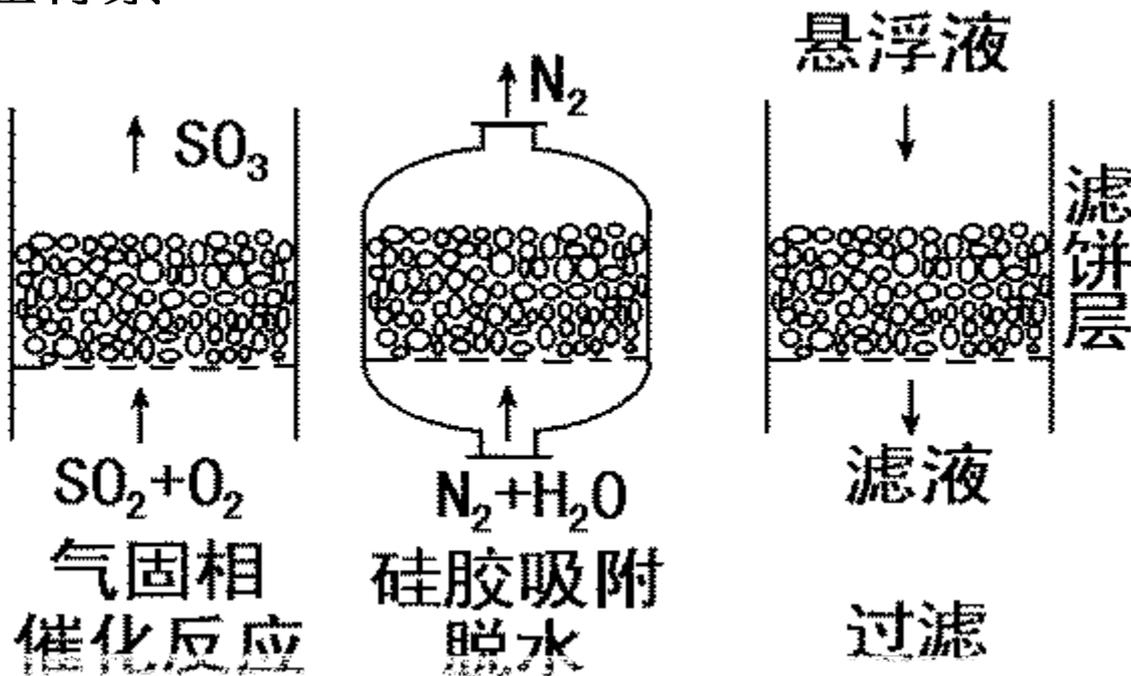
③ 电场作用：固液分离 根据电荷不同在不同电极上沉积。

# 第四章 流体通过颗粒层的流动

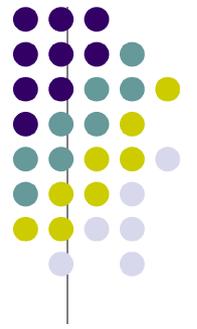


## 4.1 概述

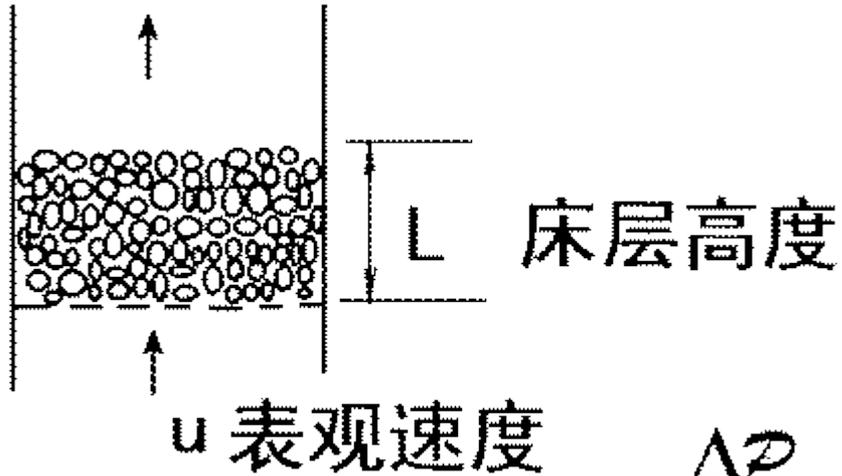
### 4.1.1 工业背景



固定床—由许多固体颗粒堆积成的静止颗粒层



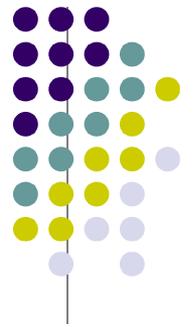
## 4.1.2 固定床阻力的影响因素



$$\frac{\Delta P}{L} = ?$$

- ① 流体物性:  $\rho, \mu$
- ② 操作因素:  $u$
- ③ 设备因素: 颗粒直径,  
颗粒大小分布,  
空隙大小

## 4.2 颗粒床层的特性



### 4.2.1 单颗粒的特性

球形颗粒，只需一个参数  $d_p$

颗粒特性：体积

$$V = \frac{\pi}{6} d_p^3$$

表面积

$$S = \pi d_p^2$$

比表面

$$a = \frac{S}{V} = \frac{6}{d_p}$$

实际遇到两个问题：

①非球形

非球形：定当量直径，目标不同结果不同

体积当量  $d_{ev}$

$$V = \frac{\pi}{6} d_{ev}^3$$

$$V = \frac{\pi}{6} d_e^3$$

面积当量  $d_{es}$

$$S = \pi d_{es}^2$$



$$S = \pi d_e^2$$

比表面当量  $d_{ea}$

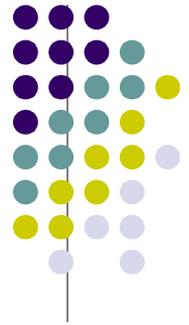
$$a = \frac{6}{d_{ea}}$$

$$a = \frac{6}{d_e}$$

$$\frac{d_{ev}^2}{d_{es}^2} = \frac{\text{与非球形颗粒体积相等的球的表面积}}{\text{非球形颗粒的表面积}}$$

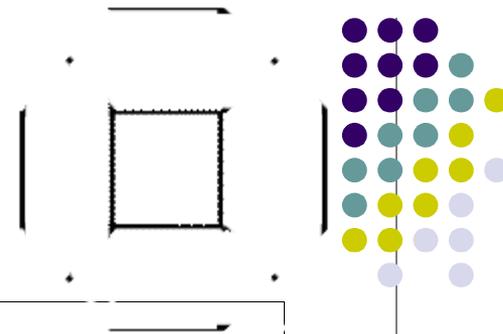
1

两个独立的，取  $d_{ev}$  ( $d_e$ ) 和球形度 (形状系数)  $\psi$



例 1: 边长为 $L=4\text{mm}$ 的正方体颗粒

求:  $d_{ev}, d_{es}, d_{ea}, a$



解:  $V = L^3 = \frac{\pi}{6} d_{ev}^3$

$d_{ev} = L \sqrt[3]{\frac{6}{\pi}} = 4 \times 1.24 = 5\text{mm}$

$S = 6L^2 = \pi d_{es}^2$

$d_{es} = L \sqrt{\frac{6}{\pi}} = 4 \times 1.38 = 5.5\text{mm}$

$a = \frac{S}{V} = \frac{6L^2}{L^3} = \frac{6}{d_{ea}}$

$d_{ea} = L = 4\text{mm}$

$a = \frac{6}{d_{ea}} = \frac{6}{0.004} = 1500\text{m}^2 / \text{m}^3$

$\frac{d_{ev}^2}{d_{es}^2} = \frac{5^2}{5.5^2} = 0.81$

②  $d_{ev}, d_{es}, d_{ea}$ 三者关系

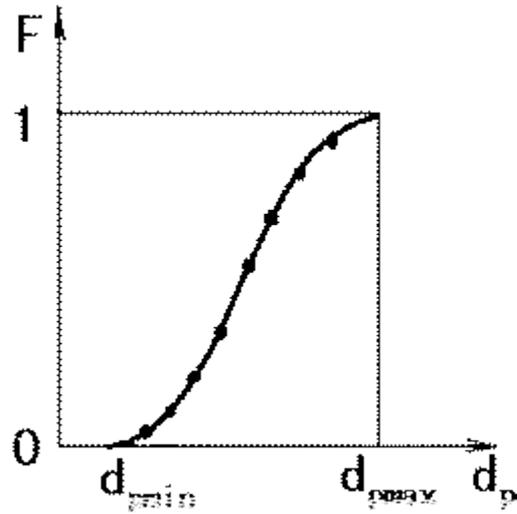
$d_{ea} = d_{ev}^{1.5} d_{es}$

$d_{ea} = d_{ev} d_{es}$

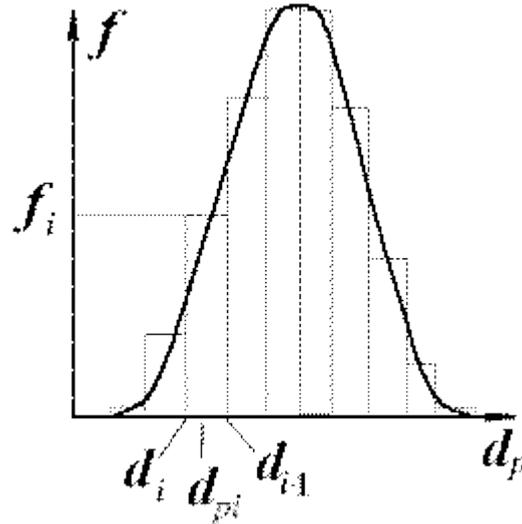
## 4.2.2 颗粒群的特性

### (1) 分布函数

大小不一：筛分分析 (1 kg 颗粒群)



分布函数



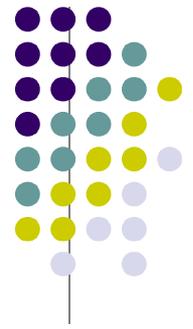
频率函数

频率函数 (粒级质量分率  $\sim d_p$ ) 特点：某粒级范围的颗粒质量分率

$$f_i = \frac{x_i}{d_{i-1} d_i}$$

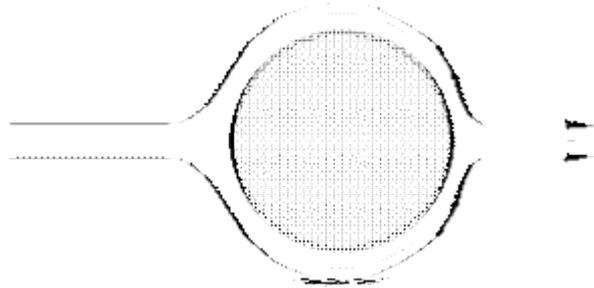
=该范围曲线下的面积

曲线下的面积和=1



# 分布函数F与频率函数f的关系

$$f = \frac{dF}{d(d_p)}$$



$$F(d_p) = \int_0^{d_p} f d(d_p)$$

实际情况：流动较慢时，阻力以表面剪切力为主，表面积对阻力影响大



准同 比去五和等

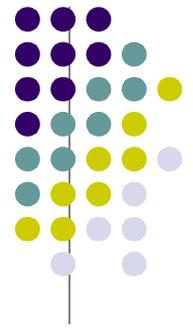
定平均直径 $d_m$

$\left\{ \begin{array}{l} a \\ a \end{array} \right.$	$\frac{S_i}{V_i}$	$\frac{(\frac{m_i}{m} a_i)}{p}$	$x_i a_i$
	$\frac{6}{d_m}$	$a_i$	



$$d_m = \frac{1}{\frac{x_i}{d_i}}$$

## 4.3.2 颗粒床层特性



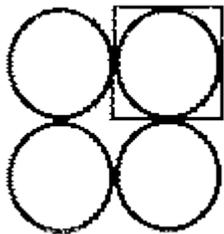
### (1) 床层空隙率

$$\frac{\text{床层体积} - \text{颗粒体积}}{\text{床层体积}}, \quad m^3 / m^3$$

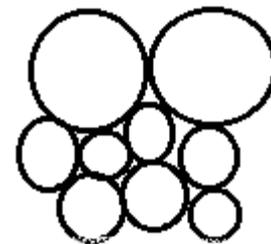
影响因素：

颗粒形状、粒度分布、颗粒直径/床层直径、床层的填充方式

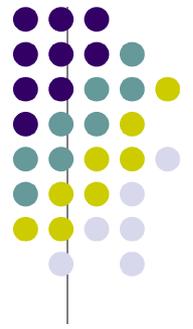
- 颗粒形状：球形度越小，则 越大
- 粒度分布：粒度分布越不均匀，则 越小
- 床层的填充方式：干装、湿装法等



$$1 - \frac{d_p^3 / 6}{d_p^3} = 0.48$$



$d_p$ 分布有关



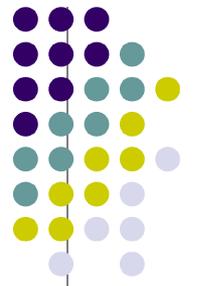
测定方法：实验确定

$$V_{\text{水}} / V$$

$$(V - G / s) / V$$

## (2) 床层比表面

$$a_B = \frac{S}{V_{\text{床}}} = \frac{S(1 - \epsilon)}{V_p} = a(1 - \epsilon)$$



## 4.3 流体通过床层的压力降

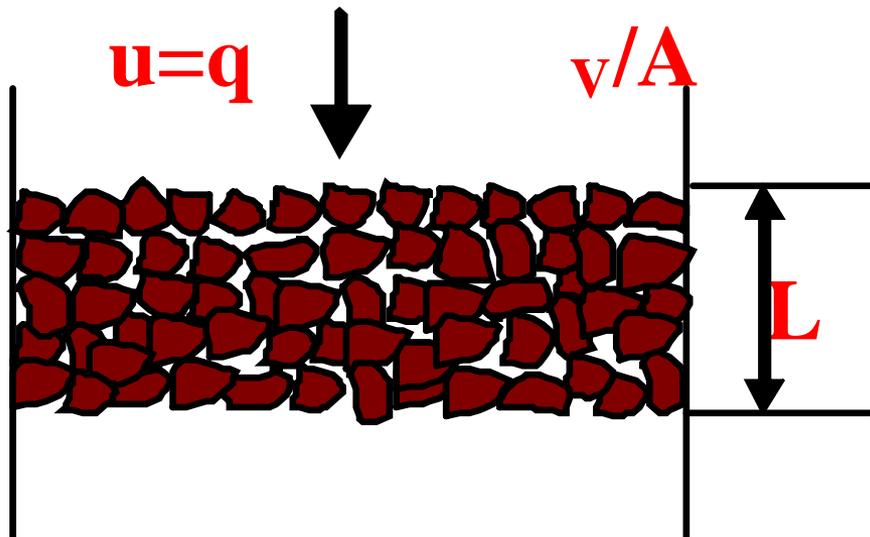
流动通过固定床的特点:

- ❖ 流道不规则，流体在固定床中同一截面上的流速分布很不均匀
- ❖ 产生压降的主要原因:

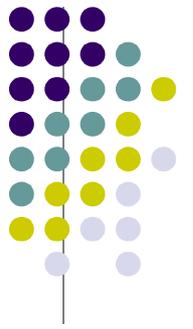
(1) 由流体与颗粒表面之间的摩擦所引起的-----粘性摩擦阻力

(2) 流体流动过程中，因孔道截面的突然扩大和收缩以及流体对颗粒的撞击而产生的-----形体阻力。

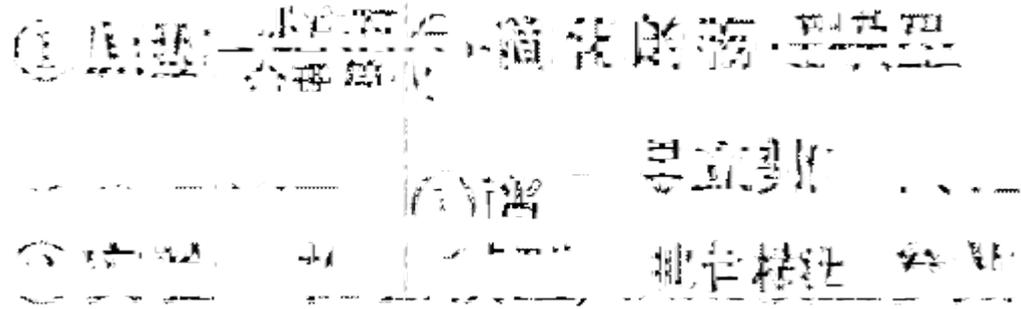
**表观速度**



几何边界复杂，无法解析解，要靠实验



数学模型法主要步骤：

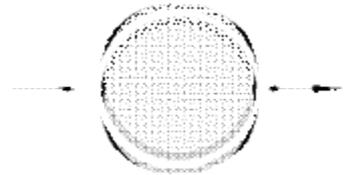


### 4.3.1 简化模型

过程特征：

①爬流，表面剪切力为主，形体力(压差力)为次

②空隙中实际速度与空隙大小有关



简化原则：

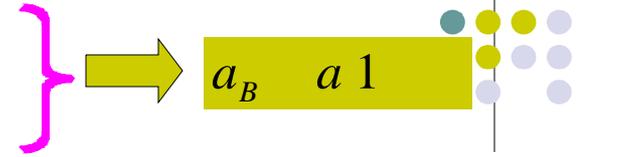
模型与原型①表面积要相等

②空隙容积相等

作原型简化... 但平行... 简化... 简化...

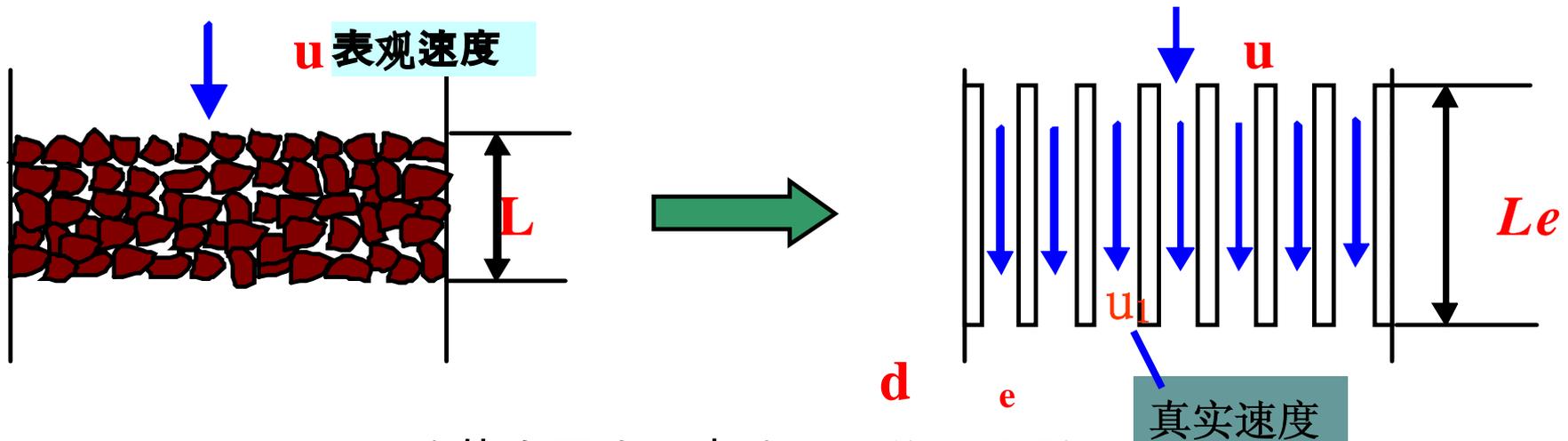
## 简化模型：假定：

- (1) 不规则流道为 $L_e$ 的细管；
- (2) 细管的内表面积等于全部颗粒的表面积，
- (3) 细管流动空间等于颗粒床层的空隙体积。



$$d_e = \frac{4 \text{ 流道容积}}{\text{流道表面积}} = \frac{4 V_{\text{床}}}{a_B V_{\text{床}}} = \frac{4}{a_1}$$

由质量守恒得：  $A u_1 = A u \longrightarrow u_1 = \frac{u}{\dots}$



流体在固定床内流动的简化模型



床层压降:

细管层流 
$$h_f = \frac{P}{L} = \frac{L_e}{d_e} \frac{u_1^2}{2}$$

将 $d_e$ 、 $u_1$ 表达式代入得:

$$\frac{P}{L} = \left( \frac{L_e}{8L} \right) \frac{(1 - \frac{a}{3})^3}{3} u^2 = \frac{(1 - \frac{a}{3})^3}{3} u^2$$

-固定床流动摩擦系数, 是床层雷诺数Re 的函数:

$$\text{Re} = \frac{d_e u_1}{\mu} = \frac{u}{a(1 - \frac{a}{3})}$$

层流(Re < 2) :  $K / \text{Re}$ ,  $K = 5$

$$\frac{P}{L} = 5 \frac{(1 - \epsilon)^2 a^2 u}{3}$$

**Kozeny**



0.17 < Re < 420,  $4.17 / \text{Re} < 0.29$

球形 :  $\frac{P}{L} = 4.17 \frac{(1 - \epsilon)^2 a^2}{3} u + 0.29 \frac{(1 - \epsilon) a}{3} u^2$

**Ergun**

非球形 :  $\frac{P}{L} = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2}{3 (d_{eV})^2} u + 1.75 \frac{(1 - \epsilon)}{3 (d_{eV})} u^2$

**黏性项**

**惯性项**

Re' < 3时, 可忽略惯性项; Re' > 100时, 可忽略粘性项

### 影响因素分析:

- ①物性  $\rho, \mu$    ②操作  $u$    ③设备  $\psi, d_m, \frac{(1 - \epsilon)^2}{3}$

空隙率的影响最大

$\epsilon : 0.3 \rightarrow 0.4$



例2 要估计20℃, 1.0MPa(绝)的CO通过固定床脱硫器的压降, 用20℃, 101.3kPa(绝)的空气进行实测, 测得

$u=0.4\text{m/s}$ 时  $\Delta P/L=470\text{Pa/m}$ ,  $u=0.9\text{m/s}$ 时  $\Delta P/L=2300\text{Pa/m}$ 。

求: CO以 $u=0.5\text{m/s}$ 通过时的  $\Delta P/L$ 。

已知: 20℃, 1.0MPa(绝)的一氧化碳 $\mu=2.4\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ ,  
 $\rho=11.4\text{kg/m}^3$

解: 20℃, 常压空气  $\rho=1.2\text{kg/m}^3$ ,  $\mu=1.81\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$

根据欧根方程, 取  $\frac{\Delta P}{L} = C_1 u + C_2 u^2$



代入空气数据

$$470 = C_1 \times 1.81 \times 10^{-5} \times 0.4 + C_2 \times 1.2 \times 0.4^2$$

$$2300 = C_1 \times 1.81 \times 10^{-5} \times 0.9 + C_2 \times 1.2 \times 0.9^2$$

解得  $C_1 = 3.9 \times 10^6$ ,  $C_2 = 2301$

一氧化碳

$\frac{P}{L}$	$C_1 u$	$C_2 u^2$	3.9	$10^{-6}$	2.4	$10^{-5}$	0.5	2301	11.4	$0.5^2$
	6604 Pa/m									

本例也可用  $a, \epsilon$  表达,

$\frac{P}{L}$	$4.17 \frac{a^2 (1 - \epsilon)^2}{3}$	$u$	$0.29 \frac{a (1 - \epsilon)}{3}$	$u^2$
---------------	---------------------------------------	-----	-----------------------------------	-------

先用实验值算出  $a, \epsilon$ , 再用  $a, \epsilon$  来计算实际工艺物料的压降



## 4.3.2 两种实验规划方法的比较

### 量纲分析法：

对过程无须有深刻理解，“黑箱”法

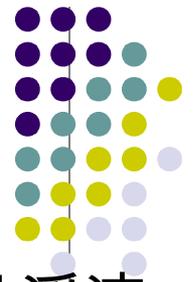
- ①析因实验
- ②无量纲化
- ③测定性实验

### 数学模型法：

对过程有深刻理解，能将过程大幅度简化

- ①简化模型
- ②解析解

# 4.4 过滤原理及设备



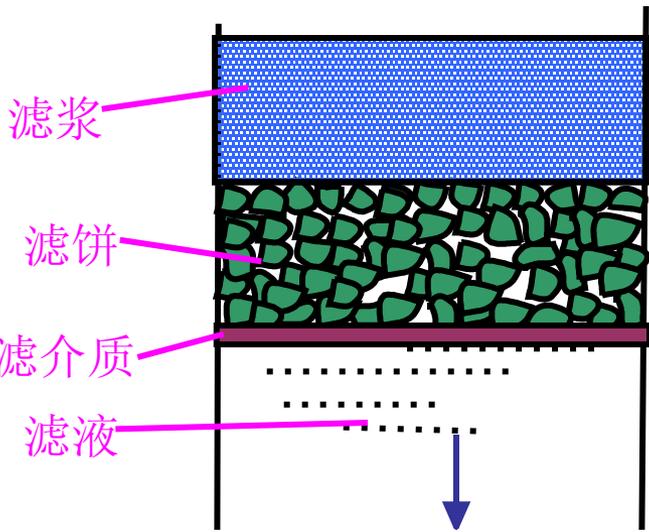
## 4.4.1 过滤原理

饼层过滤

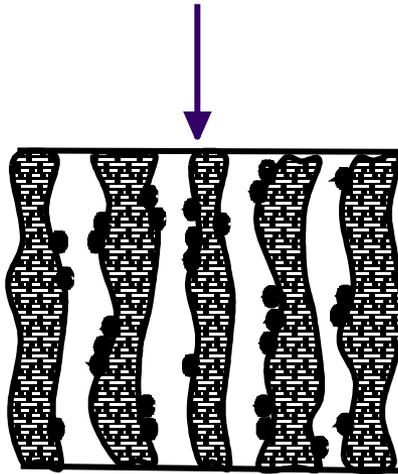


固相体积分数在1%以上悬浮液  
固相体积分数在0.1%以下悬浮液  
0.05-10 $\mu\text{m}$ 的颗粒

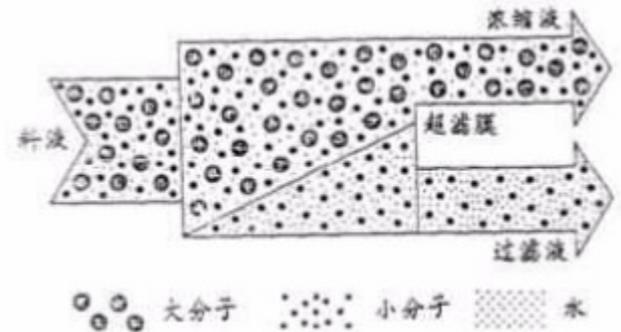
过滤方式 深床过滤  
膜过滤



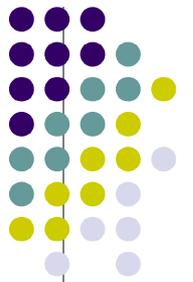
滤饼过滤



深床过滤



超滤膜



## (2) 过滤介质

多孔性介质、耐腐蚀、耐热并具有足够的机械强度。

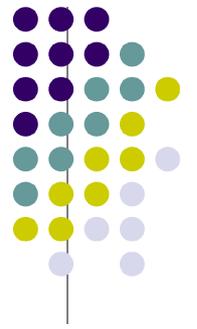
工业用过滤介质主要有：

**织物介质**：如棉、麻、丝、毛、合成纤维、玻璃丝、金属丝等编织成的网；

**堆积介质**：各种固体颗粒（砂、木炭、石棉、硅藻土）堆积而成

**多孔性固体介质**：如多孔瓷板、塑料或管、烧结金属等。

**多孔膜**：有机高分子膜和无机膜



### (3) 滤饼的压缩性

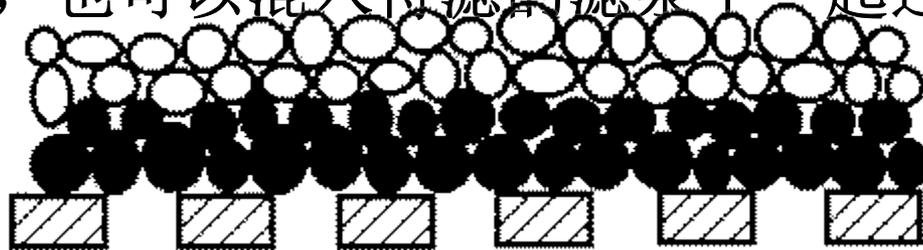
空隙结构易变形的滤饼为可压缩滤饼。

#### 助滤剂——刚性颗粒 ●

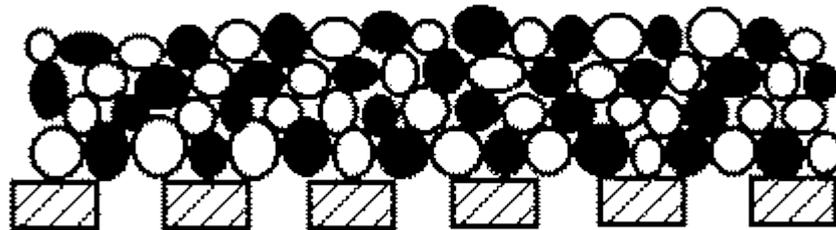
是不可压缩的粉状或纤维状固体，如硅藻土、纤维粉末、活性炭、石棉。

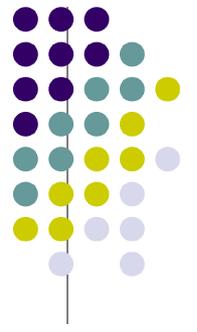
使用时可预涂，也可以混入待滤的滤浆中一起过滤。

#### 方式1.预涂

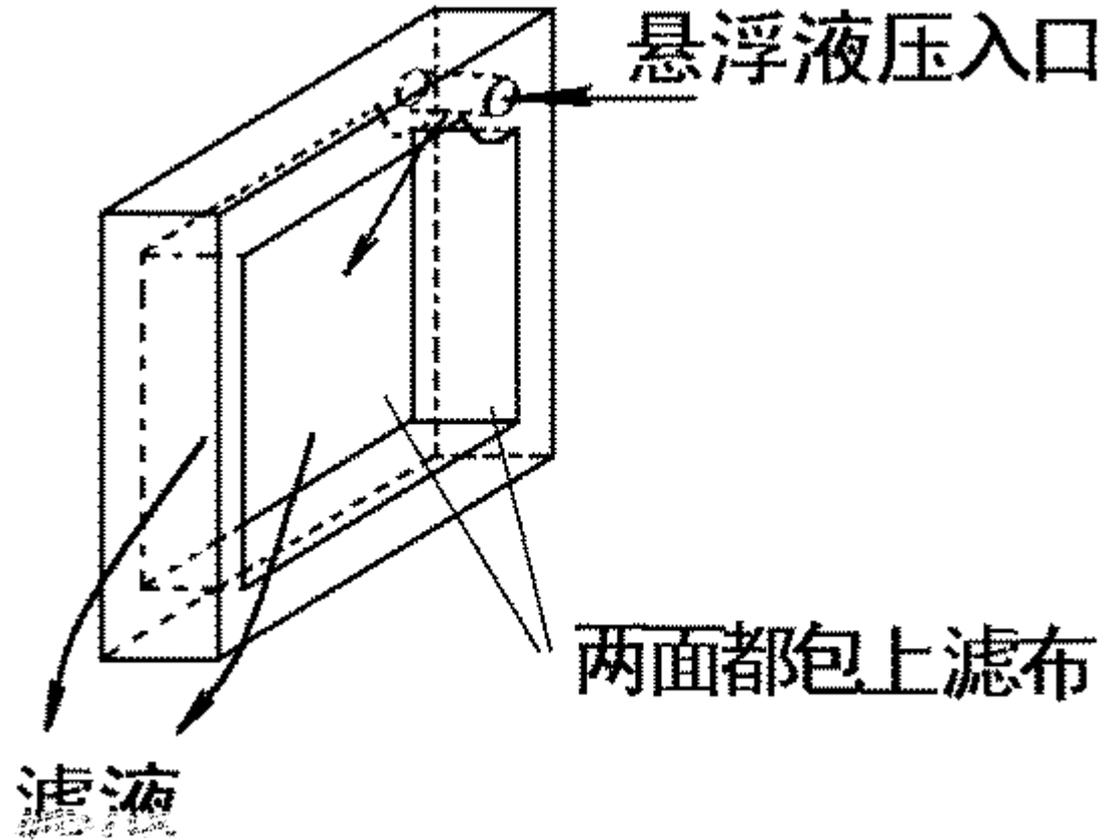


#### 方式2.混入悬浮液



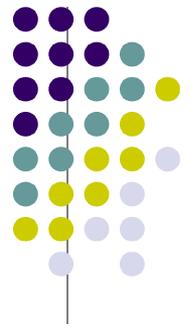


工业上，例如用板框压滤机



过滤完毕时，框内充满滤饼

## 4.5 过滤过程计算



滤液通过饼层的流动

**空隙率**：单位体积床层中的空隙体积。

=空隙体积 / 床层体积

**床层比表面积**：单位体积颗粒所具

$$a_B = \frac{4}{d_e} \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} a$$

**床层的当量直径**：

**压降**：滤液通过饼层的流动常属于层流流型，且瞬时定态。

$$\frac{P}{L} = 5 \frac{(1 - \epsilon)^2 a^2}{3} u \quad \longrightarrow \quad u = \frac{3}{5a^2(1 - \epsilon)^2} \frac{P}{L}$$

**过滤过程特点：**

- 1、滤饼中流体流动速度很慢
- 2、非定态

——过滤速度表达式

## 4.5.1 过滤过程数学描述



### (1) 物料衡算

悬浮液含固量表示方法:

质量分数  $w$ , kg固体/kg悬浮液

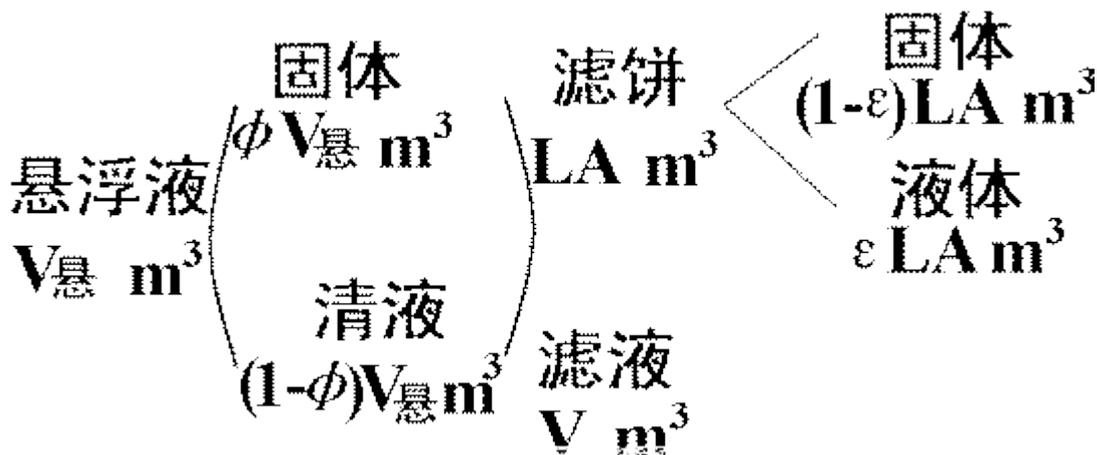
体积分数,  $\text{m}^3$ 固体/ $\text{m}^3$ 悬浮液

取1kg悬浮液

$$\frac{w / \rho \quad (1 - w) / \rho}{w / \rho \quad (1 - w) / \rho}$$

取1 $\text{m}^3$ 悬浮液

$$w \frac{\rho}{\rho (1 - \phi)}$$



注意: ①三个去向要清楚  
②基准要选好



# 滤饼层厚 $L \sim V$ 关系

$$(V + LA) = LA(1 - \alpha)$$

$$L = \frac{V}{A} \frac{1}{1 - \alpha} q$$

$$L = \frac{1}{1 - \alpha} q$$

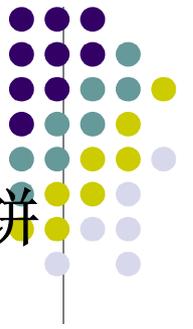
# 滤饼空隙率 $\epsilon$ 与含清液质量分率 $\frac{\text{饼水}}{\text{饼水}}$ 关系

取1kg滤饼

$$\frac{\text{饼水}}{\text{饼水} + (1 - \text{饼水}) / p}$$

取1m<sup>3</sup>滤饼

$$\text{饼水} \frac{1}{(1 - \text{饼水}) / p}$$



例1 有一板框压滤机， 框的边长为450mm， 厚度为25mm，  
有20个框。用来过滤含固体 $w=0.025$ 的水-固悬浮液， 滤饼  
含水40%(质量分率)，  $\rho_p=2100\text{kg/m}^3$ 。

试计算当滤饼充满滤框时所得的滤液量。

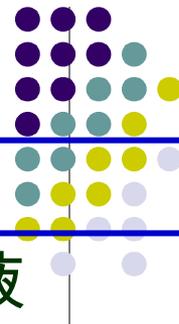
解：  $V_{\text{饼}}=0.45^2 \times 0.025 \times 20=0.101\text{m}^3$

$$\frac{\frac{V_{\text{饼}} w}{1 - w}}{\frac{V_{\text{饼}} w}{1 - w} + \frac{V_{\text{饼}} \rho_p}{1000}} = \frac{0.4/1000}{0.4/1000 + (1 - 0.4)/2100} \quad \square \quad 0.583$$

$$\frac{V_{\text{饼}} (1 - w)}{V_{\text{饼}} (1 - w) + \frac{V_{\text{饼}} \rho_p}{1000}} = w$$

$$V = V_{\text{饼}} \left[ \left( \frac{1}{w} - 1 \right) (1 - w) - \frac{\rho_p}{1000} \right] = 0.101 \left[ \left( \frac{1}{0.025} - 1 \right) (1 - 0.583) - 2.1 \right] = 3.39\text{m}^3 \quad \square$$

## (2) 过滤速率与过滤速度



	过滤速度	过滤速率
定义	单位时间通过单位过滤面积的滤液体积	单位时间获得的滤液体积称为过滤速率
表达式	$u = \frac{dV}{Ad} \frac{1}{5a^2(1-\frac{P_{\text{饼}}}{L})^2}$	$\frac{dV}{d} \frac{1}{5a^2(1-\frac{P_{\text{饼}}}{L})^2}$

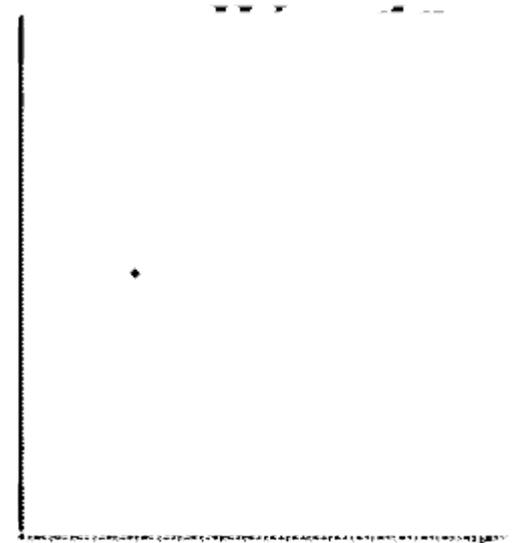
滤饼比阻  $r = \frac{5a^2(1-\frac{P_{\text{饼}}}{L})}{3} \quad (4-35、36)$

$L(1-\frac{P_{\text{饼}}}{L}) = q \quad (4-34)$

$P_{\text{饼}} = r q \mu u$

$u = \frac{dq}{d} \frac{P}{r q}$

速率  $\frac{dq}{d} = \frac{P}{r q}$



$$P = P_{\text{饼}} + P_{\text{介}}$$

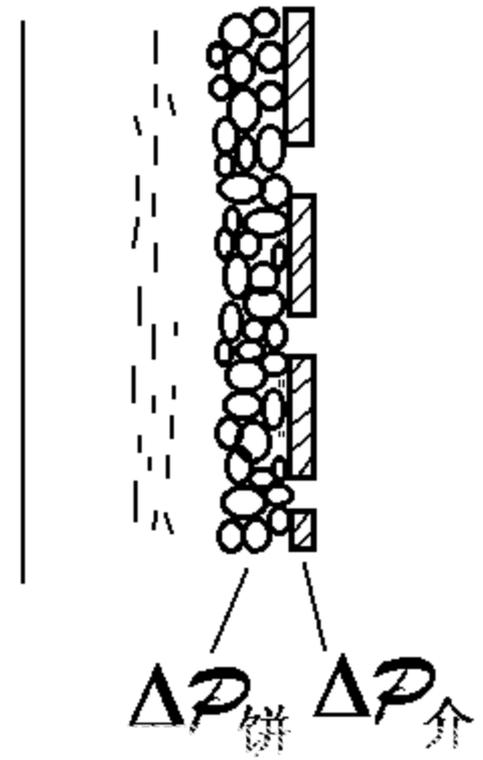
串联过程：速率相同

$\frac{dq}{d}$	$\frac{P_{\text{饼}}}{r}$	$\frac{P_{\text{介}}}{r}$	$\frac{P}{r}$
	$q$	$q_e$	$(q \quad q_e)$

$q_e$ 为过滤介质当量滤液量

参数归并

$K$	$\frac{2P}{r}$
-----	----------------



过滤速率基本方程

$\frac{dq}{d}$	$\frac{K}{2(q \quad q_e)}$
$\frac{dV}{d}$	$\frac{KA^2}{2(V \quad V_e)}$

(4-41、42)

$V_e = Aq_e$
--------------

**K**与悬浮液性质和  $\Delta P$ 有关

滤饼性质 ( $s$ 、 $\alpha$ )

滤浆性质 ( $\mu$ 、 $\rho$ )

滤饼比阻:  $r=r_0 P^s$

不可压缩滤饼,  $s=0$ ,  $r$ =常数,  $K \propto P$

可压缩滤饼,  $s=0.2 \sim 0.8$ ,  $K \propto P^{1-s}$ ,  $s$ 为压缩指数

影响 $q_e$ 或 $V_e$ 的因素:

过滤介质的性质 (孔的结构、 $r$ 、厚度)

$K$	$\frac{2 P}{r}$
$r$	$\frac{5a^2 1}{3}$
$\frac{dq}{d}$	$\frac{K}{2(q - q_e)}$
$\frac{dV}{d}$	$\frac{KA^2}{2(V - V_e)}$

# 4.5.5 过滤基本方程的应用

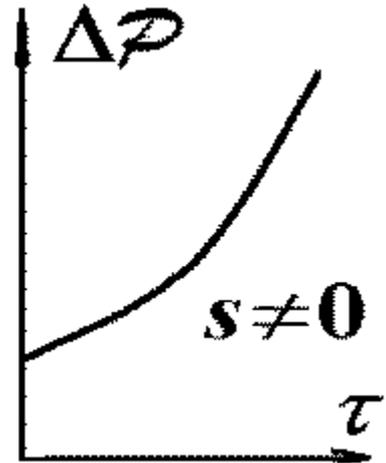
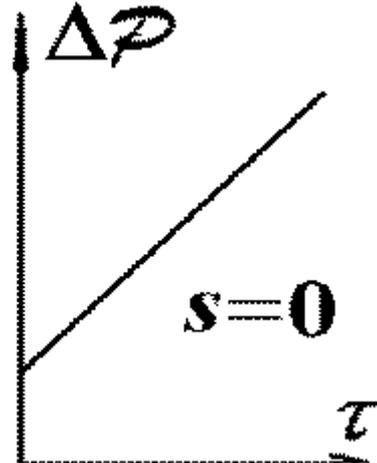
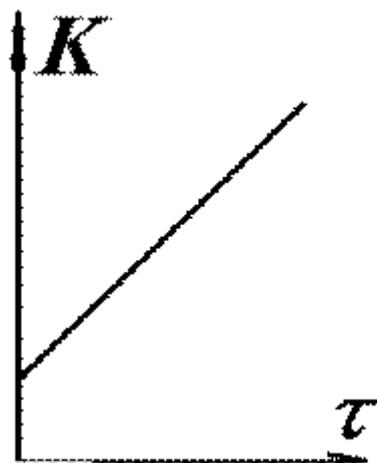
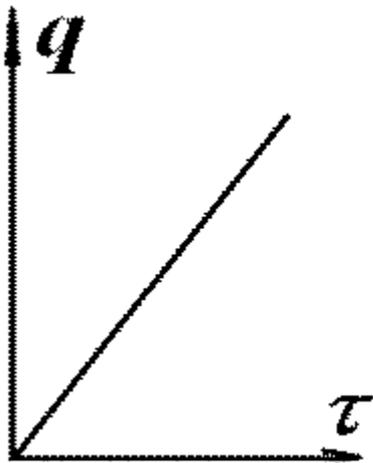
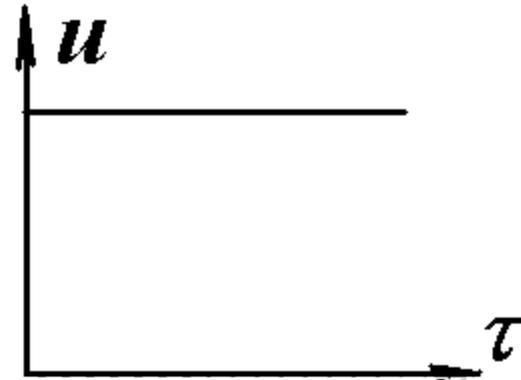
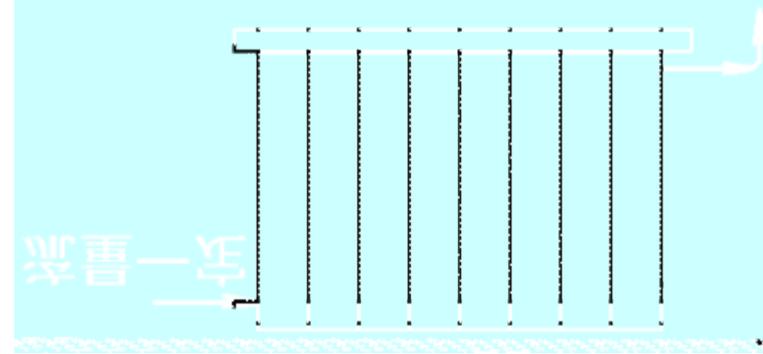
## (1) 恒速过滤

隔膜式往复泵，流量一定

$$\frac{dq}{d\tau} = \frac{K}{2(q + q_e)} \quad \text{常数 } u$$

若  $q_e = 0, q = 0$  则  
 $q = u\tau$

$$\frac{q_{终}}{q_{终}} = \frac{K_{终}}{2(q_{终} + q_e)}$$



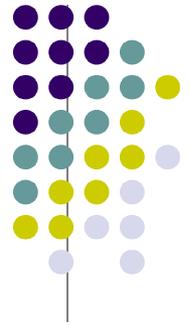
$$q^2 \quad qq_e \quad \frac{K}{2}$$

(4-44、45)

或

$$V^2 \quad VV_e \quad \frac{KA^2}{2}$$

注意K变化



(2) 恒压过滤

$$\frac{dq}{d} = \frac{K}{2(q + q_e)}$$

若  $q=0, d=0$  则积分

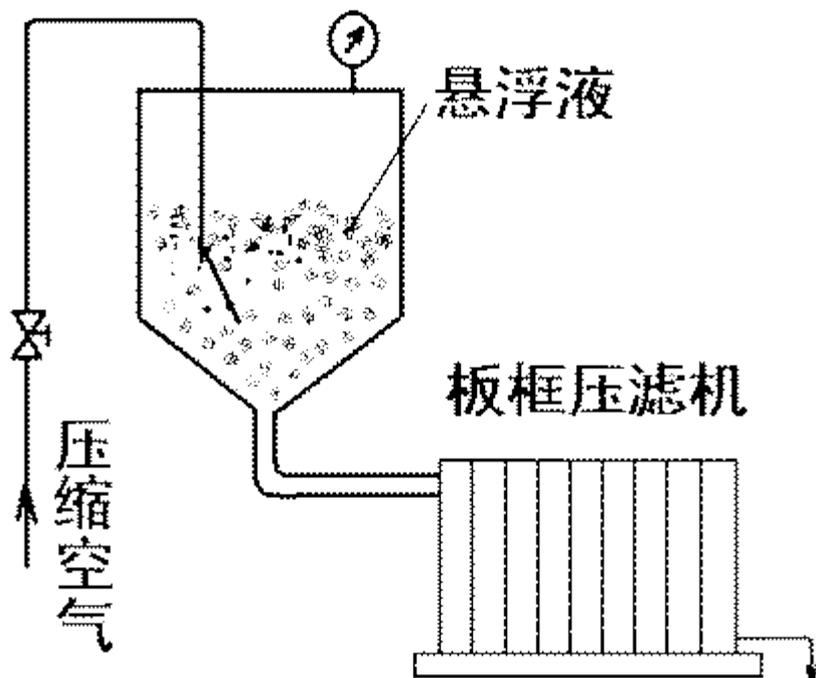
$$\int_0^q \frac{dq}{2(q + q_e)} = \frac{K}{2} \int_0^d \frac{d}{d}$$

$$V^2 = 2VV_e + KA^2$$

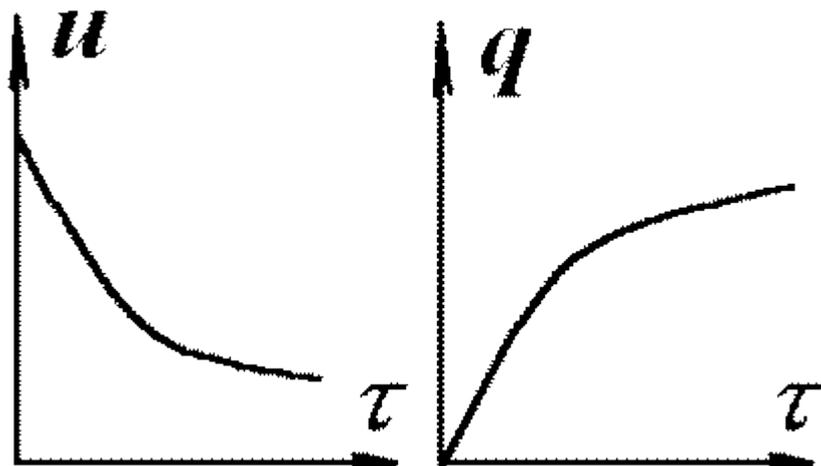
$$q^2 = 2qq_e + K$$

$$K = \frac{2 P^{1/2} s}{r_0}$$

$$q = \sqrt{K} \frac{q_e^2 + q_e}{q_e}$$



(4-46、47)





**例：**过滤一种固体颗粒体积分数为0.1的悬浮液，滤饼含水的体积分数为0.5，颗粒不可压缩，经实验测定滤饼比阻为 $1.3 \times 10^{11} \text{m}^{-2}$ ，水的粘度为 $1.0 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 。在压强差恒为 $9.8 \times 10^4 \text{Pa}$ 的条件下过滤，假设滤布阻力可以忽略，试求：

- 1) 每 $\text{m}^2$ 过滤面积上获得 $1.5 \text{m}^3$ 滤液所需的过滤时间。
- 2) 如将此过滤时间延长一倍，可再得滤液多少？

**解：**过滤 $1 \text{m}^3$ 悬浮液

$$\frac{1 \quad 0.1}{1 \quad 0.9 \quad 1 \quad 0.1} \quad 0.125 \text{m}^3 / \text{m}^3$$



$$K = \frac{2 P}{r_0 P^s} = \frac{2 \cdot 9.81 \cdot 10^4}{1.0 \cdot 10^3 \cdot 1.3 \cdot 10^{11} \cdot 0.125} = 1.21 \cdot 10^2 \text{ m}^2/\text{s}$$

∵滤布阻力可忽略  $q^2 = K t$

$$\frac{q^2}{K} = \frac{1.5^2}{1.21 \cdot 10^2} \text{ s} = 186 \text{ s}$$

2) 求过滤时间加倍时的滤液量

$$2 \cdot 186 = 372 \text{ s}$$

$$q = \sqrt{K t} = \sqrt{1.21 \cdot 10^2 \cdot 372} = 2.12 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$q = 2.12 \cdot 1.5 = 0.62 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

### (3) 先变压后恒压



从  $q_1$  开始恒压操作

$$\int_{q_1}^q 2(q - q_e) dq = K \int_1^d$$

$$(q^2 - q_1^2) - 2q_e(q - q_1) = K(d - 1)$$

或

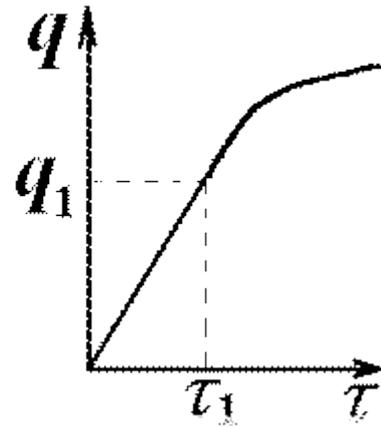
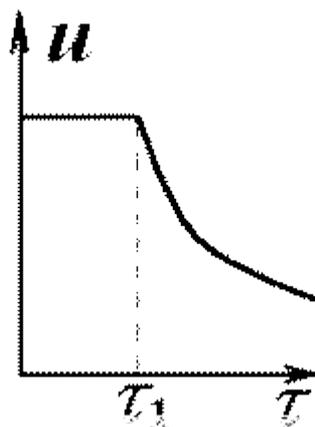
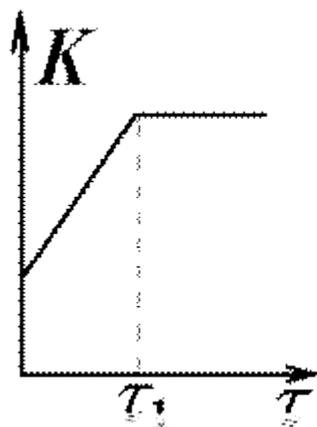
$$(V^2 - V_1^2) - 2V_e(V - V_1) = KA^2(d - 1)$$

(4-48、49)

如先恒速后恒压  
恒速段

$$\frac{q_1}{1} = \frac{K_{终}}{2(q_1 - q_e)}$$

$$K_{终} = K_{恒}$$





# 4.5.6 过滤常数的测定

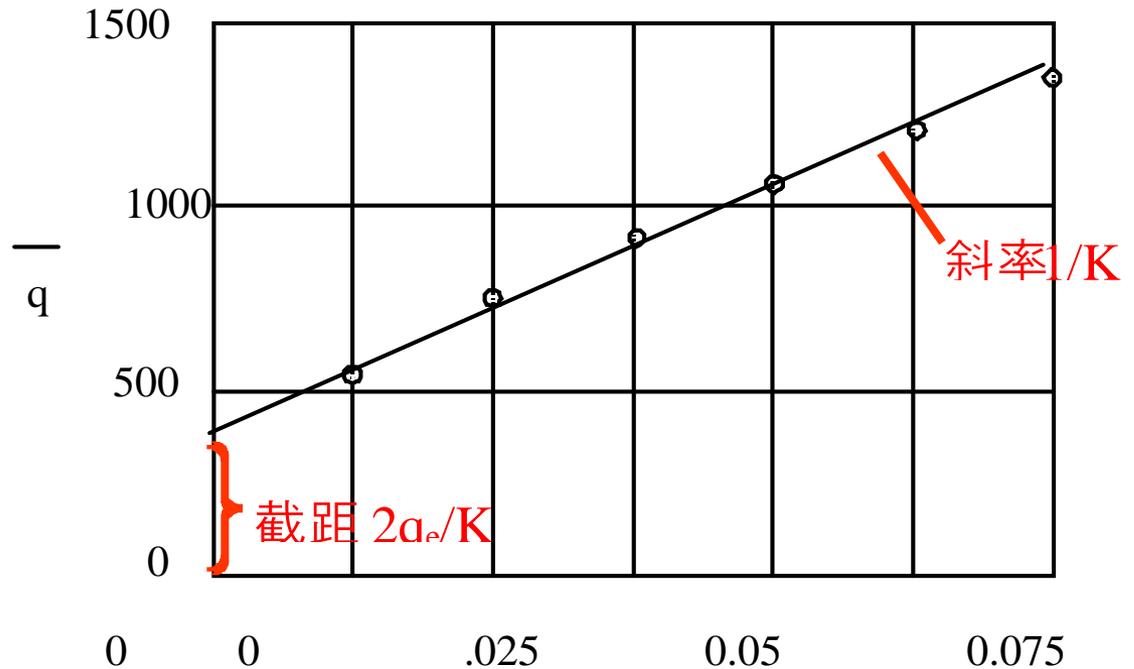
(1) 过滤方程中的  $V_e(q_e)$ 、 $K$  均为过滤常数，可以通过实验测定

恒压时:  $q^2 = 2qq_e + K \frac{1}{q} = \frac{2}{K}q + \frac{2q_e}{K}$

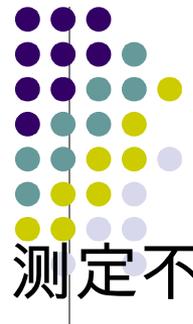
在恒压下做实验

No.  $q$

- 1 ... ..
- 2 ... ..
- 3 ... ..



$q^2 \sim q$  图



## (2) 压缩指数S的测定

按照恒压下测定K值的方法，取不同的压差  $P$ ，测定不同的K。

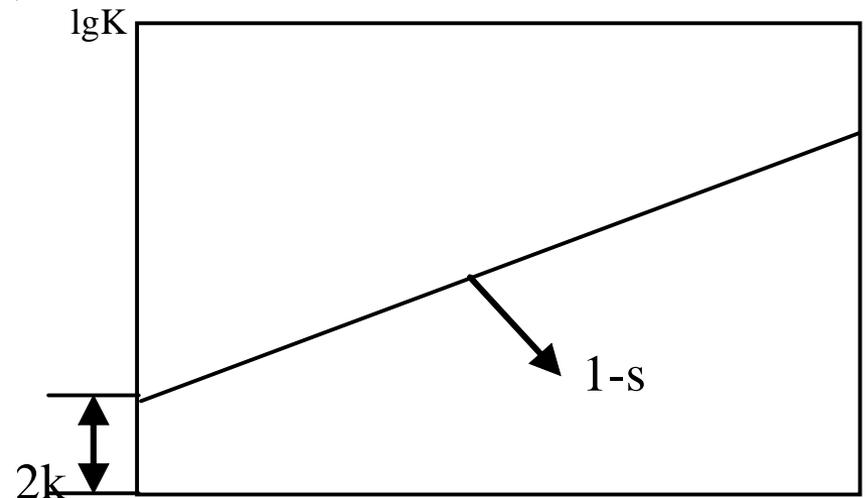
$$K = 2k P^{1-s}$$

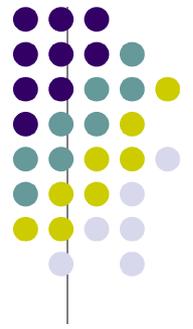
取对数  $\lg K = (1-s)\lg P + \lg(2k)$

其中  $k = \frac{1}{r_0}$  为常数

斜率： $1-s$

截距： $2k$





## 4.4.2 过滤设备

过滤设备 { 以 力差为推动力：如板框 滤机、叶滤机、  
回转真空过滤机等；  
以 心力为推动力：如各 离心机。

# (1) 板框过滤机

结构:

滤框、滤板

过滤板  
洗涤板

10 60块不等,

过滤面积约为2 80m<sup>2</sup>

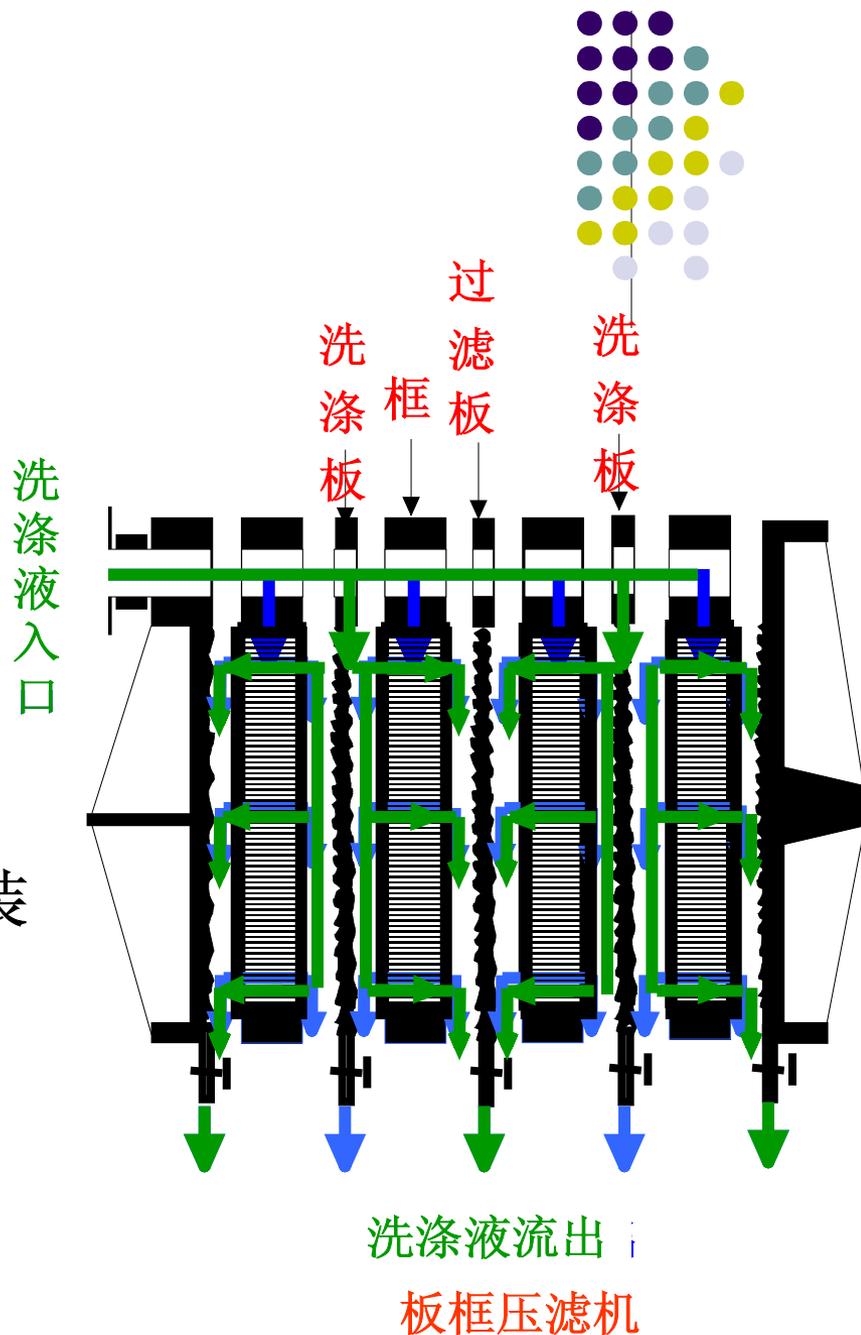
一个操作循

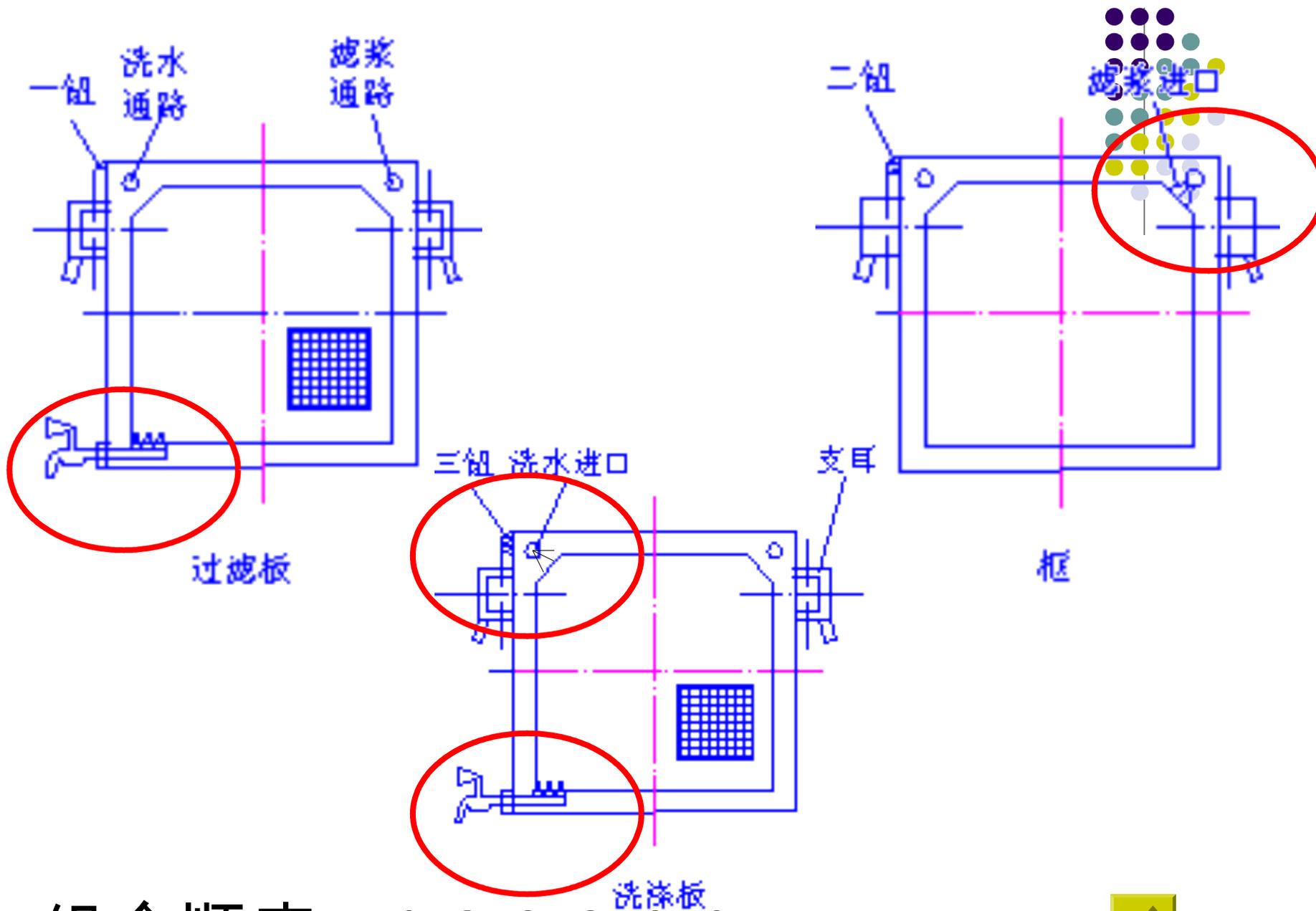
环: 过滤、洗涤、卸渣、整理重装

特点:

属间歇式

横穿洗涤:  $L_w=2L$





组合顺序：1-2-3-2-1-1





## 板框压滤机

**优点：**结构简单，制造容易，设备紧凑，过滤面积大而占地小，操作压强高，滤饼含水少，对各种物料的适应能力强。

**缺点：**间歇手工操作，劳动强度大，生产效率低。

BMS20/635-25

滤框厚度，mm

滤框边长，mm

滤框面积，m<sup>2</sup>

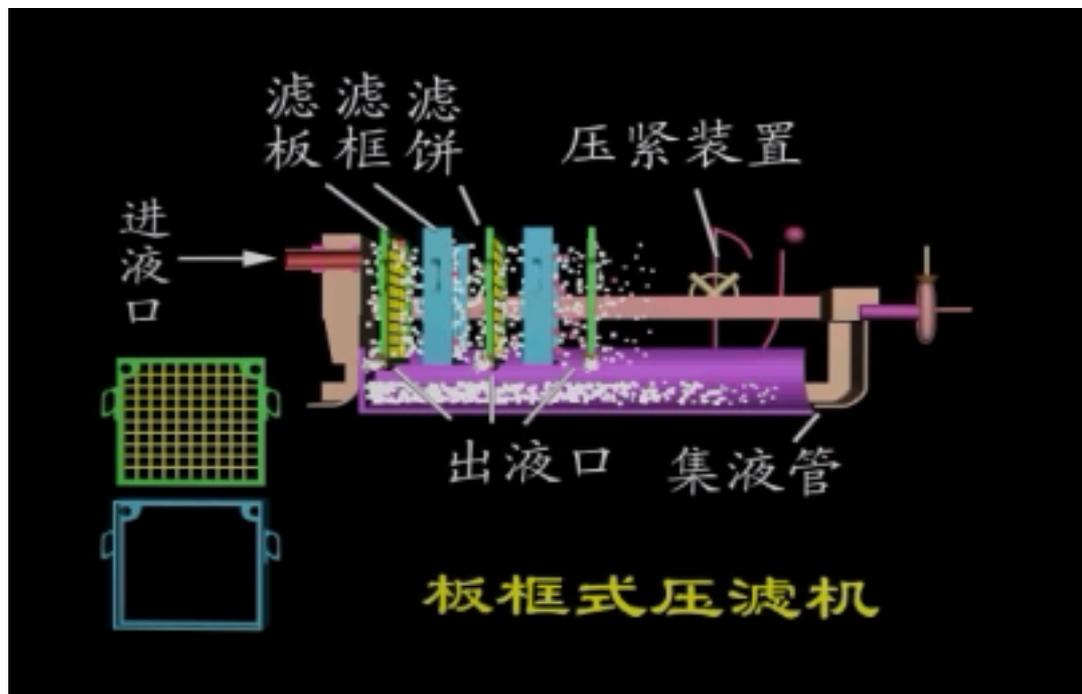
手动式压紧

液压压紧式(Y)

明流式

暗流式(A)

板框压滤机



## (2) 叶滤机



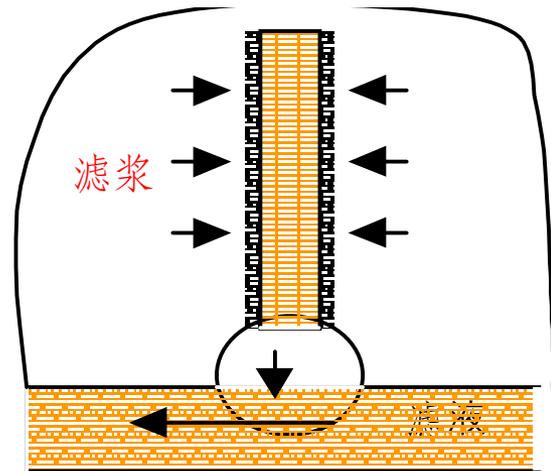
结构： 滤叶

一个操作循环 过滤、洗涤、卸渣、整理重装

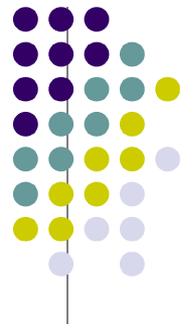
特点： 属间歇式  
置换洗涤： $L_w=L$

操作周期： 与板框机相同

**叶滤机的优点是设备紧凑，密闭操作，劳动条件较好，每次循环滤布不用装卸，劳动力较省。**



滤叶的构造



### (3) 转筒真空过滤机

构

造：转筒-----筒的侧壁上覆盖有金属网，长、径之比约为  
**1/2 2**；

滤布 -----蒙在筒外壁上。

分配头---转动盘、固定盘

浸没于滤浆中的过滤面积约占全部面积的30 40%

转速为**0.1至2 3** ( **r/min**)

一个操作循环： 过滤、洗涤、吹松、刮渣

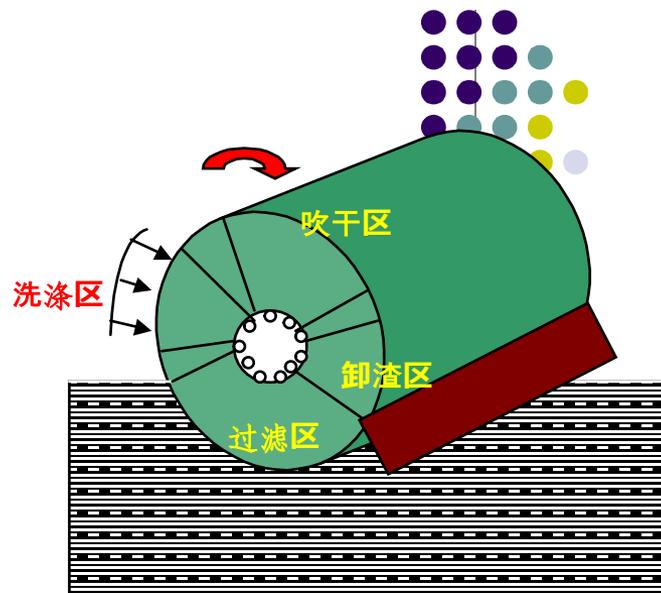
特点： 属连续式

置换洗涤： $L_w=L$

## 转筒真空过滤机

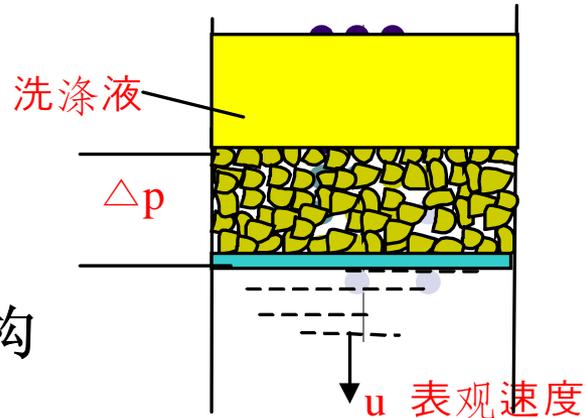
**优点**是能连续自动操作，省人力，生产能力大，适用于处理易含过滤颗粒的浓悬浮液。

**缺点**是附属设备较多，投资费用高，过滤面积不大。过滤推动力有限，不易过滤高温的悬浮液。



回转真空过滤机上的转筒

### 4.5.3 洗涤速率与洗涤 间



**目的：** 为了回收滤饼里存留的滤液，或者净化构成滤饼颗粒。

**特点：** 洗涤时推动力、阻力不变，洗涤速度为常数。

#### (1) 洗涤速率

**洗涤速率：** 单位时间内消耗的洗水容积，以  $(dq/dt)_w$  表示。

**洗涤时间：** 
$$t_w = \frac{q_w}{\left(\frac{dq}{dt}\right)_w} = \frac{dq}{d} \cdot \frac{\text{洗涤推动力}}{\text{洗涤阻力}}$$

与滤饼厚度、滤饼性质、洗涤液粘度、介质阻力有关

洗涤速率与过滤終了时的过滤速率有关，这个关系取决于滤液设备上采用的洗涤方式。

叶滤机采用的置换洗涤法，洗水与过滤终了时的滤液

液流过的路径就完全相同。  $(L+L_e)_w = (L+L_e)_E$

当操作压强差和洗水与滤液粘度相同时

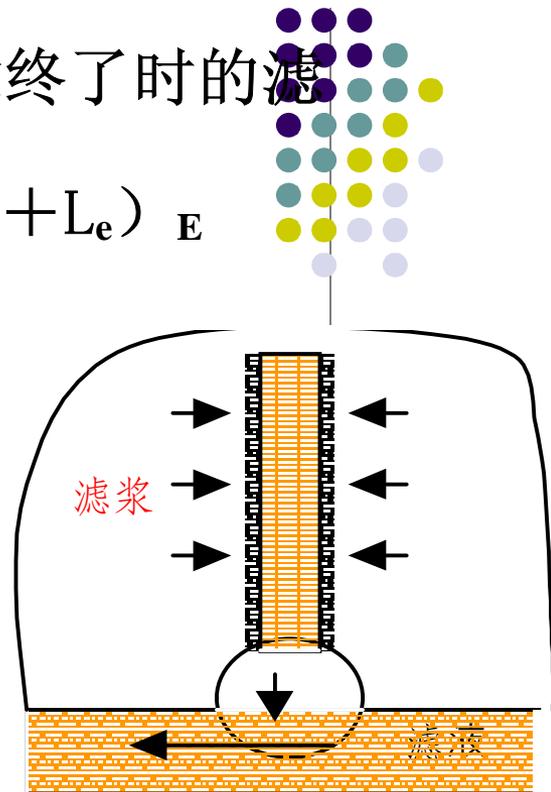
$$\left(\frac{dV}{d}\right)_w = \left(\frac{dV}{d}\right)_{E,终} \frac{KA^2}{2(V - V_e)} \quad (4-54)$$

$$V_w = V_w / \left(\frac{dV}{d}\right)_w = \frac{2(V - V_e)V_w}{KA^2} \quad (4-55)$$

$$\left(\frac{dq}{d}\right)_w = \frac{P_w}{r_w (q - q_e)} = \frac{P_w}{P} \frac{P}{r_w (q - q_e)}$$

$$\frac{P_w}{P} \frac{dq}{d} \quad (4-52、53)$$

$$q_w = q_w / \left(\frac{dq}{d}\right)_w$$



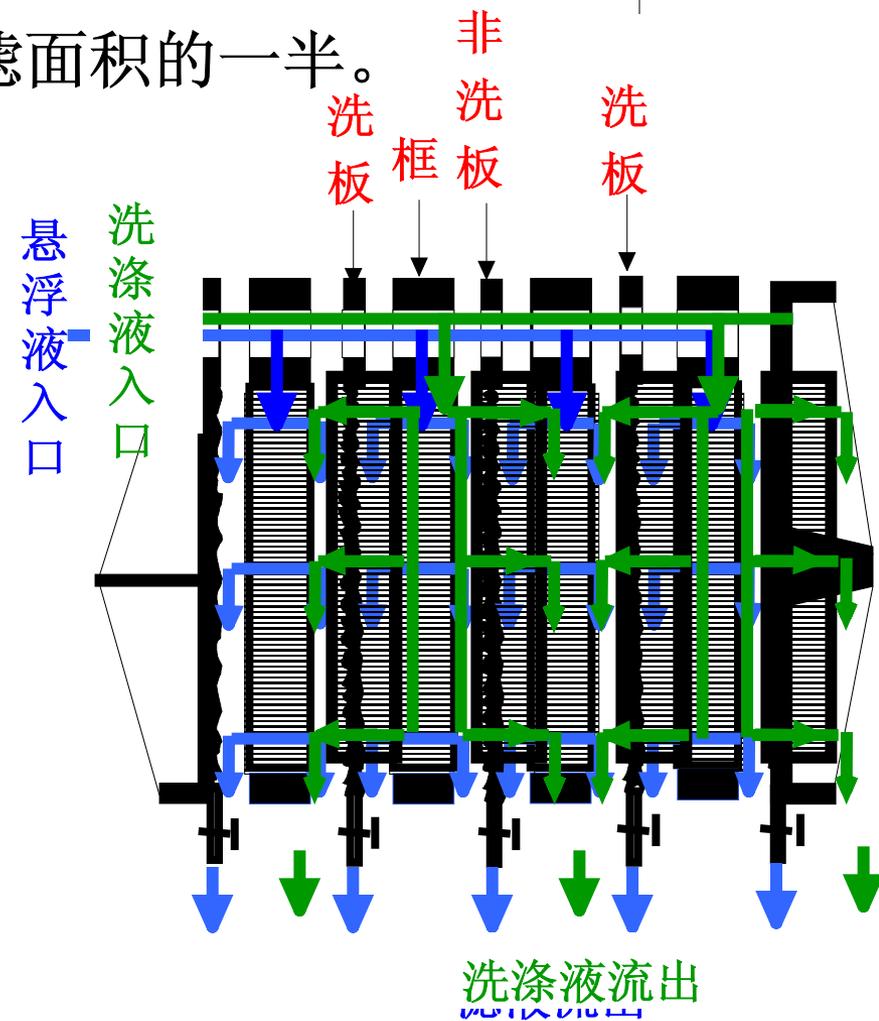
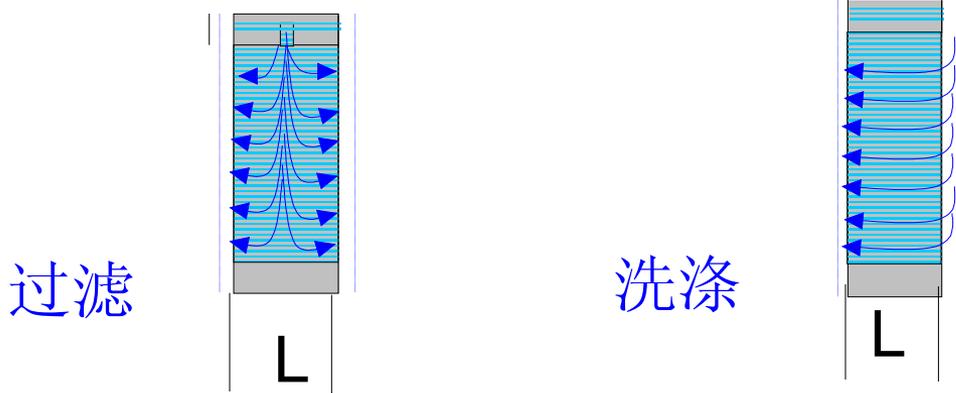
滤叶的构造



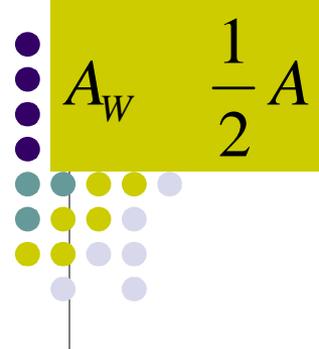
板框过滤机采用的是**横穿洗涤法**，洗水横穿两层滤布及整个厚度的滤饼，流径长度约为过滤终了时滤液流动的两倍。而供洗水流通的面积仅为过滤面积的一半。

$$(L + L_e)_W = 2(L + L_e)_E$$

$$A_W = \frac{1}{2} A$$



板框压滤机



**板框过滤机：**当操作压强差和洗水与滤液粘度相同时

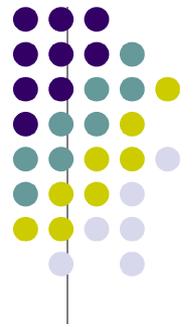
$$t_w = \frac{2(V + V_e)V_w}{\frac{1}{4}KA^2} = \frac{8(V + V_e)V_w}{KA^2}$$

$$\frac{dV}{d} \quad \frac{1}{4} \frac{P_w}{P} \quad \frac{dV}{d} \quad \text{终}$$

当洗水粘度、洗水表压与滤液粘度、过滤压强差有明显差异时，所需的过滤时间可进行校正。

$$t_w' = t_w \left( \frac{\mu_w}{\mu} \right) \left( \frac{P}{P_w} \right)$$

## 4.5.4 过滤过程计算



变量分析

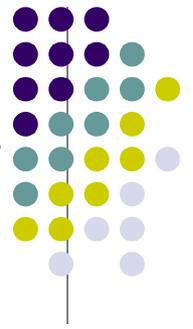
设计型：已知： $q_e, K, V, \quad , \quad \mathbf{P}$

求： $A$

操作型：已知： $A, q_e, K, V, \quad \mathbf{P}$  (或 )

求： $\quad$  (或  $\mathbf{P}$ )

过滤机的生产能力：单位时间的滤液体积或滤渣体积， $\text{m}^3/\text{s}$



## (1) 间歇过滤机的生产能力

一个操作周期时间为  $W + D + S$

生产能力为  $Q = \frac{V}{W + D}$

在间歇过滤机的生产中，总是力求获得最大的生产能力，因此，对于间歇过滤过程来说，合理选择每个循环中的过滤时间，可以得到最大的生产能力。

# 生产能力的优化

间歇过滤机恒压操作有优化问题

$$Q = \frac{V}{W + D} f(\tau)$$

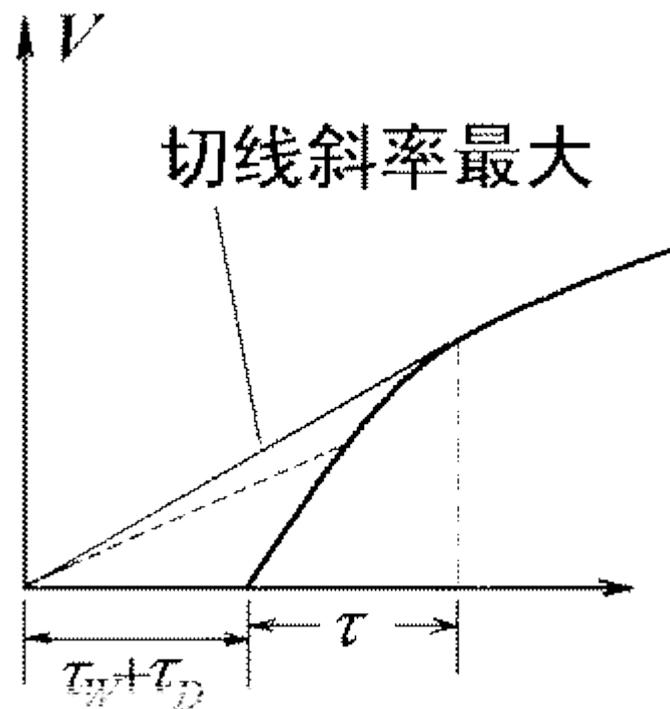
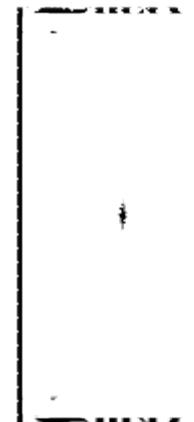
令  $\frac{dQ}{d\tau} = 0$  可得  $\tau_{opt}$

$$\tau_{opt} = \frac{(\sqrt{KA^2(W + D)} + V_e)^2 - V_e^2}{KA^2}$$

当  $V_e=0$  时,

图解思维

$$\tau_{opt} = \frac{W + D}{KA}$$



## (2) 连续过滤机的生产能力

操作周  
期:

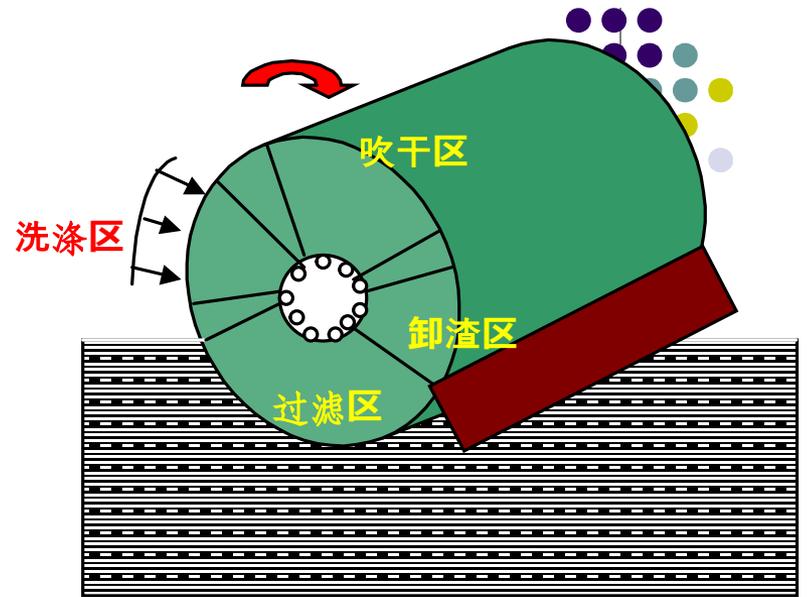
$$T = \frac{1}{n} [s]$$

设转筒浸入面积占全部转筒面积的分率为**浸没度**，则  
= 浸没角度/360°

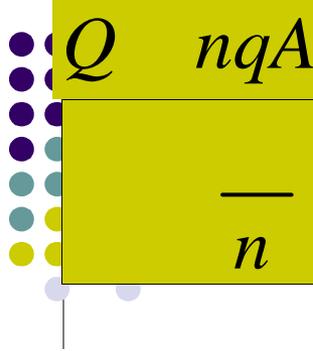
$$T = \frac{1}{n}$$

生产能  
力:

$$Q = nqA = nV$$



回转真空过滤机上的转筒



转筒旋转一圈得滤液体积：

$$q = \sqrt{K} q_e^2 = q_e \sqrt{K \left( \frac{1}{n} q_e^2 \right)} = q_e$$

生产能力：

$$Q = nqA = n \sqrt{\frac{1}{n} KA^2} V_e^2 = V_e$$

当滤布阻力可以忽略不计时

$$Q = n \sqrt{KA^2 \frac{1}{n}} = \sqrt{KA^2 n}$$

其中：  $A = DL$  D-转筒直径 L-转筒的长度

思考题：

$n \uparrow$ ,  $Q$  \_\_,  $q$  \_\_, 饼 \_\_。

转速n愈高，浸没度愈大，生产能力愈大。



例1 拟用一板框过滤机在0.3MPa压差下恒压过滤某悬浮液。已知 $K=7\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ,  $q_e=0.015\text{m}^3/\text{m}^2$ , 现要求每一操作周期得到 $10\text{m}^3$ 滤液, 过滤时间为0.5h, 滤饼不可压缩, 悬浮液  $\phi=0.015$  ( $\text{m}^3\text{固体}/\text{m}^3\text{悬浮液}$ ), 滤饼空隙率  $\varepsilon=0.5$ , 试问:

①需要多大的过滤面积;

②如操作压差提高到0.8MPa, 恒压操作。现有一台板框过滤机, 每一个框的尺寸为 $0.635\times 0.635\times 0.025\text{m}$ , 若要求每个过滤周期得到的滤液量仍为 $10\text{m}^3$ , 过滤时间不得超过0.5h, 则至少需要多少个框?

解: ①  $q = \sqrt{K} q_e^2 q_e$

$$\sqrt{7 \times 10^5 \times 1800 \times 0.015^2} = 0.015 \times 0.340 \text{ m}^3 / \text{m}^2$$

$$A = \frac{V}{q} = \frac{10}{0.34} = 29.4 \text{ m}^2$$

②  $S=0, K' = \frac{P'}{P} K = \frac{0.8}{0.3} \times 7 \times 10^5 = 1.87 \times 10^4 \text{ m}^2 / \text{s}$

$$q = \sqrt{K'} q_e^2 q_e = \sqrt{1.87 \times 10^4 \times 1800 \times 0.015^2} = 0.015$$

$$A = \frac{V}{q} = \frac{10}{0.565} = 17.7 \text{ m}^2$$

$$n = \frac{A}{2a^2} = \frac{17.7}{2 \times 0.635^2} = 22 \uparrow$$

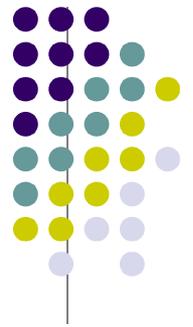
这样可行吗?

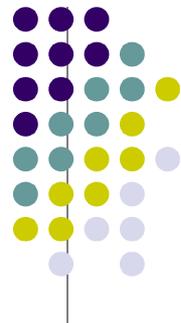
$$(V+V_{\text{饼}}) = V_{\text{饼}}(1- )$$

$V_{\text{饼}}$	$\frac{V}{1}$	$\frac{10 \quad 0.015}{1 \quad 0.5 \quad 0.015}$	$0.309m^3$
----------------	---------------	--	------------

$n$	$\frac{V_{\text{饼}}}{ba^2}$	$\frac{0.309}{0.025 \quad 0.635^2}$	$31\uparrow$
-----	-----------------------------	-------------------------------------	--------------

取31个





## 4.6 加快过滤速率的途径

过滤技术的改进①物料适应性

②加快过滤速率

### 4.6.1 改变滤饼结构

结构特征：空隙率、压缩性

办法：用助滤剂（刚性，多孔性，尺度均匀）

预敷和掺滤

### 4.6.2 改变悬浮液中颗粒聚集状态

目的：小颗粒一聚成大颗粒

办法：加聚合电解质、无机电解质

如：脏水用明矾

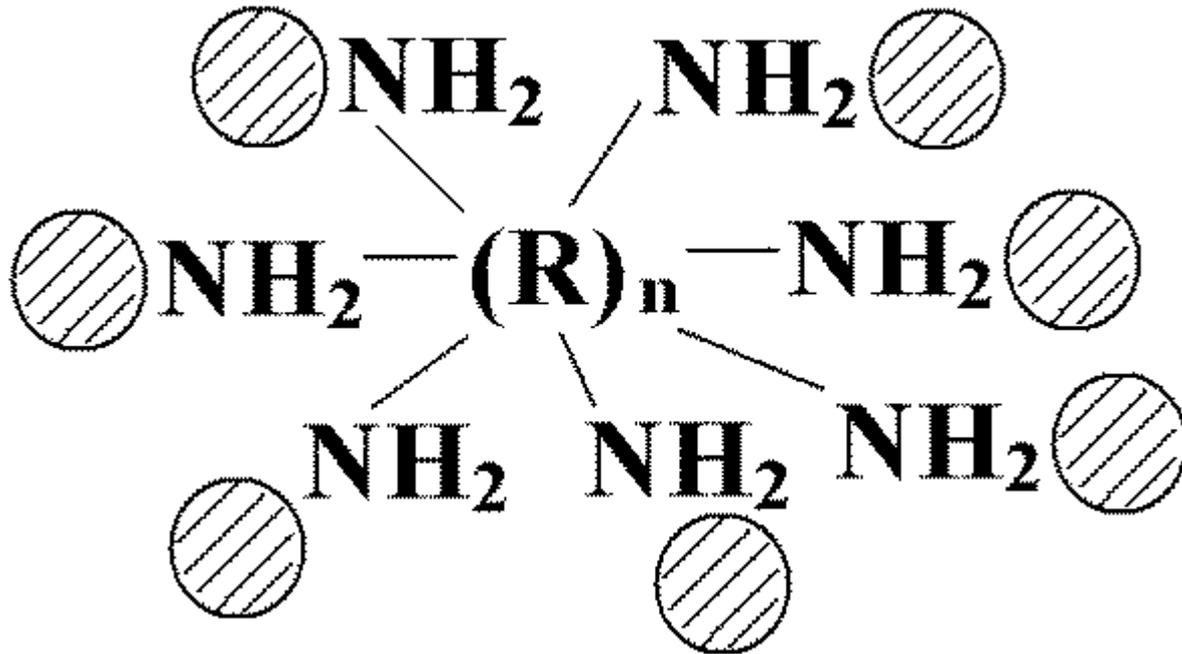


凝聚剂、絮凝剂、沉降剂

如：聚丙烯酰胺

极性基团对尘粒的吸附作用

氢键作用



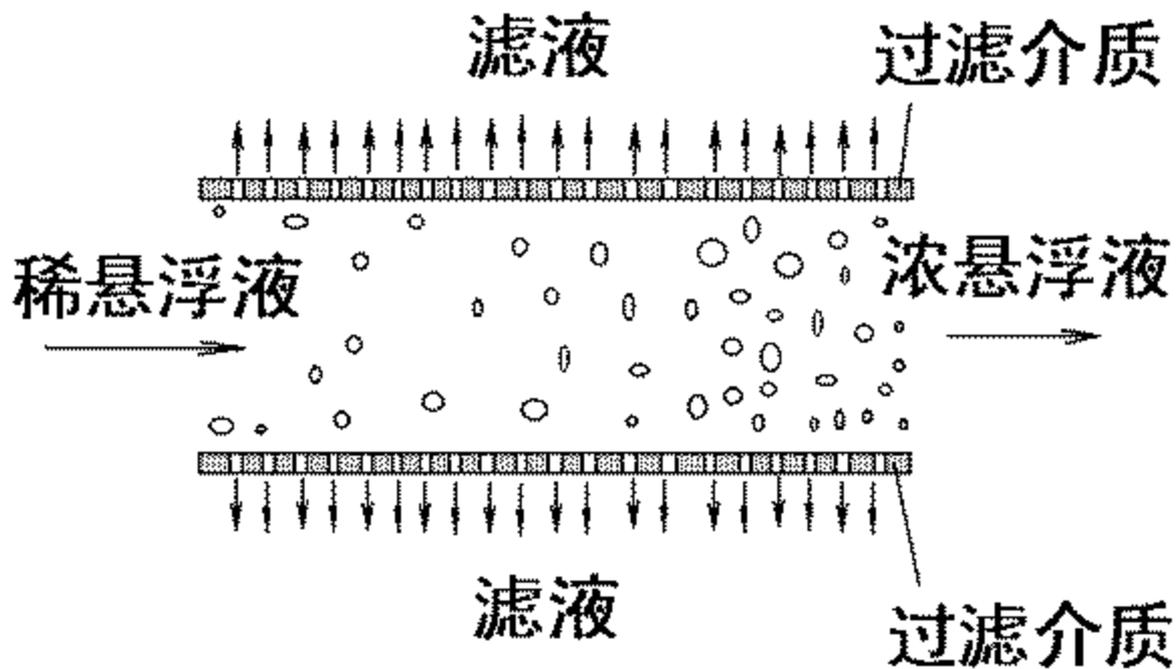


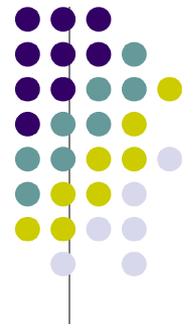
### 4.6.3 动态过滤

传统的滤饼过滤—终端过滤

动态过滤—用机械的，水力的， 电场的方法

限制滤饼增长





本次讲课习题:

第四章 9, 10, 12 第五章 1, 2

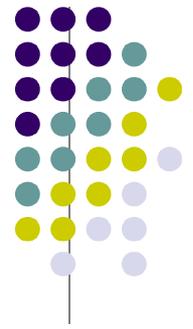


1、拟用板框压滤机恒压过滤含 $\text{CaCO}_3$ 8%(质量)的水悬浮液 $2\text{m}^3$ ，每 $\text{m}^3$ 滤饼中含固体 $1000\text{kg}$ ， $\text{CaCO}_3$ 密度为 $2800\text{kg}/\text{m}^3$ ，过滤常数 $K=0.162\text{m}^2/\text{h}$ ，过滤时间 $\tau=30\text{min}$ ，试问：

①滤液体积 $\text{m}^3$ ，

②现有 $560 \times 560 \times 50\text{mm}$ 规格的板框压滤机，

问需要多少只滤框？（过滤介质阻力不计）



1. 解：①物料衡算  $(1 - ) \rho = 1000 \text{kg/m}^3$

$$1 \frac{1000}{2800} 0.643$$

$$\frac{(1 - )V_{\text{饼}} \rho}{(1 - )V_{\text{饼}} \rho + V_{\text{饼}} V} = 0.08$$

$$\frac{V_{\text{饼}}}{V} = \frac{0.08}{(1 - 0.08)(1 - ) \rho} = 0.0921$$

由  $V + V_{\text{饼}} = 2$  ,  $\frac{V_{\text{饼}}}{V} = 0.0921$

得  $V = 1.831 \text{m}^3$  ,  $V_{\text{饼}} = 0.169 \text{m}^3$

②  $V_e=0$ ,  $V^2=KA^2$ ,

$A$	$\frac{V}{\sqrt{K}}$	$\frac{1.831}{\sqrt{0.162 \times 0.5}}$	$6.43m^3$
-----	----------------------	---	-----------



每个框的过滤面积  $A_0=0.56^2 \times 2=0.627m^2$

框数  $n = \frac{A}{A_0} = \frac{6.43}{0.627} = 10.26$ , 取整11个

验证  $V_{\text{饼}}$  是否够放

框内容积  $= 11 \times 0.56^2 \times 0.05 = 0.172m^3 > 0.169m^3 (V_{\text{饼}})$

够放下



2、某悬浮液用板框过滤机过滤，该板框过滤机有滤框28个，尺寸为 $635 \times 635 \times 25\text{mm}$ ，操作表压恒定为 $98.1\text{kPa}$ ，该条件下  $K=1 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ ，

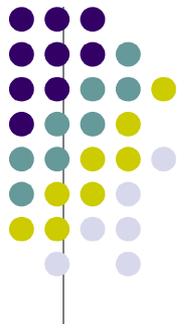
$q_e=0.02\text{m}^3/\text{m}^2$ 。已知滤饼与滤液的体积比为 $0.075$ ，试求：

- ①滤饼充满滤框需要多少时间？
- ②若将操作表压提高一倍。其他条件不变（ $S=0.5$ ），则充满同样滤框所需时间为多少？
- ③若将框厚增加一倍，其他操作条件同2，则过滤同样时间可获得滤液多少？

2. 解: ①  $V_{\text{饼}} = 28 \times 0.635^2 \times 0.025 = 0.282 \text{m}^3$ ,

由  $\frac{V_{\text{饼}}}{V} = 0.075$

$V = \frac{0.282}{0.075} = 3.763 \text{m}^3$



$A = 28 \times 0.635^2 \times 2 = 22.58 \text{m}^2$ ,

$q = \frac{V}{A} = 0.167 \text{m}^3 / \text{m}^2$

$\frac{q^2}{K} = \frac{2qq_e}{1 \cdot 10^5} = \frac{0.167^2 \cdot 2 \cdot 0.167 \cdot 0.02}{1 \cdot 10^5} = 3444 \text{s}$

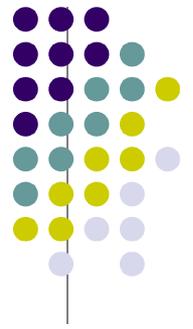
②  $K = p^{1.5}$ ,  $K' = 2^{1.05} K = 1.41 \cdot 10^5 \text{m}^2 / \text{s}$

$K' = \frac{q^2}{2qq_e} K$ ,  $\frac{K}{K'} = \frac{3444 \cdot 10^5}{1.41 \cdot 10^5} = 2435 \text{s}$

③ '不变, V不变



**例：**用一台BMS/635-25板框压滤机过滤一种含固体颗粒为 $25\text{kg}/\text{m}^3$ 的悬浮液，共有26个框，在过滤机入口处滤浆的表压为 $3.39 \times 10^5\text{Pa}$ ，已测得在此压力下 $K=1.86 \times 10^{-4}$ ， $q_e=0.0282$ ，所用滤布与实验时的相同，料浆温度为 $25^\circ\text{C}$ ，每次过滤到滤饼充满滤框为止，然后用清水洗涤滤饼，洗水温度及表压与滤浆相同，体积为滤液体积的8%，每次卸渣，清理，装合等辅助操作时间为15min。已知固相颗粒密度为 $2930\text{kg}/\text{m}^3$ ，又测得湿滤饼的密度为 $1930\text{kg}/\text{m}^3$ 。求此板框压滤机的生产能力。



解:

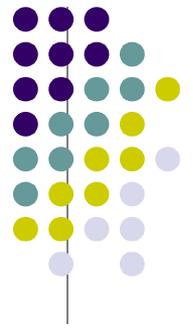
$$\text{总过滤面积 } A = 0.625^2 \times 2 \times 26 = 20.8m^2$$

$$\text{滤框总容积 } V = 0.625 \times 0.025 \times 26 = 0.262m^3$$

已知 $1m^3$ 滤饼的质量为 $1930kg$ , 其中含水 $x kg$ , 水的密度

按 $1000kg/m^3$ 考虑。

$$\frac{1930 - x}{2930} = \frac{x}{1000} \quad 1 \quad x=518kg$$



1m<sup>3</sup>滤饼中固相颗粒质量为1930-518=1412 kg

设每1m<sup>3</sup>悬浮液中含水ykg

$$\frac{y}{1000} = \frac{25}{2930} \quad 1 \quad y=991.5 \text{ kg}$$

生成1m<sup>3</sup>滤饼所需的滤浆质量为

$$1412 / \left( \frac{25}{991.5 + 25} \right) = 57412 \text{ kg}$$

生成1m<sup>3</sup>滤饼的滤液的质量为：(57412-1930) =55482kg

$$\text{滤液体积为：} \frac{55482}{1000} = 55.48 \text{ m}^3$$



滤框全部充满时的滤液体积为

$$V = 55.48 \times 0.262 = 14.54 \text{ m}^3$$

过滤终了时单位面积滤量为

$$q = \frac{V}{A} = \frac{14.54}{20.8} = 0.699 \text{ m}^3 / \text{m}^2$$

代入  $q^2 = 2q_e q + K$

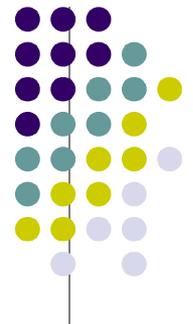
$$q^2 = 2 \times 0.0282 \times q + 1.86 \times 10^4$$

$$2835 \text{ s}$$

过滤终了时滤液的速率

$$\left. \frac{dq}{dt} \right|_{q=0.669} = \left. \frac{K}{2(q - q_e)} \right|_{q=0.669}$$

$$\frac{1.86 \times 10^4}{2} \times \frac{1}{0.669 - 0.0282} = 1.28 \times 10^4 \text{ m} / \text{s}$$



洗涤液体积  $V_W$     0.08V    0.08    14.54     $1.763m^3$

$$w \frac{V_W}{\frac{1}{4} \left( \frac{dV}{d} \right)} = \frac{1.163}{\frac{1}{4} \cdot 20.8 \cdot (dq/d)_E} = \frac{1.163}{6.6 \cdot 10^4}$$

1746s

生产能力

$$Q = \frac{14.54 \cdot 3600}{2836 \cdot 1746 \cdot 900}$$

$10.1m^3 / h$