

第3章 非均相物系分离

3.4 过滤

Filter/Filtrate

3.4.1、过滤操作的基本概念

3.4.2、过滤基本方程式

3.4.3、恒压过滤

3.4.4、恒速与先恒速后恒压过滤

3.4.5、过滤常数的测定

3.4.6、过滤设备

3.4.7、滤饼的洗涤

3.4.8、过滤机的生产能力

下页



帮助

返回

3.4.1、过滤操作的基本概念

1、过滤的概念

过滤 利用能让液体通过而截留固体颗粒的多孔介质（过滤介质），使悬浮液中固液得到分离的单元操作。

滤浆 (料浆)：过滤操作中所处理的悬浮液suspension liquid。

滤液：通过多孔介质的液体。

滤渣 (滤饼)：被截留住的固体物质。

实现过滤操作的外力有重力、压力、离心力。

化工中应用最多的是**压力过滤**。

2、过滤方式

过滤

深床过滤 固体颗粒的沉积发生在较厚的粒状**过滤介质床层内部**，**悬浮液中的颗粒直径小于床层直径**，当颗粒随流体在床层的曲折孔边穿过时，便粘附在过滤介质上。

适用于悬浮液中颗粒甚小且含量甚微（固相体积分率在0.1%以下）的场合。

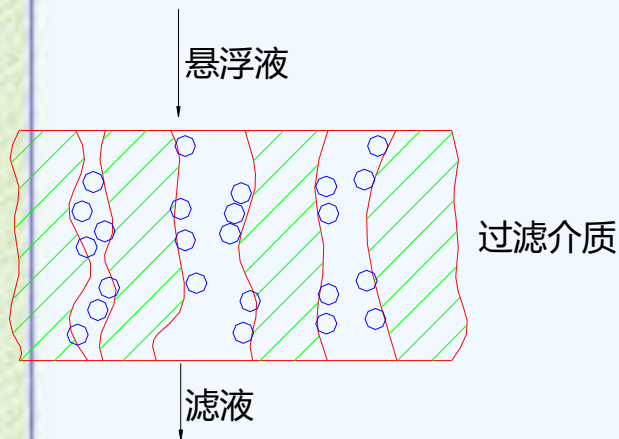
滤饼过滤 固体颗粒成饼层状沉积于**过滤介质表面**，形成滤饼。

适用于处理固相含量稍高（固相体积分率在1%以上）的悬浮液。

两种过滤方式 { 深层过滤 Clarifying filtration

滤饼过滤

推动力：重力、压力、离心力

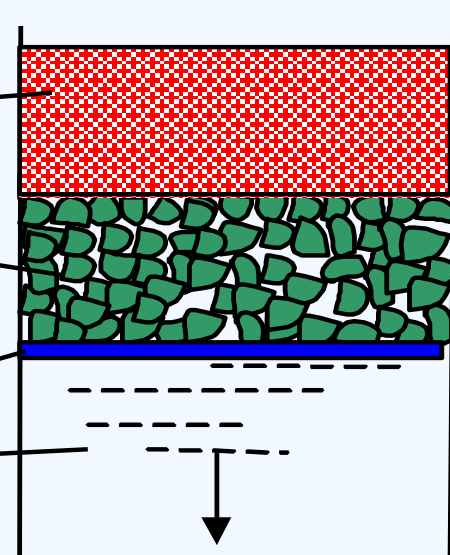


Suspension 滤浆

Cake 滤饼

Medium 过滤介质

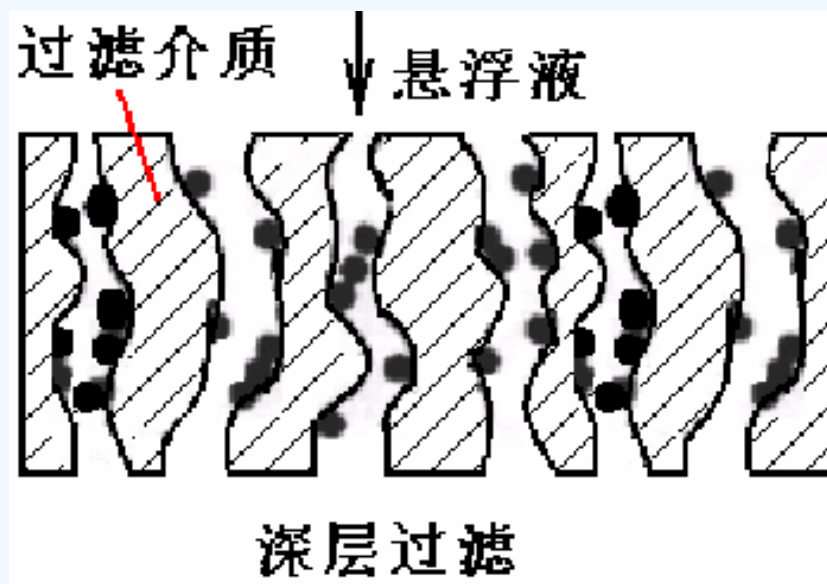
filtrate 滤液



滤饼过滤操作示意图

深层过滤:

➤ 过滤介质一般为介质层较厚的滤床类（如沙层、硅藻土、核桃壳等）。



- 小于介质孔隙的颗粒可进入到介质内部，在长而曲折的孔道中被截留并附着于介质之上。
- 深层过滤无滤饼形成，主要用于净化含固量很少（ $<0.1\%$ ）的流体，如水的净化、烟气除尘等。



3. 滤饼的压缩性和助滤剂

- ▶ **不可压缩性滤饼：**随着推动力压差的增大，滤饼的形状、空隙等不变。
- ▶ **可压缩性滤饼：**如氢氧化物的胶体物质。

助滤剂

质地坚硬，能形成疏松饼层的粒状物质，可在滤布上预涂，也可预混在悬浮液中，使滤液得以畅通。



滤饼的压缩性和助滤剂

特性:

- 能形成多孔饼层的刚性颗粒，提高滤饼渗透性，减小阻力；
- 一定的化学稳定性；
- 操作压差的范围内不可压缩性。

应用范围:

以获得滤液为目的时可考虑加入助滤剂，当滤饼作为产品要回收时则不可用。



加入助滤剂可减少可压缩滤饼的流动阻力



加入方法 { 预涂 (的颗粒状物质)
将助滤剂混在滤浆中一起过滤

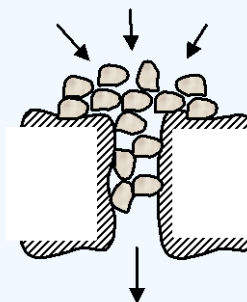
珍珠岩助滤剂

助滤剂的要求: 刚性颗粒, 不可压缩, 化学稳定。

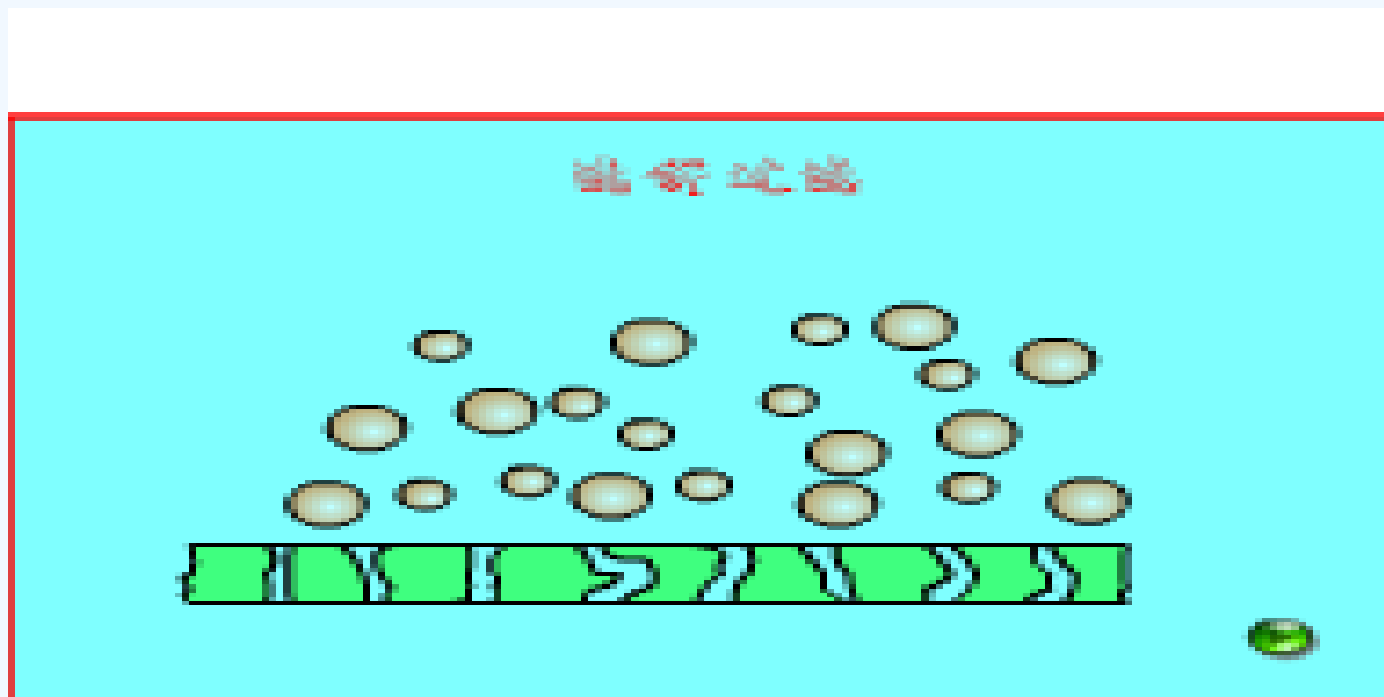
滤饼过滤中

流体→滤饼层(固定床)+过滤介质

过滤后期，**滤饼**为主要的“过滤介质”。



(b) 架桥现象



4、过滤介质

过滤介质是滤饼的支承物，应具有下列条件：

- a) 多孔性，孔道适当的小，对流体的阻力小，又能截住要分离的颗粒。
- b) 物理化学性质稳定，耐热，耐化学腐蚀。
- c) 足够的机械强度，使用寿命长
- d) 价格便宜

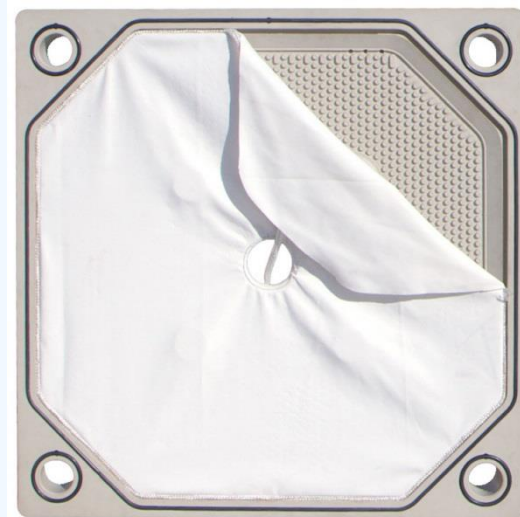


超细聚丙烯纤维滤材

工业常用的过滤介质主要有：

要求：具有多孔性，足够的机械强度。

- ① 丝织物品：棉、麻、合纤、金属网(滤布、滤纸)；
- ② 多孔性固体介质：多孔塑料；
- ③ 堆积介质：砂、木炭、石棉粉等。



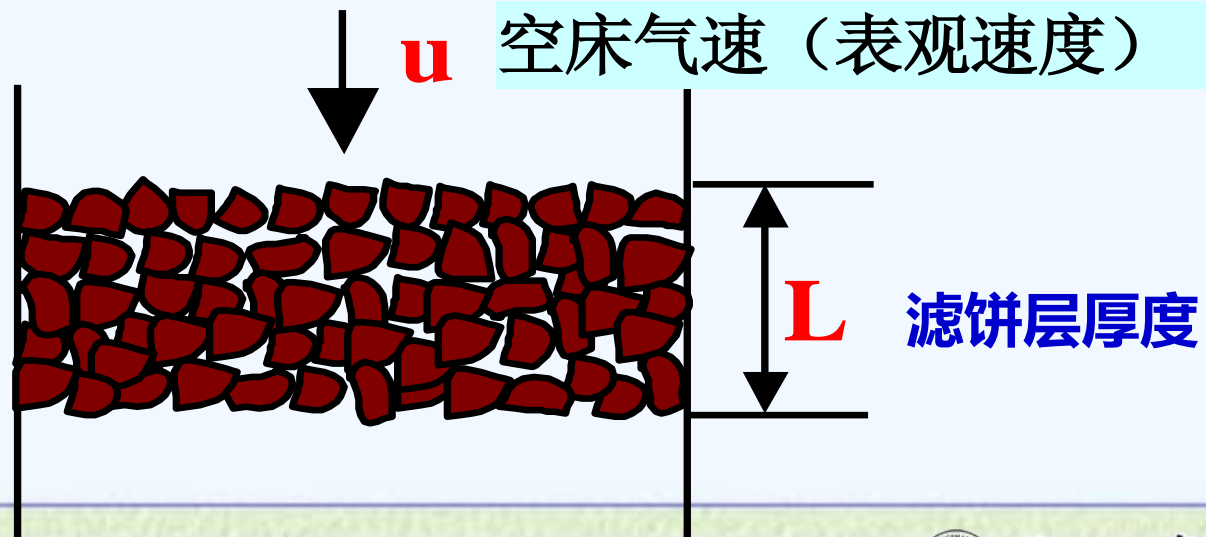
3.4.2、过滤基本方程式

过滤过程流动的特点：

- 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：

由流体与颗粒表面之间的摩擦所引起的-----粘性摩擦阻力。

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。



过滤基本方程(Equation of filtration)

1、滤液通过饼层的流动

空隙率: 单位体积床层中的空隙体积, 用 ε 表示。

$$\varepsilon = \text{空隙体积} / \text{床层体积} \quad \text{m}^3/\text{m}^3$$

颗粒比表面积: 单位体积颗粒所具有的表面积, 用 a 表示。

$$a = \text{颗粒表面} / \text{颗粒体积}$$

$$d_e = 4 \times \text{水力半径} = 4 \times \text{管道截面积} / \text{润湿周边}$$

颗粒床层的当量直径可写为：

$d_e \propto \frac{\text{流通截面积} \times \text{流道长度}}{\text{润湿周边长度} \times \text{流道长度}}$

$d_e \propto \frac{\text{流道容积}}{\text{流道表面积}}$

取面积为 1m^2 厚度为 1m 的滤饼考虑：

床层体积 = $1 \times 1 = 1 \text{ m}^3$

流道容积 = $1 \times \varepsilon = \varepsilon \text{ m}^3$

流道表面积 = 颗粒体积 \times 颗粒比表面 = $1 \times (1 - \varepsilon) a \text{ m}^2$

所以床层的当量直径为：

$$d_e \propto \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon)a} \quad (1)$$

滤液通过饼层的流动常属于滞流流型，

$$u = \frac{d^2 \Delta p}{32 \mu l}$$

Hagen-Poiseuille

1、过滤基本方程的推导

$$a_B = a(1 - \varepsilon)$$

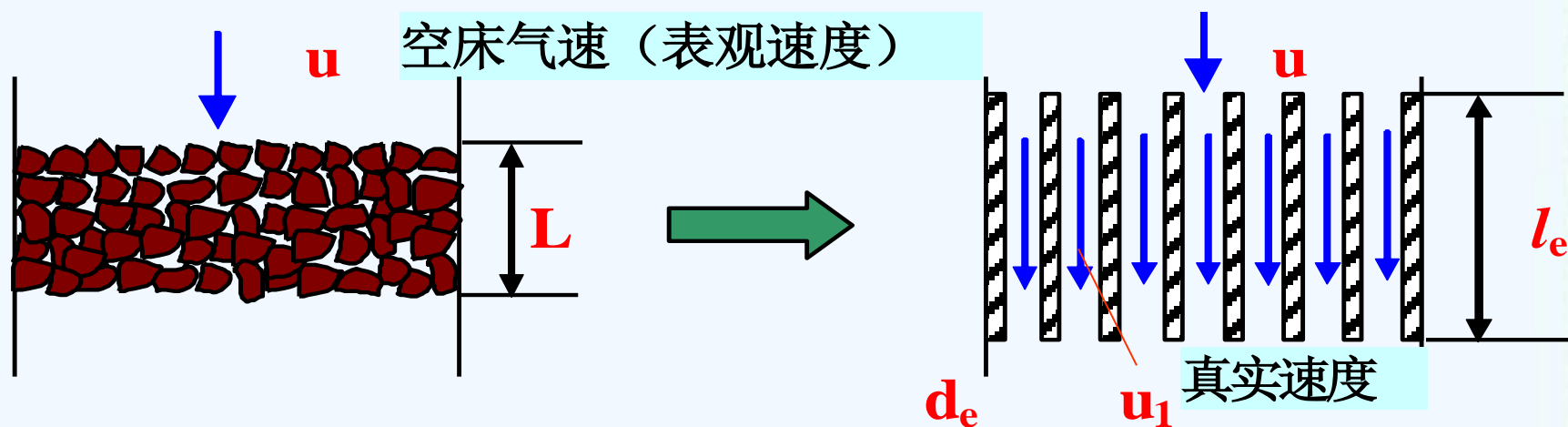
a - 每个颗粒的比表面积

a_B - 单位体积滤饼层所具有的表面积

$$d_e = \frac{4 \times \text{流通截面积}}{\text{润湿周边}}$$

$$= \frac{4 \times \text{细管的流动空间}}{\text{细管的全部内表面积}} = \frac{4\varepsilon V}{a_B V} = \frac{4\varepsilon}{a(1 - \varepsilon)}$$

$$A\varepsilon u_1 = Au \implies u_1 = \frac{u}{\varepsilon}$$



流体在固定床内流动的简化模型

滤液通过饼床层的流速与压强降的关系为：

$$u_1 \propto \frac{d_e^2 \Delta p_c}{\mu L} \quad (2)$$

在与过滤介质层相垂直的方向上床层空隙中的滤液流速 u_1 与按整个床层截面积计算的滤液平均流速 u 之间的关系为：

$$u_1 = u / \varepsilon \quad (3)$$

将 (1) 、 (3) 代入 (2) 并写成等式

$$u = \frac{1}{K'} \frac{\varepsilon^3}{a^2 (1 - \varepsilon)^2} \left(\frac{\Delta p_c}{\mu L} \right)$$

比例常数 K' 与滤饼的空隙率、粒子形状、排列及粒度范围等因素有关。对于颗粒床层的滞流流动， K' 值可取为5。

$$\therefore u = \frac{\varepsilon^3}{5a^2(1-\varepsilon)^2} \left(\frac{\Delta P_c}{\mu L} \right)$$

——过滤速度表达式

2、过滤速率

	过滤速率	过滤速度
定义	单位时间获得的滤液体积称为过滤速率	单位时间通过单位过滤面积的滤液体积
表达式	$\frac{dV}{d\theta} = \frac{\varepsilon^3}{5a^2(1-\varepsilon)^2} \left(\frac{A\Delta P_c}{\mu L} \right)$	$u = \frac{dV}{\textcircled{A}d\theta} = \frac{\varepsilon^3}{5a^2(1-\varepsilon)^2} \left(\frac{\Delta P_c}{\mu L} \right)$

3、滤饼的阻力

$$\text{令 } r = \frac{5a^2(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$$

——滤饼的比阻, $1/m^2$

$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{\Delta P_c}{\mu r L}$$

$$(4) \quad [r] = \frac{\Delta P}{\frac{dV}{Ad\theta} \cdot \mu L} = \frac{N/m^2}{\frac{m^3}{m^2 \cdot s} \cdot \frac{N}{m^2} \cdot s \cdot m} = \frac{1}{m^2}$$

$$\text{令 } R = rL$$

——滤饼阻力

$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{\Delta P_c}{\mu R}$$

(5)

速度 = 推动力/阻力

由 $R = rL$ 可知，比阻 r 是单位厚度滤饼的阻力，
数值上等于粘度为 $1\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的滤液以 1m/s 的平均流速通过厚度为 1m 的滤饼层时，所产生的压强降。

反映了颗粒形状、尺寸及床层空隙率对滤液流动的影响
床层空隙率 ε 愈小及颗粒比表面积 α 愈大，则床层愈致密，
对流体流动的阻滞作用也愈大。

4、过滤介质的阻力

过滤介质的阻力也与其厚度及本身的致密程度有关，通常把过滤介质的阻力视为常数。

滤液穿过过滤介质层的速度关系式：

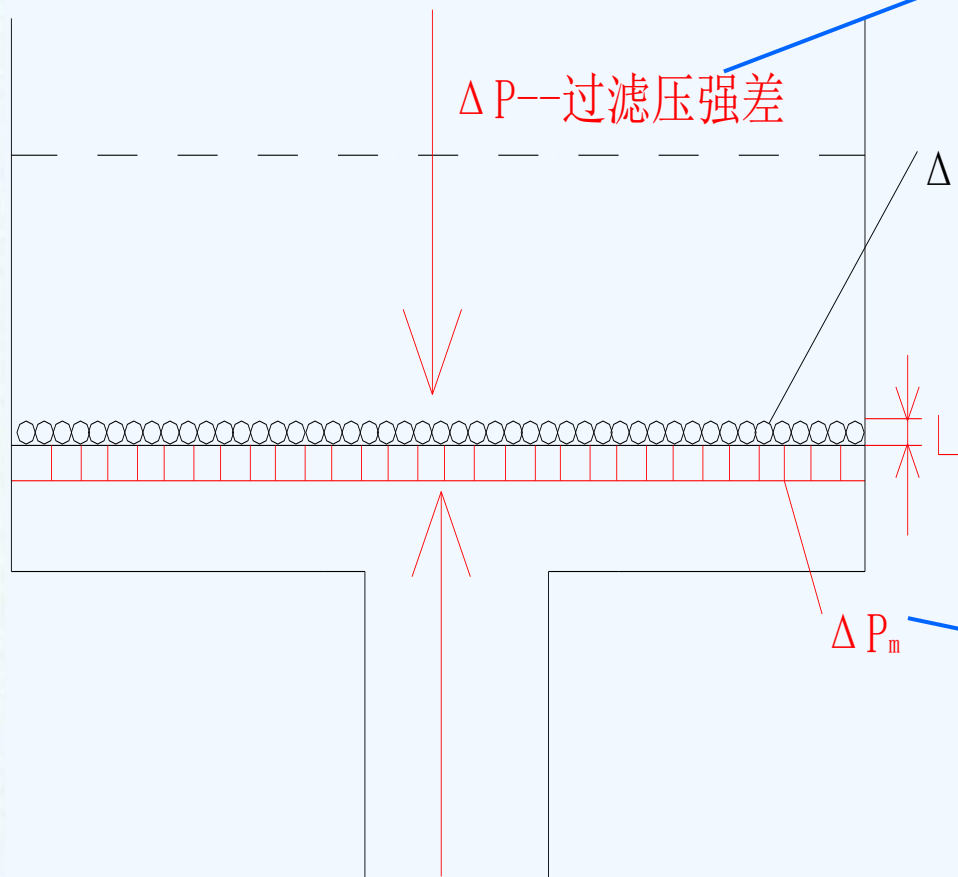
$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{\Delta P_m}{\mu R_m}$$

$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{\Delta p_c + \Delta p_m}{\mu(R + R_m)} = \frac{\Delta p}{\mu(R + R_m)}$$

式中： $\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m$ ，代表**滤饼与滤布（过滤介质）**两侧的总压强降，称为过滤**压强差**。也称为过滤设备的**表压强**。

可用滤液通过串联的滤饼与滤布的总压强降来表示过滤推动力，用两层的阻力之和来表示总阻力。

Δp 、 Δp_c 和 Δp_m 示意图



在实际过滤设备上，常有一侧处于大气压下，此时，就是另一侧表压的绝对值

滤液通过滤饼层的压强降

过滤介质上、下游两侧的压强差

$$\Delta P = \Delta P_c + \Delta P_m$$

滤饼与滤布两侧的总压强降，称为过滤压强差。

设想以一层厚度为 L_e 的滤饼来代替滤布，

$$rL_e = R_m$$

故 (6) 式可写为

$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{\Delta P}{\mu(rL + rL_e)} = \frac{\Delta P}{\mu r(L + L_e)} \quad (7)$$

式中：

L_e ——过滤介质的当量滤饼厚度，或称为**虚拟滤饼厚度**，m

在一定的操作条件下，以一定介质过滤一定悬浮液时， L_e 为定值，但同一介质在不同的过滤操作中， L_e 值不同。

5、过滤基本方程式

任一瞬间的滤饼厚度 L 与当时已经获得的滤液体积 V 之间的关系为：

$$LA = vV \quad L = \frac{vV}{A}$$

v ——滤饼体积与相应的滤液体积之比，无因次， m^3/m^3 。

同理：

$$Le = \frac{vV_e}{A}$$

V_e ——过滤介质的当量滤液体积，或称**虚拟滤液体积**， m^3

在一定的操作条件下，以一定介质过滤一定的悬浮液时， V_e 为定值，但同一介质在不同的过滤操作中， V_e 值不同。

(7) 式就可以写成

$$\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{\Delta P}{\mu r v \left(\frac{V + V_e}{A} \right)}$$

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{A^2 \Delta P}{\mu r v (V + V_e)}$$

——过滤速率的一般关系式

可压缩滤饼的情况比较复杂，它的比阻是两侧压强差的函数，

$$r = r' (\Delta P)^s \quad r' \text{ 是单位压强差下滤饼的比阻}$$

s——滤饼的压缩性指数，无因次。s=0~1，对于不可压缩滤饼，s=0。

对于可压缩滤饼，过滤速率

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{A^2 \Delta P^{1-s}}{\mu r' v (V + V_e)}$$

——过滤基本方程式

适用于可压缩滤饼及不可压缩滤饼。

对于不可压缩滤饼， $s=0$ 。

3.4.3、恒压过滤

恒压过滤：在恒定压强差下进行的过滤操作。

恒压过滤时，滤饼不断变厚致使阻力逐渐增加。但推动力 ΔP 恒定，**过滤速率逐渐变小。**

对于一定的悬浮液， μ, r' 及 v 均可视为常数。

$$\text{令 } k = \frac{1}{\mu r' v}$$

k ——表征过滤物料特性的常数， $(m^4/N.s)$ 。

$$\text{则过滤速率 } \frac{dV}{d\theta} = \frac{A^2 \Delta P^{1-s}}{\mu r' v (V + V_e)} \quad \text{变为: } \frac{dV}{d\theta} = \frac{k A^2 \Delta P^{1-s}}{V + V_e}$$

$$\text{积分得：} \int (V + V_e) = kA^2 \Delta P^{1-s} \int d\theta$$

假定获得体积为 V_e 滤液所需的虚拟过滤时间为 θ_e ,则积分的

边界条件为:

过滤时间

滤液体积

$$0 \rightarrow \theta_e$$

$$0 \rightarrow V_e$$

$$\theta_e \rightarrow \theta + \theta_e$$

$$V_e \rightarrow V + V_e$$

$$\therefore \int_0^{V_e} (V + V_e) d(V + V_e) = kA^2 \Delta P^{1-s} \int_0^{\theta_e} d(\theta + \theta_e)$$

$$\int_{V_e}^{V+V_e} (V + V_e) d(V + V_e) = kA^2 \Delta P^{1-s} \int_{\theta_e}^{\theta+\theta_e} d(\theta + \theta_e)$$

积分两式，并令 $K=2k\Delta P^{1-s}$

$$V_e^2 = KA^2\theta_e \quad V^2 + 2V_eV = KA^2\theta$$

两式相加，得：

$$(V + V_e)^2 = KA^2(\theta + \theta_e)$$

——恒压过滤方程式

表明：恒压过滤时，滤液体积与过滤时间的关系为抛物线方程

当介质阻力可以忽略时， $V_e=0$ ， $\theta_e=0$ ，过滤方程式则变为

$$V^2 = KA^2\theta$$

令 $q = \frac{V}{A}$ 及 $q_e = \frac{V_e}{A}$

$$q_e^2 = K \theta_e \quad q^2 + 2q_e q = K \theta$$

$$(q + q_e)^2 = K(\theta + \theta_e) \quad \text{——恒压过滤方程}$$

K —— **过滤常数** 由物料特性及过滤压强差所决定， m^2/s

θ_e 和 q_e —— **介质常数** 反映过滤介质阻力大小， s 及 m^3/m^2

当介质阻力可以忽略时， $q^2 = K \theta$

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 $1.3 \times 10^{10} \text{ m}^{-2}$,水的粘度为 $1.0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。在压强差恒为 $9.8 \times 10^3 \text{ Pa}$ 的条件下过滤，假设滤布阻力可以忽略，试求：

- 1) 每 m^2 过滤面积上获得 1.5 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： 1) 过滤时间

$$v = \frac{1 \times 0.1 / 0.5}{1 - 1 \times 0.1 / 0.5} = 0.25 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

$$K = \frac{2\Delta P^{1-s}}{\mu r_0 v} = \frac{2 \times 9.81 \times 10^3}{1.0 \times 10^3 \times 1.3 \times 10^{10} \times 0.25} = 6 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$$

∵ 滤布阻力可忽略 ∴ $q^2 = K\theta$

$$\theta = \frac{q^2}{K} = \frac{1.5^2}{6 \times 10^{-3}} \text{ s} = 375 \text{ s}$$

2) 求过滤时间加倍时的滤液量

$$\theta' = 2\theta = 2 \times 375 = 750 \text{ s}$$

$$q' = \sqrt{K\theta'} = \sqrt{6 \times 10^{-3} \times 750} = 2.12 \text{ m}^3$$

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

3.4.4 先恒速后恒压过滤

恒速过滤特点: $\frac{dV}{Ad\theta} = \frac{V}{A\theta} = \frac{q}{\theta} = u_R = C$

所以, $q = \theta u_R$ 或 $V = A \theta u_R$

对不可压缩性滤饼:

$$\frac{dq}{d\theta} = \frac{\Delta P}{\mu r v (q + q_e)} = u_R$$

$\Delta P = u_R \mu r v (q + q_e)$ 将 $q = \theta u_R$ 代入

$\Delta P = u_R^2 \mu r v \theta + u_R^2 \mu r v q_e$ 令 $a = u_R^2 \mu r v$, $b = u_R^2 \mu r v q_e$

$$\Delta P = a \theta + b$$

当 ΔP 达到设定值, 进入恒压过滤. 对恒压过滤方程积分, 以

$V_R \rightarrow V, \theta_R \rightarrow \theta$ 可建立滤液量与过滤时间的关系

$$\frac{dV}{d\theta} = \frac{kA^2 \Delta P^{1-s}}{V + V_e}$$

若令 V_R 和 θ_R 分别代表升压终了瞬间的滤液体积及过滤时间，
则上式的积分形式为：

$$\int_{V_R}^V (V + V_e) dV = kA^2 \Delta P^{1-s} \int_{\theta_R}^{\theta} d\theta$$

$$\underline{(V^2 - V_R^2) + 2V_e(V - V_R)} = kA^2 \underline{(\theta - \theta_R)}$$

此式为恒压阶段的过滤方程

转入恒压操作后所获得的滤液体积

转入恒压操作后所经历的过滤时间

3.4.5 过滤常数的测定

1、恒压下 K 、 q_e 、 θ_e 的测定

实验原理：由恒压过滤方程 $(q + q_e)^2 = K(\theta + \theta_e)$ 微分

$$2(q + q_e)dq = Kd\theta$$

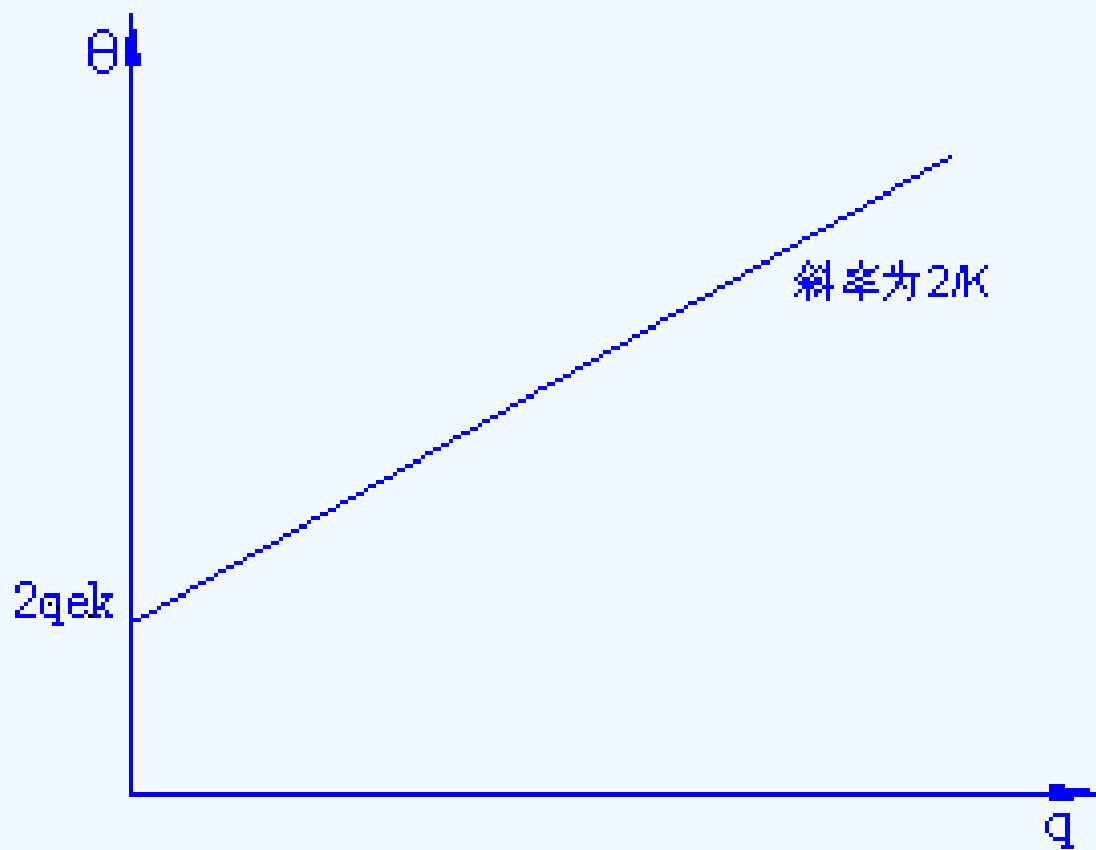
$$\frac{d\theta}{dq} = \frac{2}{K}q + \frac{2}{K}q_e \quad \frac{\Delta\theta}{\Delta q} = \frac{2}{K}q + \frac{2}{K}q_e$$

对于一定恒压下过滤的悬浮液，测出延续的时间及滤液的累计量 q （按单位面积计）的数据，然后算出一系列的 $\Delta\theta$ 与 Δq 的对应值

θ	q	$\Delta\theta$	Δq	$\Delta\theta/\Delta q$
0	0	0	0	
θ_1	q_1	θ_1	q_1	θ_1/q_1
θ_2	q_2	$\theta_2 - \theta_1$	$q_2 - q_1$	$\theta_2 - \theta_1/q_2 - q_1$

然后在直角坐标纸上从 $\Delta\theta/\Delta q$ 为纵坐标，以 q 为横坐标进行标绘，可得到一斜率为 $2/K$ ，截距为 $2q_e/K$ 的直线。

$$q_e^2 = K\theta_e \text{ 求得 } \theta_e$$



2、压缩性指数s的测定

由 $K = 2k\Delta p^{1-s}$ 两端取对数, 得

$$\lg K = (1 - s) \lg(\Delta p) + \lg(2k)$$

$$k = \frac{1}{\mu r' v} = \text{常数}$$

$\therefore \lg K$ 与 $\lg(\Delta p)$ 的关系在对数坐标纸上标绘时应是直线,直线的斜率为 $1-s$, 截距为 $\lg(2k)$ 。由此可得到滤饼的压缩性指数 s 及物料特性常数 k 。

3.4.6 过滤设备

1、板框压滤机

1) 板框压滤机的构造

由许多块带凹凸纹路的滤板与滤框交替排列组装于机架而构成。

滤板和滤框多做成正方形，角上均开有小孔，组合后即构成供滤浆和洗涤水流通的孔道。

滤框的两侧覆以滤布，围成容纳滤浆及滤饼的空间。

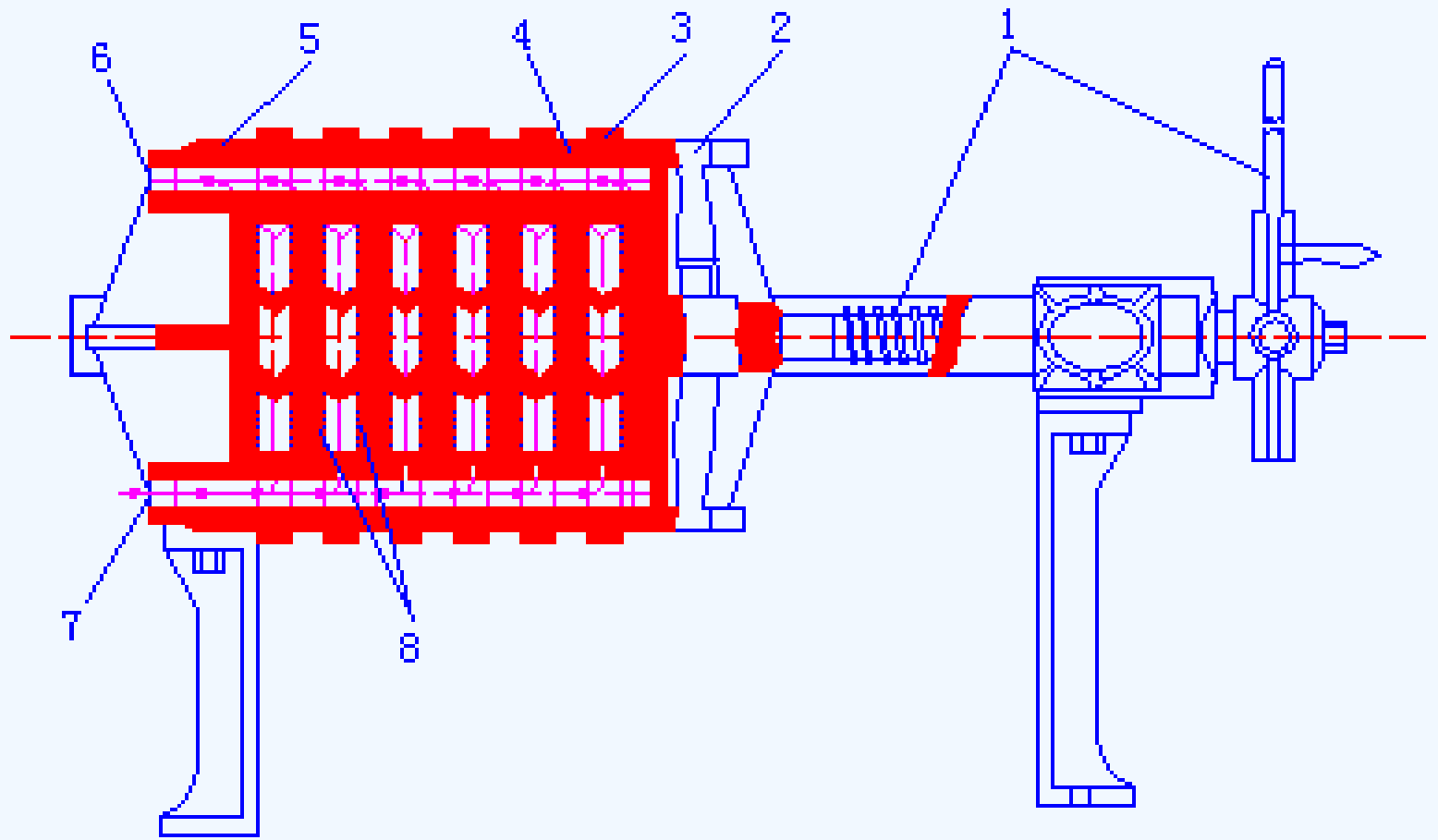
滤板的作用：支持滤布和提供滤液流出的通道。

滤板 { 洗涤板：三钮板
非洗板：一钮板

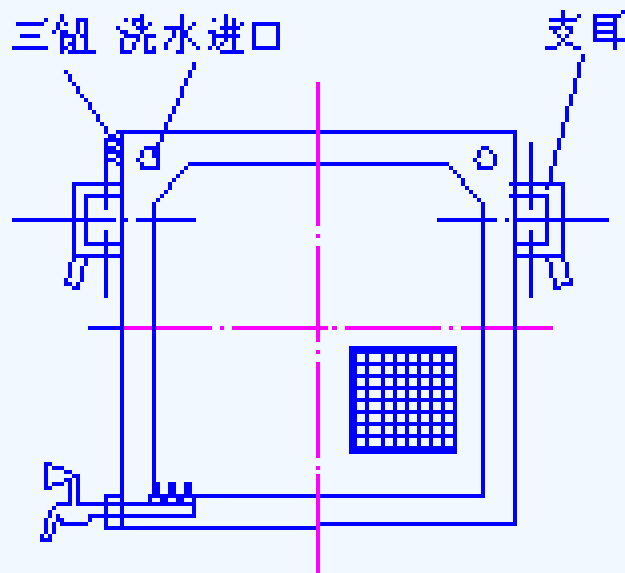
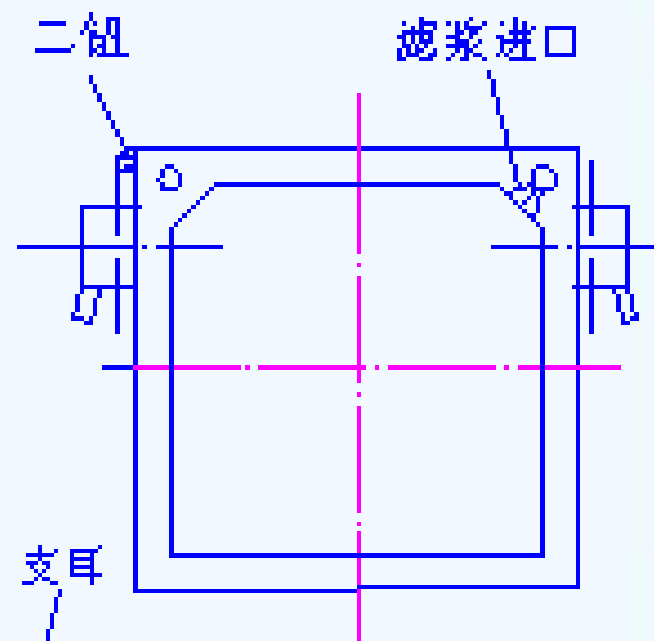
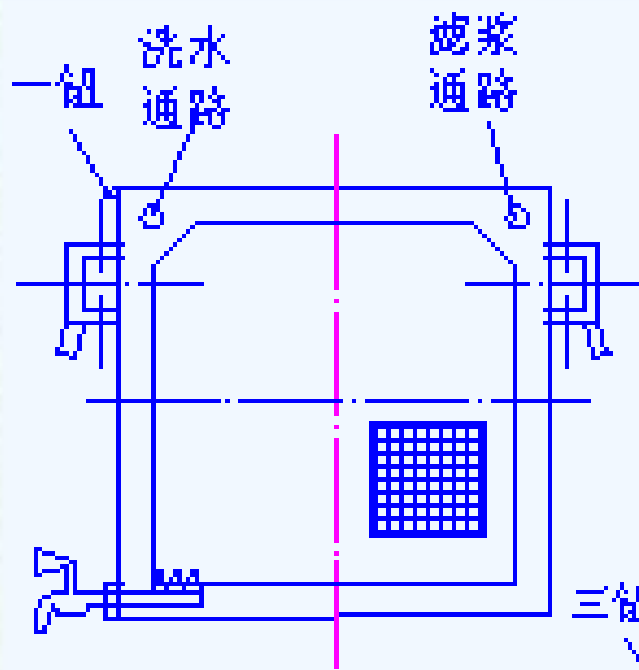
滤框：二钮

滤板与滤框装合时，按钮数以1-2-3-2-1-2的顺序排列。





- | | | | |
|----------|----------|----------|--------|
| 1---压紧装置 | 2---可动头 | 3---滤框 | 4---滤板 |
| 5---固定头 | 6---滤液出口 | 7---滤浆进口 | 8---滤布 |



2) 板框压滤机的操作

板框压滤机为**间歇操作**，每个操作循环由装合、过滤、洗涤、卸饼、清理5个阶段组成。

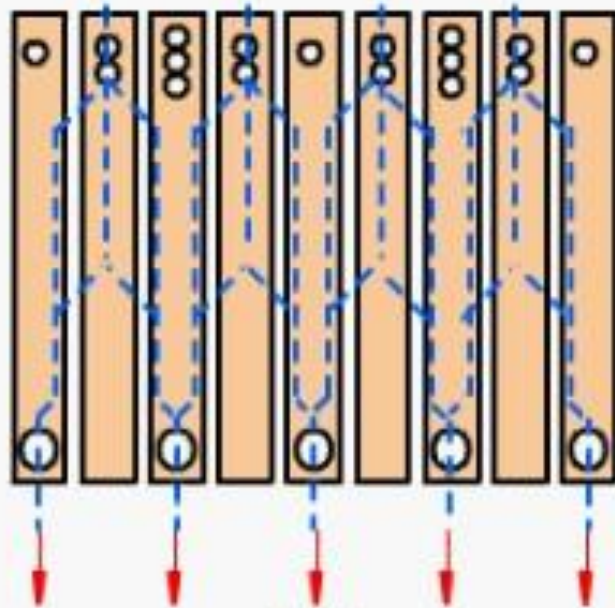
悬浮液在指定压强下经滤浆通路由滤框角上的孔道并行进入各个滤框，

滤液分别穿过滤框两侧的滤布，沿滤板板面的沟道至滤液出口排出。**过滤面积=2滤框侧面积×滤框个数**

颗粒被滤布截留而沉积在滤布上，待滤饼充满全框后，停止过滤。**滤饼体积=滤框侧面积×滤框厚度×滤框个数**

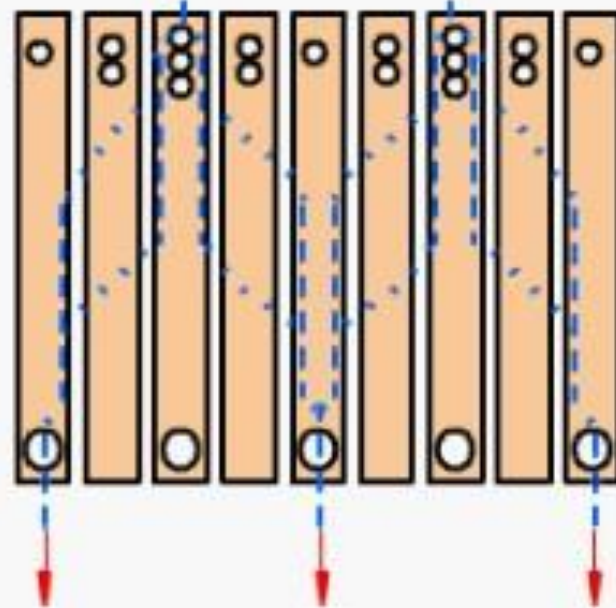
滤浆

清水



滤液

(a) 过滤



洗水

(b) 洗涤

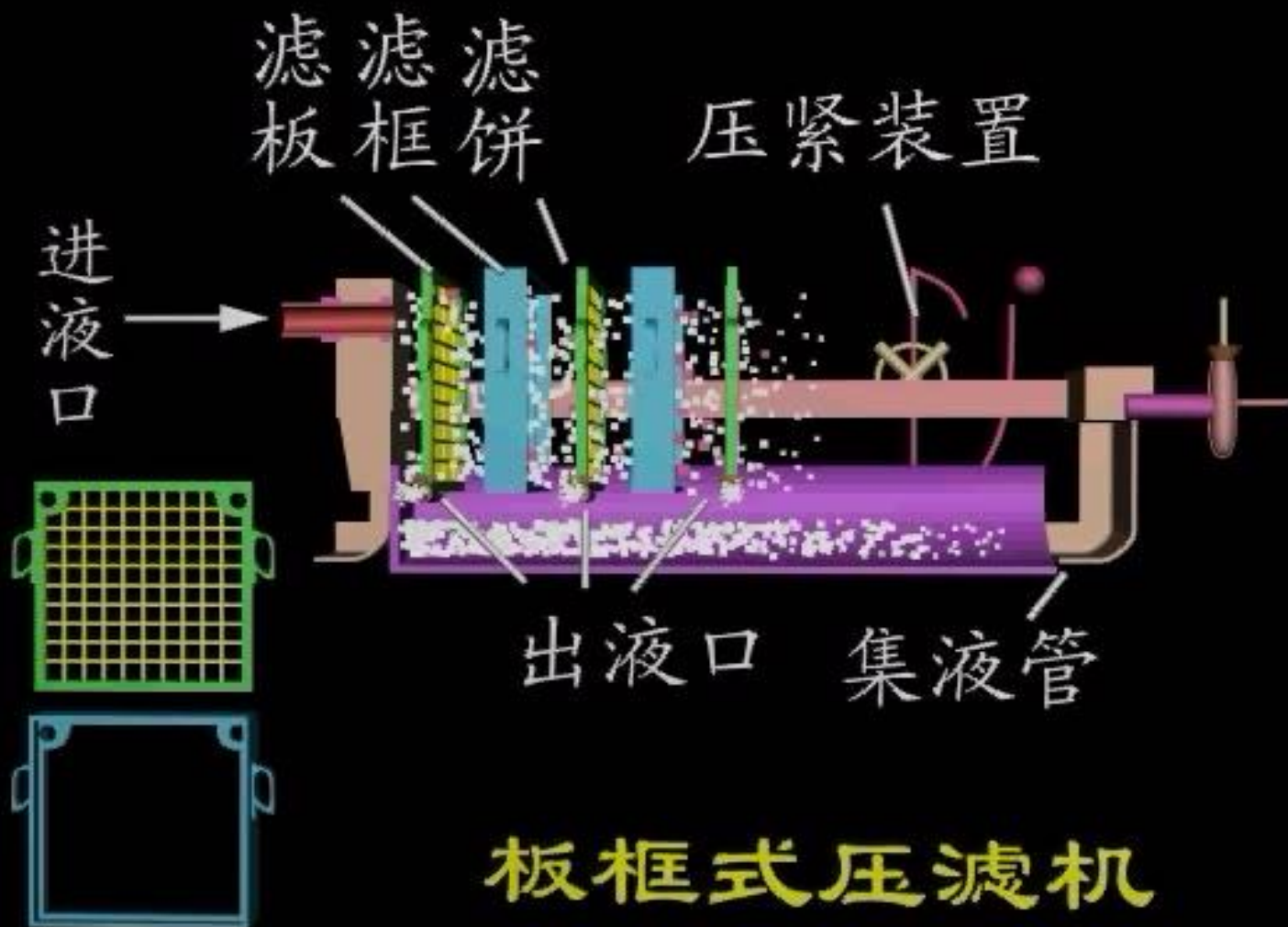
板框式压滤机的过滤和洗涤

东方仿真COPYRIGHT

洗涤时 洗涤水在压差的推动力下先穿过一层滤布及整个框厚的滤饼，然后再穿过一层滤布，最后沿滤板（一钮板）板面沟道至滤液出口排出，称为**横穿洗涤法**。

它的特点是**洗涤水穿过的途径正好是过滤终了时滤液穿过途径的二倍**。**洗涤面积=滤框侧面积×滤框个数**
板框压滤机的**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。

缺点是间歇手工操作，劳动强度大，生产效率低。



2、加压叶滤机

叶滤机是由许多不同宽度的长方形滤叶装合而成。滤叶由金属丝网制造，内部具有空间，外罩滤布。

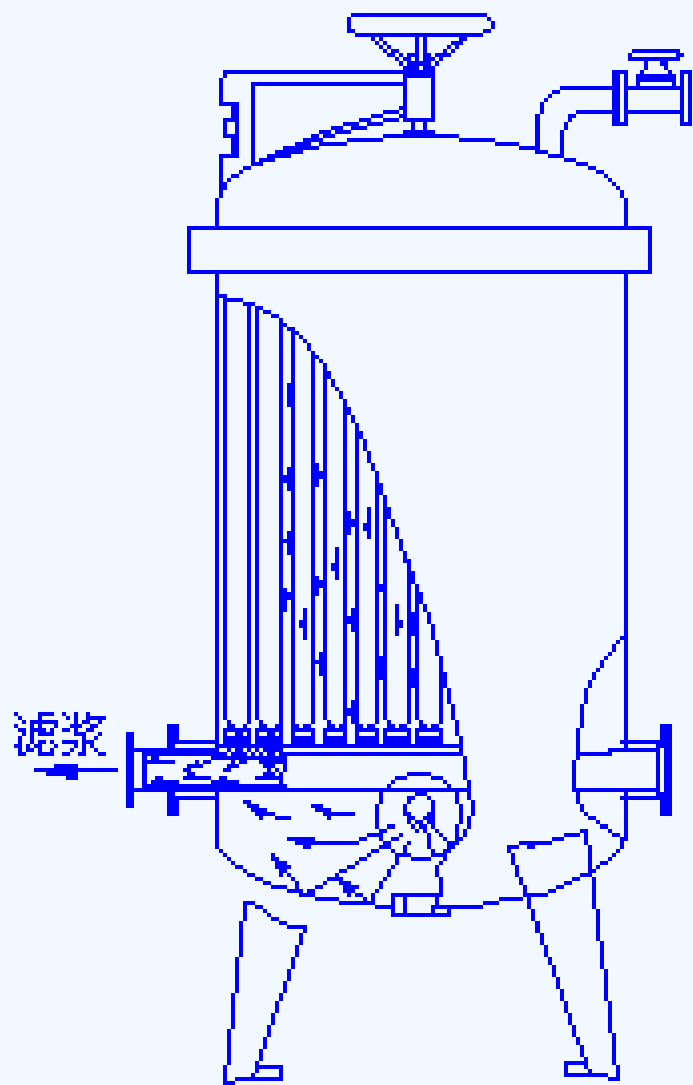
叶滤机也为**间歇操作**，过滤时滤叶安装在能承受内压的密闭机壳内。滤浆用泵送到机壳内，穿过滤布进入丝网构成的中空部分，然后汇集到下部总管而后流出。颗粒沉积在滤布上，形成滤饼，当滤饼积到一定厚度，停止过滤。

，洗水的路径与滤液相同，洗涤面积=过滤面积

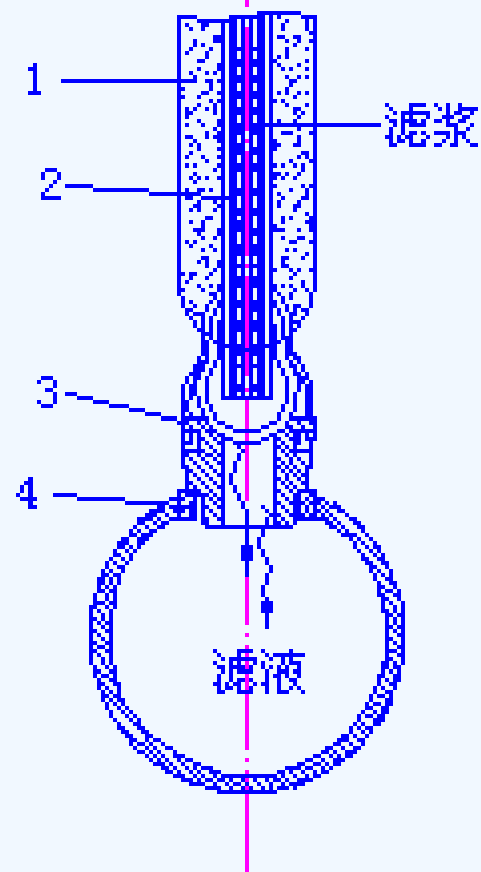
这种洗涤方法称为**置换洗涤法**。

叶滤机的**优点**：设备紧凑，密闭操作，劳动条件较好。

缺点：造价高，更换滤布（尤其对于圆形滤叶）比较麻烦



滤液剖面图



1---滤饼

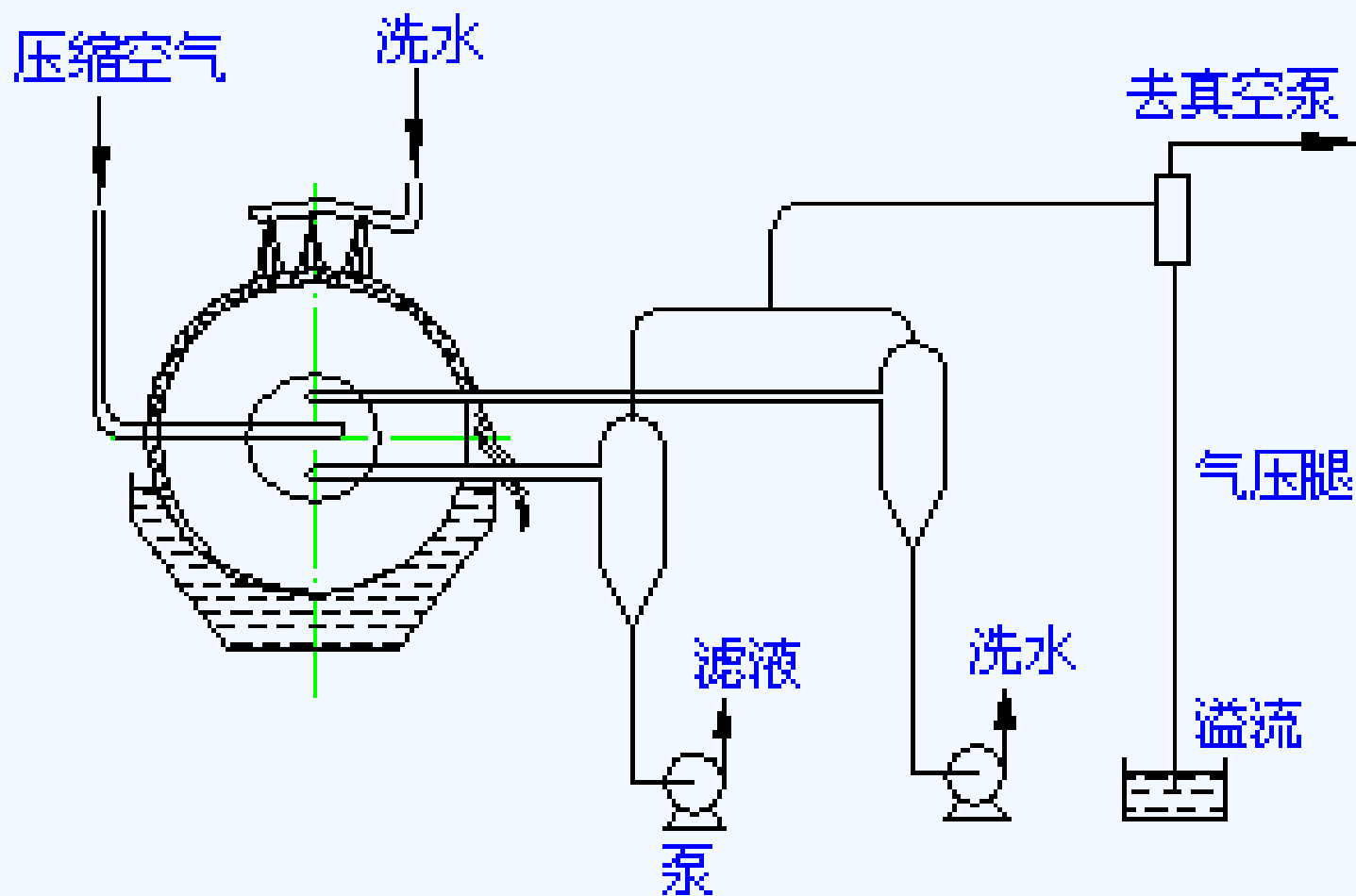
2---滤布

3---拔出装置

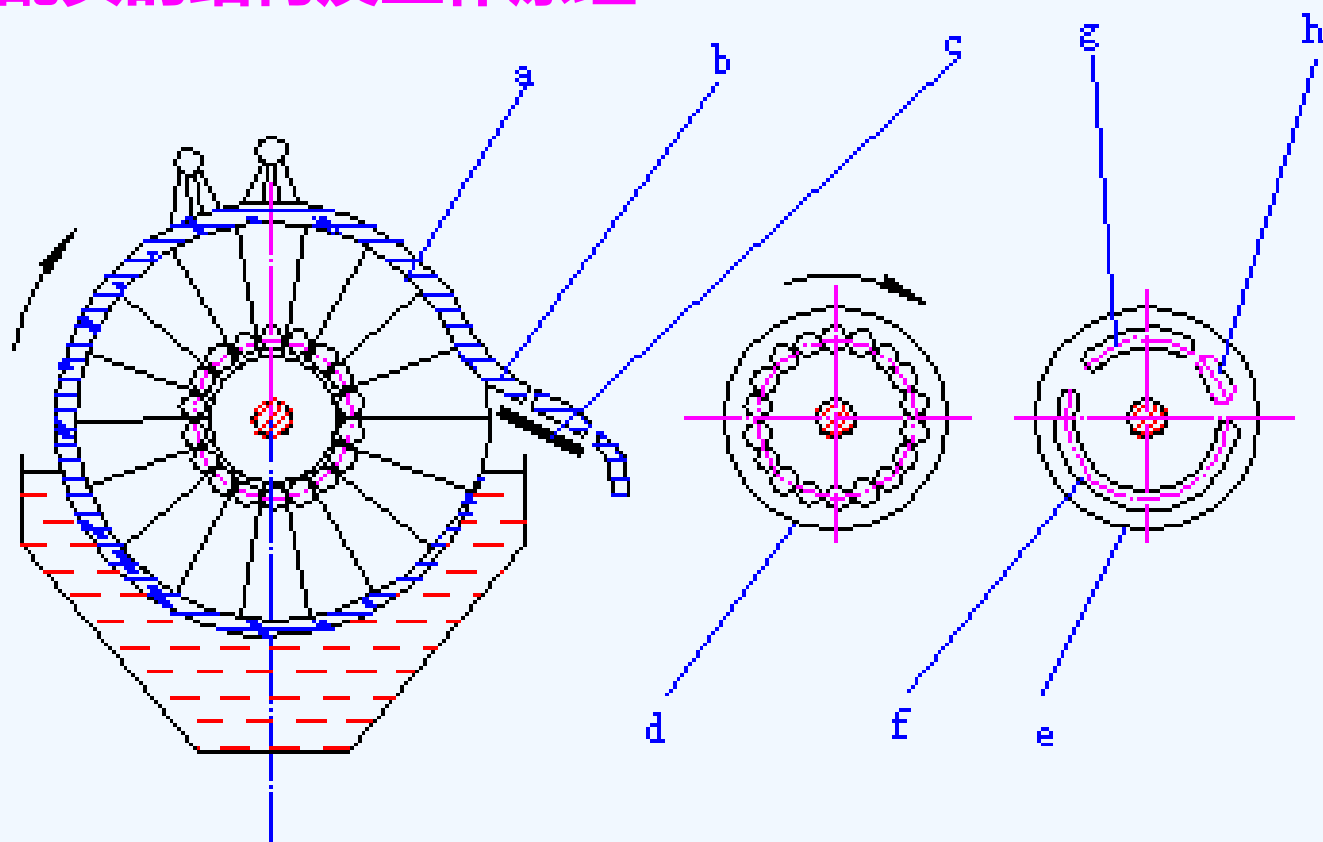
4---橡胶圈

3、转筒真空过滤机

1) 转筒真空过滤机的结构----连续操作的过滤设备



2) 分配头的结构及工作原理



a---转筒

b---滤饼

c---割刀

d---转动盘

e---固定盘

f---吸走滤液的真空凹槽

g---吸走洗水的真空凹槽

h---通入压缩空气的凹槽

转筒的过滤面积一般为 $5 \sim 40\text{m}^2$ ，浸没部分占总面积的30% ~ 40%。转速可在一定范围内调整，通常为 $0.1 \sim 3\text{r/min}$ 。滤饼厚度一般保持在40mm以内，转筒过滤机所得滤饼中的液体含量很少低于10%，常可达30%左右。

转筒真空过滤机的**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（**由于它是真空操作**）。

压缩空气

洗水



去真空泵

气压阀

洗水

滤液

溢流

连续转鼓真空过滤器

东方仿真 Copyright.



3.4.7 滤饼的洗涤

滤饼洗涤的目的：为了回收滤饼里存留的滤液，或者净化构成滤饼颗粒。

1、洗涤速率

洗涤速率：单位时间内消耗的洗水容积，以 $(dV/d\theta)_w$ 表示。

可视为常数

洗涤时间：
$$\theta_w = \frac{V_w}{\left(\frac{dV}{d\theta}\right)_w}$$

洗涤速率与过滤終了时的过滤速率有关，两者的 r' ，若两者的 μ 也相同，在相同的 ΔP 下操作：洗涤速度取决与过程的路程和洗涤面积。

叶滤机采用的置换洗涤法，过滤面积与洗涤面积相等

$$A_w = A \quad (L + L_e)_w = (L + L_e)_E$$

当操作压强差和洗水与滤液粘度相同时

$$\left(\frac{dV}{d\theta}\right)_w = \left(\frac{dV}{d\theta}\right)_{E,终} = \frac{KA^2}{2(V + V_e)} \quad \text{或} \quad \left(\frac{dq}{d\theta}\right)_w = \left(\frac{dq}{d\theta}\right)_{E,终} = \frac{K}{2(q + q_e)}$$

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，流经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

$$(L + L_e)_w = 2(L + L_e)_E \quad A_w = \frac{1}{2} A$$

当操作压强差和洗水与滤液粘度相同时

$$\left(\frac{dV}{d\theta}\right)_w = \frac{\frac{1}{2}A\Delta P^{1-s}}{2\mu r'(L+L_e)} = \frac{1}{4}\left(\frac{dV}{d\theta}\right)_E = \frac{KA^2}{8(V+V_e)}$$

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。

$$\theta'_w = \theta_w \left(\frac{\mu_w}{\mu}\right) \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_w}\right)$$

3.4.8 过滤机生产能力的计算

过滤机的生产能力：单位时间的滤液体积或滤渣体积， m^3/s

1、间歇过滤机的计算

一个操作周期时间为 $T = \theta + \theta_W + \theta_D$

生产能力为
$$Q = \frac{V}{\theta + \theta_W + \theta_D}$$

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。

$$\text{由 } V^2 + 2VV_e = KA^2\theta$$

$$\text{恒压过滤时, 每次过滤所需时间 } \theta = \frac{1}{KA^2}V^2 + \frac{2V_e}{KA^2}V$$

对于叶滤机, 令 a 为洗涤液量与滤液量的比值, 那么洗涤液量为 aV , 洗涤时间为:

$$\theta_w = \frac{\frac{aV}{KA^2}}{2(V + V_e)} = \frac{2a}{KA^2}V^2 + \frac{2aV_e}{KA^2}V$$

$$\therefore \theta = \frac{V}{\frac{1}{KA^2}V^2 + \frac{2V_e}{KA^2}V + \frac{2a^2}{KA^2}V^2 + \frac{2aV_e}{KA^2}V + \theta_D}$$

以 θ 对 V 求导，令 $\frac{d\theta}{dV} = 0$ ， 得

$$V = \sqrt{\frac{\theta_D}{\frac{1}{KA^2} + \frac{2a^2}{KA^2}}}$$

$$\theta_D = \frac{1}{KA^2} V^2 + \frac{2a^2}{KA^2} V^2 \quad \text{——生产能力最大的条件}$$

如果过滤介质阻力可以忽略不计，可得 $\theta_D = (1 + 2a)\theta$

时，生产能力最大。即 $\theta_D = \theta + \theta_w$ 。如不进行洗涤，则

$\theta_D = \theta$ 时，生产能力最大。

对于板框压滤机，也可用此法求最大生产能力，但是，由于洗涤速率与最终过滤速率不同， $\theta_D = \frac{1}{KA^2}V^2 + \frac{2a^2}{KA_2}V^2$

2a应改为8a。

例：用一台BMS/635-25板框压滤机过滤一种含固体颗粒为25 kg/m³的悬浮液，在过滤机入口处滤浆的表压为3.39 × 10⁵Pa,已测得在此压力下K=1.86 × 10⁻⁴，q_e=0.0282，所用滤布与实验时的相同，料浆温度为25℃，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15 min。已知固相颗粒密度为2930kg/m³，又测得湿滤饼的密度为1930kg/m³。求此板框压滤机的生产能力，并讨论此板框压滤机是否在最佳操作状态下操作。

解：总过滤面积 $A = 0.625^2 \times 2 \times 26 = 20.8m^2$

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

已知1m³滤饼的质量为1930kg，其中含水x kg,水的密度按1000kg/m³考虑。

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

1m³滤饼中固相颗粒质量为1930-518=1412 kg

设每1m³滤液中含水ykg

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

生成1m³滤饼所需的滤浆质量为

$$1412 \times \frac{991.5 + 25}{25} = 57412 \text{ kg}$$

生成1m³滤饼的滤液的质量为：（57412-1930）=55482kg

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 $V = 55.48 \times 0.262 = 14.54 m^3$

过滤终了时单位面积滤量为 $q = \frac{V}{A} = \frac{14.54}{20.8} = 0.699 m^3 / m^2$

代入 $q^2 + 2q_e q = K\theta$

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

$$\theta = 2835 s$$

过滤终了时滤液的速率 $\left. \frac{dq}{d\theta} \right|_{q=0.669} = \left. \frac{K}{2(q + q_e)} \right|_{q=0.669}$

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

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

$$\theta_W = \frac{V_W}{\frac{1}{4} \left(\frac{dV}{d\theta} \right)} = \frac{1.163}{\frac{1}{4} \times 20.8 \times (dq/d\theta)_E} = \frac{1.163}{6.6 \times 10^{-4}}$$
$$= 1746s$$

生产能力

$$Q = \frac{14.54 \times 3600}{2836 + 1746 + 900}$$
$$= 10.1m^3 / h$$

根据获得最大生产能力的要求，辅助操作时间应为

$$\theta_D = \frac{1}{KA^2}V^2 + \frac{8a^2}{KA^2}V^2 = \frac{14.52^2}{1.86 \times 10^4 \times 20.82} \times (1 + 8 \times 0.08)$$
$$= 4308s$$

这就是说实际所用过滤时间太长，对这种悬浮液，为提高生产能力。过滤时间应短些。

2、连续过滤机的生产能力

浸没度:转筒表面浸入滤浆中的分数，以 φ 表示。

$$\varphi = \text{浸没角度} / 360^\circ$$

若转筒转速为 n r/min,转筒回转一周所用时间: $T = \frac{60}{n}$

整个转筒表面上任何一小块过滤面积所经历的过滤时间为:

$$\theta = \varphi T = 60\varphi / n$$

从生产能力的角度来看,一台总过滤面积为 A , 浸没角度为 φ , 转速为 n r/min的连续式转筒真空过滤机, 与一台同样条件下操作的过滤面积为 A , 操作周期为 $T=60/n$, 每次过滤时间 $\theta = 60\varphi / n$ 的间歇式板框压滤机是等效的。

转筒每转一周所得滤液的体积为:

$$V = \sqrt{KA^2(\theta + \theta e)} - V_e = \sqrt{KA^2\left(\frac{60\varphi}{n} + \theta e_e\right) - V_e}$$

生产能力:

$$Q = 60nV = 60 \left[\sqrt{KA^2(60\varphi n + \theta_e n^2)} - V_e n \right]$$

当滤布阻力可以忽略不计时

$$Q = 60n \sqrt{KA^2 \frac{60\varphi}{n}} = 465A \sqrt{Kn\varphi} \text{ m}^3 / \text{h}$$

其中: $A = \pi DL$ D-转筒直径 L-转筒的长度

转速n愈高, 浸没度愈大, 生产能力愈大。

例：用转筒真空过滤机于50kPa真空度下过滤密度为 1220kg/m^3 的某种水悬浮液，操作条件下的过滤常数 $K=5.2\times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ，过滤介质的阻力可忽略不计。已知，每次获得 1m^3 滤液生成的滤渣中含有固相590kg，固相密度为 2200kg/m^3 ，转筒直径为1.75m，宽度为0.92m，转筒浸没度 $1/3$ ，其转速为0.5r/min，试求：

- 1) 过滤机的生产能力。
- 2) 转筒表面最终滤饼厚度 δ 。

解： 1) $Q = 465 A \sqrt{Kn\phi}$

$$A = \pi D^2 L = 1.75 \times 0.92 \times \pi = 5.06 m^2$$

$$Q = 465 \times 5.06 \times \sqrt{5.2 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3} \times 0.5} = 2.19 m^3 / h$$

2) 要求滤饼厚度，应先通过物量衡算求得滤饼体积与滤液体积之比 v

以 $1m^3$ 悬浮液为准，设其中固相质量分数为 x_w

$$1 = \frac{x_w \times 1220}{2200} + \frac{(1 - x_w) \times 1220}{1000} \quad x_w = 0.33$$

所以过滤 1m^3 悬浮液所得滤饼的固相质量:

$$G = 1120 \times 0.33 = 402.6 \text{ kg}$$

$$\therefore \text{可得滤液体积为 } \frac{402.6}{590} \times 1 = 0.6823 \text{ m}^3$$

$$\text{滤饼体积为 } 1 - 0.6823 = 0.3177 \text{ m}^3$$

$$\therefore v = 0.3177 / 0.6823 = 0.4656 \text{ m}^3 / \text{m}^3$$

$$\text{转筒每转一周得滤饼体积 } V_c = \frac{\varphi}{60n} \times v = \frac{2.19 \times 0.465}{60 \times 0.5}$$

$$\text{滤饼厚度 } \delta = \frac{V_c}{A} = \frac{2.19 \times 0.4656}{60 \times 0.5 \times 5.06} = 6.72 \times 10^{-3} \text{ m}$$