

习题：3，5，7~13

4.4 过滤

4.4.1 过滤操作与特点

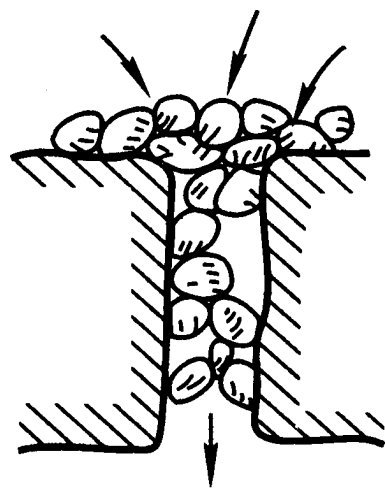
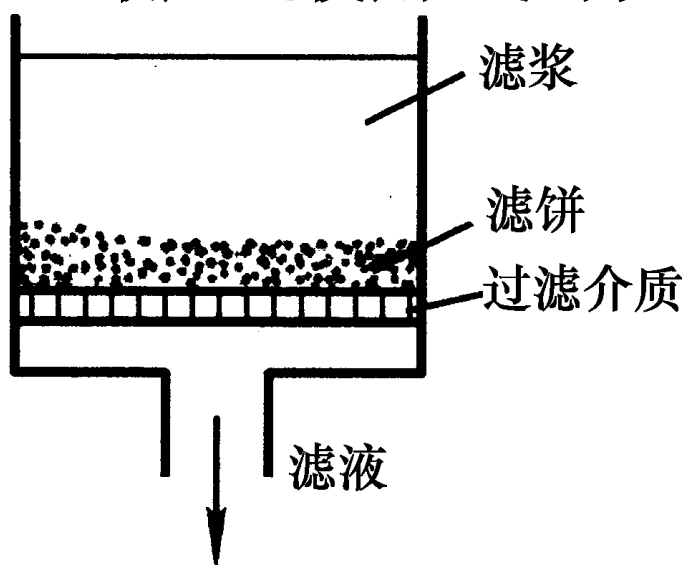
1. 操作

利用重力或压差使悬浮液通过某种多孔过滤介质，实现液固分离。

2. 过滤方式

(1) 滤饼过滤

最广泛使用过滤方式



“架桥现象” “穿滤现象”

(2) 动态过滤

(3) 深层过滤

常用于净化含固量很少($<0.1\% \text{vt}$)悬浮体。

(4) 滤膜过滤

3. 特点

a.爬流—极慢流动,适用康采尼方程。 $(u \propto \Delta \mathcal{P})$

b.非定态—拟定态处理

4. 过滤速率

过滤计算目的: 为获得一定量的滤液所需的过滤时间, 或所需的过滤面积。

过滤速率 u :

$$u = \frac{dV}{Ad\tau} = \frac{dq}{d\tau}$$

q —(m³ 滤液)/(m² 过滤面积)

5. 对过滤设备的要求

(1)平均过滤时间

(2)滤饼的含液量

4.4.2 过滤过程的数学描述

1. 物料衡算

定义: ϕ : m³ 固体/m³ 悬浮液

w : (质量分率) kg 固体/kg 悬浮液

悬浮液体积=滤液+滤饼

$$V_{\text{悬}} = V + LA$$

对固体衡算: $V_{\text{悬}}\phi = LA(1-\varepsilon)$

$$\therefore L = \frac{\phi}{1-\varepsilon-\phi} q \approx \frac{\phi}{1-\varepsilon} q$$

结论: $L \propto q$

即滤饼厚度大体与单位过滤面积的累计滤液量 q 成正比。

1、过滤速率

思路：

$$\begin{cases} u = \frac{dq}{d\tau} \\ \frac{\Delta \mathcal{P}}{L} = K' \frac{a^2 (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \mu u \\ L = \frac{\phi}{1-\varepsilon} q \end{cases}$$

$$\therefore \frac{dq}{d\tau} = u = \frac{\Delta \mathcal{P}}{r \mu \phi q}$$

其中： $r = \frac{K' a^2 (1-\varepsilon)}{\varepsilon^3}$

r ：称为比阻，反映滤饼特性， $r \uparrow u \downarrow$

$$r = r_0 \Delta \mathcal{P}^s$$

s ：称为压缩指数

$s=0$ ，称为不可压缩滤饼， r 只与悬浮体性质有关。

$s=0.2\sim 0.8$ ，称为可压缩滤饼， r 的大小与操作压强有关。（表 4-2）

$$\text{过滤速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}} = \frac{\Delta \mathcal{P}}{r \mu \phi q}$$

$$\underline{\Delta \mathcal{P}} = \underline{\Delta \mathcal{P}_1} + \underline{\Delta \mathcal{P}_2}$$

过滤操作总压差 滤饼压差 过滤介质压差
 过滤介质阻力 **类似** 形成 L_e 厚获 q_e 量

速率:
$$\frac{dq}{d\tau} = \frac{\Delta \mathcal{P}_1}{r\mu\phi q} = \frac{\Delta \mathcal{P}_2}{r\mu\phi q_e}$$

$$= \frac{\Delta \mathcal{P}}{r\mu\phi(q + q_e)} = \frac{\text{总推动力}}{\text{总阻力}}$$

令 $K = \frac{2\Delta \mathcal{P}}{r\mu\phi} = \frac{2\Delta \mathcal{P}^{1-s}}{r_0\mu\phi}$

乘 2 仅是一种习惯

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

或
$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{KA^2}{2(V + V_e)}$$

过滤速率方程

4.4.3 过滤时间与滤液量关系

1、恒速过滤方程

$$\frac{dq}{d\tau} = u = \text{常数}$$

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

$$\therefore q^2 + qq_e = \frac{1}{2} K \tau$$

$$\text{或 } V^2 + VV_e = \frac{1}{2} KA^2 \tau$$

恒速过滤方程

2、恒压过滤方程

恒压 $\Delta \mathcal{P} = \text{常数}$ 即 $K = \frac{2\Delta \mathcal{P}^{1-s}}{r_0 \mu \phi} = \text{常数}$

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

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

或 $V^2 + 2VV_e = KA^2\tau$ 恒压过滤方程

3、先恒速，后恒压

从 $0 \rightarrow \tau_1$ 恒速，得滤液 q_1

从 $\tau_1 \rightarrow \tau$ 恒压，累计得滤液 q

$$\int_{q_1}^q (q + q_e) dq = \frac{K}{2} \int_{\tau_1}^\tau d\tau$$

$$(q^2 - q_1^2) + 2q_e(q - q_1) = K(\tau - \tau_1)$$

$$\text{或 } (V^2 - V_1^2) + 2V_e(V - V_1) = KA^2(\tau - \tau_1)$$

注意：

(1) q 是累计量， τ 是累计时间，都是从 0 开始的。对先恒速后恒压操作中，恒压时间 $\Delta \tau = \tau - \tau_1$ ，得滤液量 $\Delta q = q - q_1$ 。

(2) K 值： $K = \frac{2\Delta \mathcal{P}^{1-s}}{r_0 \mu \phi}$

“恒压”时 K 为定值

“恒速”时 K 指恒速终了时 $\Delta \mathcal{P}$ 所对应的 K 值。

4、过滤常数 K 测定

在恒压下做实验

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



整理成
$$\frac{\tau}{q} = \frac{q}{K} + \frac{2q_e}{K}$$

即
$$y = ax + b$$

在恒压下可测得一系列 (τ, q) 的数据，换算成 $(q, \tau/q)$ 作如左图。

直线斜率 $1/K$ 截距 $2q_e/K$

由此可求得 K, q_e 值

4.4.4 洗涤速率与洗涤时间

1、洗涤的目的、特点、方法

目的：回收滤液，纯净滤饼

特点：洗涤速率基本上为一常数

2、洗涤时间 τ_w 计算（洗涤通道与过滤一致）

$$\left(\frac{dq}{d\tau}\right)_w = \frac{\Delta \mathcal{P}_w}{r\mu_w \phi(q + q_e)} = \frac{\Delta \mathcal{P}_w}{\Delta \mathcal{P}} \times \frac{\mu}{\mu_w} \times \frac{K}{2(q + q_e)}$$

$$\tau_w = \frac{q_w}{(dq/d\tau)_w}$$

当洗涤与过滤终了时的操作压强相同，洗涤液与滤液的黏度相等，则洗涤速率与最终过滤速

率相等

$$\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w = \frac{KA^2}{2(V + V_e)}$$
$$\tau_w = \frac{V_w}{\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w} = \frac{2(V + V_e)V_w}{KA_{\text{过}}^2}$$

例：某叶滤机恒压操作，过滤终了时， $V=0.5\text{m}^3$ ， $\tau=1\text{hr}$ ， $V_e=0$ ，滤液黏度是水的4倍，现在同一压强下再用清水洗涤 $V_w=0.1\text{m}^3$ ，求 τ_w 洗涤时间。

解： $K_w = \frac{2\Delta\mathcal{P}_w}{r\mu_w\phi}$ 即 $K_w \propto \frac{1}{\mu_w}$

$$\therefore \frac{K_w}{K} = \frac{\mu}{\mu_w} = 4$$

由已知恒压过滤

$$V^2 = KA^2\tau$$

$$\therefore KA^2 = 0.5^2/1 = 0.25$$

$$\therefore \frac{V_w}{\tau_w} = \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w = \frac{K_w A^2}{2(V + V_e)}$$

$$\therefore \tau_w = \frac{2V_w V}{K_w A^2} = \frac{2 \times 0.1 \times 0.5}{4 \times 0.25} = 0.1(\text{hr})$$

4.5 过滤设备和操作强化

4.5.1 过滤设备

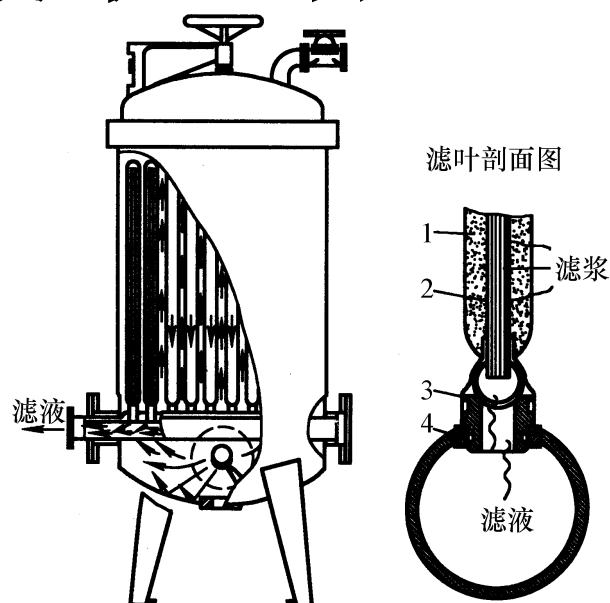
可按生产压差方式不同分类：

(1) 压滤和吸滤

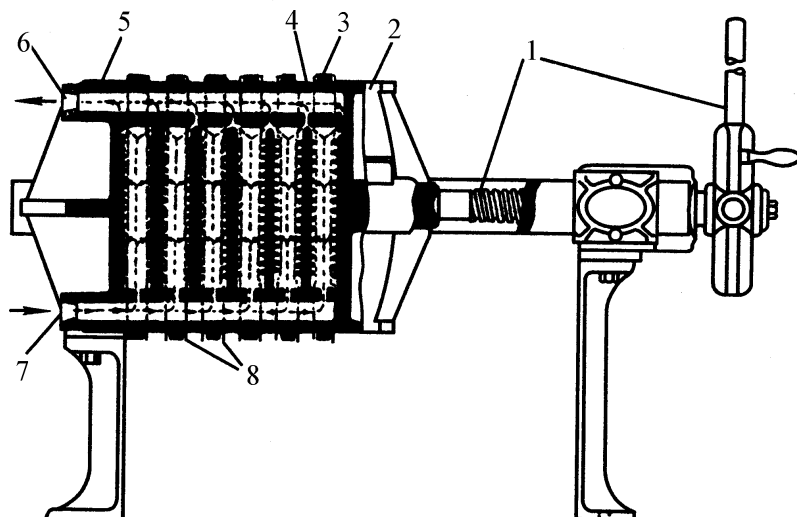
如：叶滤机板框压滤机，回转真空过滤机等

(2) 离心过滤

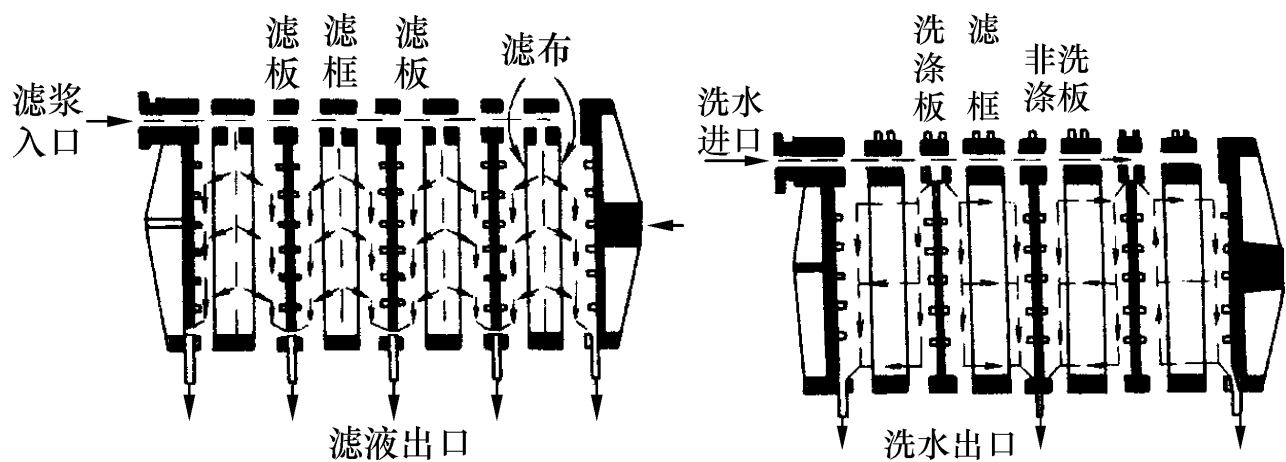
一、叶滤机 图 4-15



二、板框压滤机 图 4-16



* 过滤通道与洗涤通道不同



$$A_w \neq A_{\text{过}}$$

其中 $A_w = \frac{1}{2} A_{\text{过}}$ **板框压滤机**

$$\left(\frac{dq}{d\tau}\right)_w = \frac{\Delta \mathcal{P}_w}{2r\mu_w \phi(q + q_e)} \quad \text{路径增加一倍, 速率是原来的 } 1/2$$

$$\tau_w = \frac{q_w}{\left(\frac{dq}{d\tau}\right)_w} = \frac{8(V + V_e)V_w}{KA_{\text{过}}^2} \quad \text{洗涤面积是过滤面积的 } 1/2$$

三、离心过滤

—利用离心力作为过滤推动力

转鼓壁开孔，复上金属网，网上复滤布。

离心过滤过程一般为三个阶段：

- (1) 滤饼形成
- (2) 滤饼压紧
- (3) 滤饼沥干

——滤饼空隙中液体在离心力作用下,继续被甩出,滤饼干燥。

4.4.5 过滤过程的计算

例:拟用板框压滤机恒压过滤含 CaCO_3 8%(质量百分率)的水悬浮液 2m^3 。每 m^3 滤饼中含固体 1000kg , 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 30 分钟。试求:

(1) 滤液体积, 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? (过滤介质忽略)

(设计型计算)

解: (1) $V_{\text{悬}} = V_{\text{滤}} + V_{\text{滤饼}}$

$$V_{\text{滤}} = V_{\text{悬}} - V_{\text{滤饼}}$$

悬浮液平均密度:

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{x_{\text{固}}}{\rho_p} + \frac{x_{\text{液}}}{\rho_{\text{液}}}$$

$$\therefore \frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{0.08}{2800} + \frac{0.92}{1000}$$

$$\bar{\rho} = 1054\text{kg}/\text{m}^3$$

$$m_{\text{悬}} = 2 \times 1054 = 2108\text{kg}$$

$$m_{\text{固}} = 2108 \times 0.08 = 168.64\text{kg}$$

$$\frac{1}{1000} = \frac{V_{\text{饼}}}{168.64} \quad V_{\text{饼}} = 0.16864\text{m}^3$$

$$\therefore V_{\text{滤}} = V_{\text{悬}} - V_{\text{滤饼}} = 2 - 0.16864 = 1.83 \text{ m}^3$$

$$(2) \quad V^2 = KA^2\tau \text{ (恒压, 过滤介质忽略)}$$

$$1.83^2 = 0.162 \times A^2 \times \frac{1}{2}$$

$$A = 6.43 \text{ m}^2$$

$$n \times 0.56^2 \times 2 = 6.43$$

$$n = 10.25 \approx 11 \text{ 只}$$

检验滤饼是否能放下，

$$11 \times 0.56^2 \times 0.05 = 0.172 > 0.16864 \text{ m}^3$$

例：某板框压滤机共有 20 只滤框，框的尺寸为 $0.45 \times 0.45 \times 0.025 \text{ m}$ ，用以过滤某种水悬浮液。悬浮液中每 m^3 清水带有固体质量 25 kg ，滤饼中含水 50% （质量百分率）。试求：滤框被滤饼安全充满时，过滤所得的滤液量（ m^3 ）

$$\rho_p = 1500 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_{\text{水}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{解：} V_{\text{滤}} = V_{\text{清液}} - V_{\text{饼液}}$$

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

$$\frac{1}{\bar{\rho}_{\text{饼}}} = \frac{0.5}{1000} + \frac{0.5}{1500}$$

$$\bar{\rho} = 1200 \text{ kg/m}^3$$

$$\therefore m_{\text{固}} = 0.5 \times 1200 \times 0.101 = 60.6 \text{ kg}$$

$$\therefore m_{\text{饼液}} = 60.6 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned}
 V_{\text{饼液}} &= \frac{60.6}{1000} \\
 \frac{1}{25} &= \frac{V_{\text{清}}}{60.6} \\
 V_{\text{滤}} &= V_{\text{清液}} - V_{\text{饼液}} \\
 &= \frac{60.6}{25} - \frac{60.6}{1000} \\
 &= 2.36(\text{m}^3)
 \end{aligned}$$

4.4.6 过滤过程的生产能力

1. 间歇过滤机的生产能力

叶滤机和压滤机都是典型的间歇式过滤机，每一操作周期由以下三部分组成：

(1) 过滤时间 τ

(2) 洗涤时间 τ_w

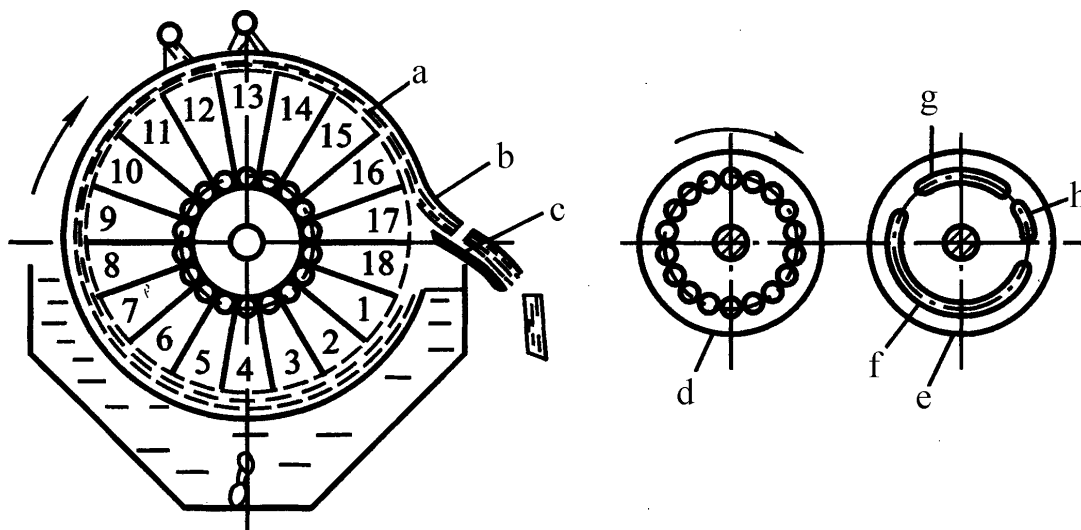
(3) 组装、卸渣及清洗滤布等辅助时间 τ_D

$$\therefore \text{生产能力: } Q = \frac{V}{\Sigma \tau}$$

（间歇过滤机在单位时间可能得到滤液量）

$\therefore \tau \uparrow$ 对提高 Q 并不利有 τ_{opt}

二、回转真空过滤机生产能力



转鼓分成过滤区，洗涤脱水区，卸渣区，是连续，恒压下操作的。

若转鼓的转速为 $n(1/s)$ ，转鼓浸入面积占全部转鼓面积的分率为 φ 。

(φ : 30%~40%，若无洗涤 60%)

$$\text{则 } \tau = \frac{\varphi}{n}$$

τ 指转鼓转一周 τ 时间在过滤。

由恒压过滤过程：

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

$$(q + q_e)^2 = K\tau + q_e^2$$

$$\therefore q = \sqrt{K\tau + q_e^2} - q_e$$

生产能力： $Q = nqA$

A ：转鼓面积

若忽略滤布阻力 $q_e = 0$

$$Q = n\sqrt{K\tau}A = n\sqrt{K\frac{\varphi}{n}}A$$

$$= \sqrt{K\phi n A^2}$$

此式近似表示了影响 Q 的因素。

应注意： $Q \propto \sqrt{n}$

$n \uparrow$ 是否有极限？

有

一般 $n = 0.1 \sim 0.3 \text{ r/min}$ (转/分)

$\because n \uparrow$ 滤饼变薄, 滤布破损, 且转速太快, 功率消耗大。

例：用一回转真空过滤机 ($A_{\text{转}} = 3\text{m}^2$) 过滤悬浮液, 已知原工况 $p_1 = 53.3\text{kPa}$ (真), $n_1 = 0.6 \text{ r/min}$, 得到 $Q_1 = 50\text{m}^3/\text{h}$, 滤饼厚度 $L_1 = 10\text{mm}$, 新工矿 $p_2 = 80\text{kPa}$ (真), $Q_2 = 2Q_1$

求：(1) $n_2 = ?$ (2) $L_2 = ?$ ($V_e = 0, s = 0$)

解：(1) 恒压过滤 $V_e = 0$

$$\therefore q^2 = K\tau$$

$$Q = n\sqrt{K\tau}A = n\sqrt{K\frac{\phi}{n}A} = \sqrt{K\phi n A^2}$$

$$K = \frac{2\Delta\mathcal{P}^{1-s}}{r_0\mu\phi}$$

$$\therefore \frac{Q_2^2}{Q_1^2} = \frac{K_2 n_2}{K_1 n_1}$$

$$s=0 \quad \frac{K_2}{K_1} = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{80}{53.3} = 1.5$$

$$\therefore n_2 = \frac{Q_2^2}{Q_1^2} \times \frac{K_1}{K_2} \times n_1$$

$$= 2^2 \times \frac{1}{1.5} \times 0.6 = 1.6 r / \min$$

$$(2) L \propto q$$

$$q = \sqrt{K\tau} = \sqrt{K \frac{\varphi}{n}}$$

$$\therefore L_2 = \sqrt{\frac{K_2}{K_1} \times \frac{n_1}{n_2}} \times L_1$$

$$= \sqrt{1.5 \times \frac{0.6}{1.6}} \times 10$$

$$= 7.5 \text{ mm}$$

4.5.2 加快过滤速率的途径

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

$$K = \frac{2\Delta\mathcal{P}}{r\mu\phi} \quad r = \frac{K'a^2(1-\varepsilon)}{\rho_p\varepsilon^3}$$

原则上加快过滤速率的途径有：

- 1、改变滤饼结构—使用助滤剂 ε , s
- 2、改变悬浮体中的颗粒聚集状态 a
- 3、动态过滤:

限制滤饼厚度增长

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

$$u \propto \frac{1}{L}$$

- 4、反冲滤膜