

练习四

第四章 流体通过颗粒层的流动
第五章 颗粒的沉降和流态化

一、填空题

1. 流体通过固定床，颗粒群的平均直径是以比表面积相等为基准的，理由是层流流动阻力与颗粒层内固体表面积得大小有关，与表面形状无关。若流体以一定的流速通过一大小均匀且规则装填的球型颗粒固定床，球型颗粒直径越小，流体通过床层的压降越大，原因是颗粒比表面积上升。工业上康采尼方程常用来测定颗粒的比表面积。

$$S_{\text{总}} = V_{\text{床}} \cdot a \cdot (1 - \varepsilon)$$

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

$$d_p \downarrow \Rightarrow a \uparrow$$

2. 叶滤机中如滤饼不可压缩，当过滤压差增加一倍时，过滤速率是原来的 2 倍。粘度增加一倍时，过滤速率是原来的 $1/2$ 倍。

过滤速率基本方程

$$\frac{dq}{d\tau} = \frac{K}{2(q + q_e)} = \frac{\Delta \mathcal{P}^{1-s}}{r_0 \phi u (q + q_e)}$$

操作压差： $\Delta \mathcal{P}$

介质阻力： q_e

滤饼因素： $r_0, \phi(a, a, \varepsilon), \mu$

3. 对真空气回转过滤机，转速越大，则每转一周所得的滤液体量就越少，该滤机的生产能力则越大。

$$\tau = \frac{\Phi}{n}$$

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

$$Q = q \cdot A \cdot n$$

$$\because n \uparrow \quad \because \tau \downarrow \quad q \downarrow$$

$$V = qA \downarrow$$

$$Q \uparrow = qAn = (\sqrt{q_e^2n^2 + Kn\varphi} - q_e n)A$$

4. 某叶滤机恒压操作，过滤终了时 $V=0.5\text{m}^3$, $\tau=1\text{h}$, $\text{Ve}=0$, 滤液粘度是水的4倍。现在同一压强下再用清水洗涤, $V_w=0.1\text{m}^3$, 则洗涤时间为 **0.1h**。

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{KA^2}{2(V+V_e)} = \frac{\Delta \mathcal{P}^{1-S} A^2}{r_0 \phi \mu (V+V_e)} \quad \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w = \frac{\Delta \mathcal{P}_w^{1-S} A_w^2}{r_0 \phi \mu_w (V_{\text{终}}+V_e)}$$

$$\because \mu_w = \frac{1}{4} \mu, \Delta \mathcal{P}_w = \Delta \mathcal{P}, A_w = A$$

$$\therefore \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w = 4 \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_{\text{终}}$$

$$\because V_e = 0 \quad V^2 = KA^2 \tau$$

$$\therefore KA^2 = \frac{V^2}{\tau} = \frac{0.5^2}{1} = 0.25 \quad \left(\frac{dV}{d\tau}\right)_{\text{终}} = \frac{KA^2}{2V} = \frac{0.25}{2 \times 0.5} = 0.25 \text{m}^3/\text{h}$$

$$\tau_w = \frac{V_w}{\left(\frac{dV}{d\tau}\right)_w} = \frac{0.1}{4 \times 0.25} = 0.1\text{h}$$

5. 流化床操作中，流体在床层中的真实速率为 U_1 ，颗粒沉降速度为 U_t ，流体通过床层的表观速度为 U ，三者数值大小关系为 $u_t \geq u_1 > u$

沉降速度是流体与颗粒的综合特性

$$u_t = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu}$$

$$\text{流化时: } u_1 = \frac{V}{\varepsilon} = u_t$$

u_1 与 ε —— 对应

6. 离心分离因素 α 的物理意义是同一颗粒所受离心力与重力之比，评价旋风分离器主要性能指标为分离效率和压降。

$$\alpha = \frac{\omega^2 r}{g} = \frac{m \cdot \omega^2 r}{m \cdot g}$$

7. 流体通过流化床的压降随气体流量增加而 不变。流化床主要优点是 床层温度、流体浓度分布均匀，其 主要不正常现象有 沟流 和 腾涌。流化床实际流化现象分 散式流化 和 聚式流化。

流体通过流化床的压降为：

$$\Delta \mathcal{P} = \frac{m}{A\rho_p} (\rho_p - \rho)g$$

即：单位截面床层内固体的表观重量。

散式流化：液固系统

聚式流化：气固系统

8. 玻璃管长1米，充满油。从顶端每隔1秒加入1滴水，问：
 A. 油静止，当加入第21滴水时，第一滴正好到底部，则沉降速度为 0.05 m/s. B、现油以0.01 m/s的速度向上运动，加水速度不变，则管内有水 25 滴

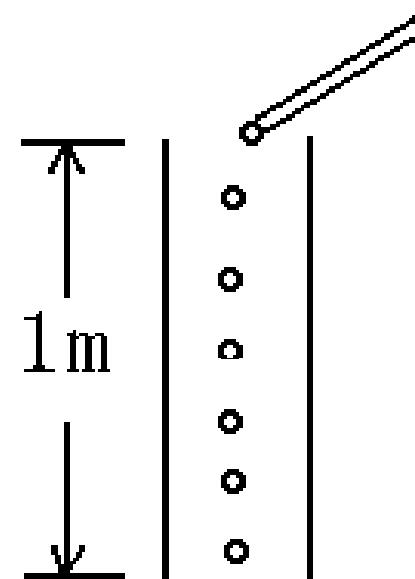
$$A \cdot \tau = \frac{(21 - 1) \text{滴}}{1 \text{滴/s}} = 20 \text{s}$$

$$u_t = u_p = \frac{1 \text{m}}{20 \text{s}} = 0.05 \text{m/s}$$

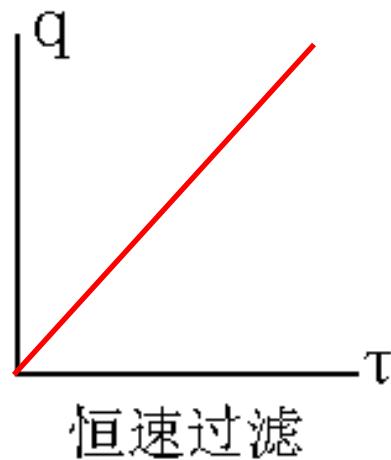
$$B. u_p = u_t - u = 0.05 - 0.01 = 0.04 \text{m/s}$$

$$\tau = \frac{1}{u_p} = \frac{1}{0.04} = 25(\text{s})$$

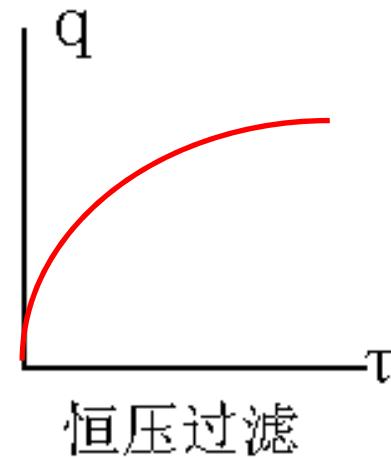
$$n = \frac{25 \text{s}}{1 \text{s/滴}} = 25 \text{滴}$$



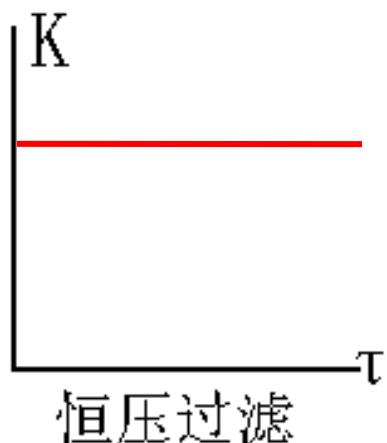
二、作图题



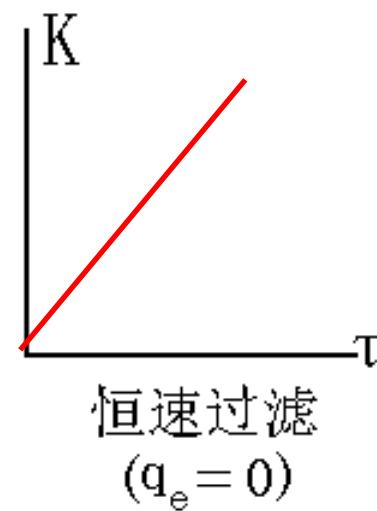
恒速过滤



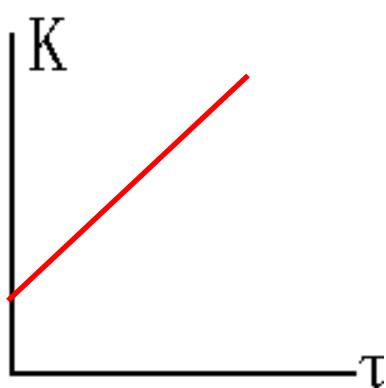
恒压过滤



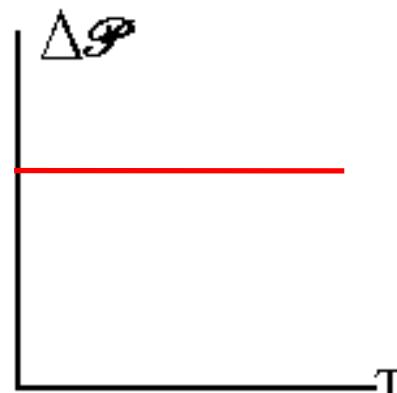
恒压过滤



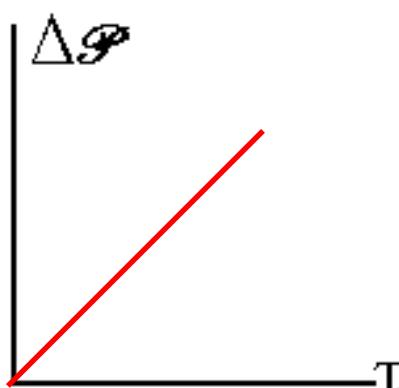
恒速过滤
($q_e = 0$)



恒速过滤
($q_e \approx 0$)



恒压过滤



恒速过滤
($q_e = 0$, $s = 0$)



恒速过滤
($q_e \approx 0$, $s \approx 0$)

三、计算题

1、拟用板框压滤机恒压过滤含 CaCO_3 8%（质量）的水悬浮液 2m^3 ，每 m^3 滤饼中含固体 1000kg ， CaCO_3 密度为 2800kg/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 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) 滤饼不可压缩，可用体积进行衡算：

$$V_{悬} = V_{饼} + V$$

$$V_{悬} \phi = V_{饼} \cdot (1 - \varepsilon)$$

$$\phi = \frac{w / \rho_D}{w / \rho_D + \frac{(1-w)}{\rho}} = \frac{0.08 / 2800}{\frac{0.08}{2800} + \frac{1-0.08}{1000}} = 0.030$$

$$\varepsilon = \frac{1 - \frac{1000}{2800}}{1} = 0.0643$$

$$V_{饼} = \frac{V_{悬} \cdot \phi}{1 - \varepsilon} = \frac{2 \times 0.030}{1 - 0.0643} = 0.168 \text{m}^3$$

$$V = V_{悬} - V_{饼} = 2 - 0.168 = 1.832 \text{m}^3$$

(2) 恒压过滤

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

介质阻力不计: $V_e = 0$

$$\therefore A = \frac{V}{\sqrt{K\tau}} = \frac{1.832}{\sqrt{0.162 \times \frac{30}{60}}} = 6.437 \text{m}^2$$

$$A' = 0.560 \times 0.560 \times 2 = 0.627 \text{m}^2$$

$$n = \frac{A}{A'} = 10.26 \approx 11$$

每个框可容滤饼为:

$$V_{\text{框}} = 0.56 \times 0.56 \times 0.05 = 0.0157 \text{m}^3$$

$$n' = V_{\text{饼}} / V_{\text{框}} = 0.168 / 0.0157 = 10.7 \approx 11$$

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 98.1kPa ，该条件下 $K = 1 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$, $q_e = 0.02 \text{m}^2/\text{m}^3$. 已知滤饼与滤液体积比为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？

(1) 过滤面积为：

$$A = 2 \times 0.635 \times 0.635 = 0.8065 \text{m}^2$$

$$V_{\text{饼}} = 0.635 \times 0.635 \times 0.025 = 0.0101 \text{m}^3$$

$$V = V_{\text{饼}} / 0.075 = \frac{0.0101}{0.075} = 0.1347 \text{m}^3$$

$$V_e = q_e A = 0.02 \times 0.8065 = 0.0161 \text{m}^3$$

恒压过滤： $V^2 + 2VV_e = KA^2\tau$

$$\begin{aligned}\therefore \tau &= \frac{V^2 + 2VV_e}{KA^2} = \frac{0.1347^2 + 2 \times 0.1347 \times 0.0161}{1 \times 10^{-5} \times (0.8065)^2} \\ &= 3.445 \times 10^3 (\text{s}) = 0.957 (\text{h})\end{aligned}$$

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

$$\frac{K'}{K} = \left(\frac{\Delta \mathcal{P}'}{\Delta \mathcal{P}} \right)^{1-s} = 2^{1-0.5} = 1.414$$

$$K' = 1.414K = 1.414 \times 1 \times 10^{-5} = 1.414 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\begin{aligned} \tau' &= \frac{V^2 + 2VV_e}{K'A^2} = \frac{0.1347^2 + 2 \times 0.1347 \times 0.0161}{1.414 \times 10^{-5} \times (0.8065)^2} \\ &= 2.437 \times 10^3 (\text{s}) = 0.677 (\text{h}) \end{aligned}$$

(3) 过滤时间不变，滤液体积不变。

$$V = 0.1347 \times 28 = 3.76 \text{ m}^3$$

3、一降尘室每层底面积 $10m^2$, 内设9层隔板, 现用此降尘室净化质量流量为 $1200kg/h$, 温度为 $20^\circ C$ 的常压含尘空气, 尘粒密度为 $2500kg/m^3$, 问:

- (1) 可100%除去的最小颗粒直径为多少? 可50%除去的最小颗粒直径为多少? 直径为 $5\mu m$ 的尘粒可除去百分率为多少? (设尘粒在空气中均匀分布)。
- (2) 如将含尘空气预热至 $150^\circ C$, 再进入降尘室, 则可100%除去的最小颗粒直径为多少? 为保证100%除去的最小颗粒直径不变, 空气的质量流量为多少?
- (3) 定性分析降尘室生产能力发生变化的原因。

查20°C时常压空气的物性为：

$$\rho = 1.20 \text{ kg/m}^3, \mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$(1) A = (n + 1)A_{\text{底}} = (9 + 1) \times 10 = 100 \text{ m}^2$$

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = \frac{1200}{1.20} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$u_t = \frac{q_v}{A} = \frac{1000}{100} \\ = 10 \text{ m/h} = 2.778 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

假设100%除去的最小颗粒沉降处于斯托克斯区，则：

$$d_{\min} = \sqrt{\frac{18\mu u_t}{(\rho_p - \rho)g}} = \sqrt{\frac{18 \times 1.81 \times 10^{-5} \times 2.778 \times 10^{-3}}{(2500 - 1.2) \times 9.81}} \\ = 6.076 \times 10^{-6} \text{ m}$$

验证：

$$R_{ep} = \frac{d_{min} u_t \rho}{\mu} = \frac{6.076 \times 10^{-6} \times 2.778 \times 10^{-3} \times 1.20}{1.81 \times 10^{-5}} \\ = 1.116 \times 10^{-3} < 2$$

原假设成立。

$$\eta = \frac{u_{tp}}{u_t}$$

$$\therefore u_{tp} = \eta \cdot u_t = 50\% \times 2.778 \times 10^{-3} = 1.389 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

假设50%除去的最小颗粒沉降处于斯托克斯区，则

$$d_{min,p} = \sqrt{\frac{18\mu u_{t,p}}{(\rho_p - \rho)g}} \\ = \sqrt{\frac{18 \times 1.81 \times 10^{-5} \times 1.389 \times 10^{-3}}{(2500 - 1.2) \times 9.81}} = 4.297 \mu\text{m}$$

验证： $R'_{ep} < R_{ep} < 2$ 原假设成立。

$5\mu\text{m} < d_{\min} = 6.076\mu\text{m}$, 处于斯托克斯区:

$$u_t' = \frac{d_{\min}' (\rho_p - \rho)g}{18\mu} = \frac{(5 \times 10^{-6})^2 \times (2500 - 1.2) \times 9.81}{18 \times 1.81 \times 10^{-5}}$$
$$= 1.881 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

$$\eta = \frac{u_t'}{u_t} = \frac{1.881 \times 10^{-3}}{2.778 \times 10^{-3}} = 67.7\%$$

(2) 空气预热至150°C时,

$$\rho = 0.835 \text{ kg/m}^3 \quad \mu = 24.1 \times 10^{-6} \text{ Pa.s}$$

$$u_t = \frac{q_v}{A_{\text{底}}} = \frac{1200 / (0.835 \times 3600)}{100} = 0.0040 \text{ m/s}$$

$$d_{p\min} = \sqrt{\frac{18 \mu u_t}{(\rho_p - \rho)g}} = \sqrt{\frac{18 \times 24.1 \times 10^{-6} \times 0.0040}{(2500 - 0.835) \times 9.81}}$$

$$= 8.41 \times 10^{-6} \text{ m} = 8.41 \mu\text{m}$$

若仍 $d_{p\min} = 6.08 \mu\text{m}$

$$\text{由 } u_t = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho)g}{18\mu} \text{ 及 } u_t = \frac{q_v}{A_{\text{底}}} = \frac{q_m / \rho}{A_{\text{底}}} \text{ 得}$$

$$\frac{d_p^2(\rho_p - \rho)g}{18\mu} = \frac{q_m / \rho}{A_{底}}$$

$$q_m = \frac{d_p^2(\rho_p - \rho)\rho g A_{底}}{18\mu}$$

$$= \frac{(6.08 \times 10^{-6})^2 \times (2500 - 0.835) \times 0.835 \times 9.81 \times 100}{18 \times 24.1 \times 10^{-6}}$$
$$= 0.174 \text{kg/s} = 628.0 \text{kg/h}$$

(3) $t \uparrow \quad \mu \uparrow$ 对沉降不利

$t \uparrow \quad \rho \downarrow q_m \downarrow$

4、现用一直径1.75m，长0.9m的回转真空过滤机过滤密度为 1116kg/m^3 的某悬浮液，转筒转速为 1r/min ，浸没度为 $1/3$ 。测得过滤常数 $K=5.15 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$ ，每送出 1m^3 滤液所得的滤饼中含固相 594kg ，固相密度为 1500kg/m^3 ，液相为水。假定滤布阻力可以忽略，滤饼不可压缩，试求：

- (1) 过滤机每转一周所得的滤液体积及过滤机的生产能力Q；
- (2) 转筒表面的滤饼厚度L；
- (3) 若转速为 0.5r/min ，而其它操作条件不变，Q与L将如何变化？

(1)

$$A = \pi dl = 3.14 \times 1.75 \times 0.9 = 4.945 \text{m}^2$$

$$\tau = \frac{\Phi}{n} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{1} \cdot 60 = 20 \text{s}$$

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

$$V = \sqrt{KA^2\tau} = \sqrt{5.15 \times 10^{-6} \times (4.9455)^2 \times 20}$$
$$= 50.2 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

$$Q = \frac{V}{\sum \tau} = \frac{50 \times 10^{-3}}{\frac{1}{1} \times 60} = 8.365 \times 10^{-4} \text{m}^3 / \text{s}$$

(2) 设每过滤 1 m^3 滤液所得滤饼体积为 $V_{\text{饼}}$ ，则：

$$\rho_{\text{悬}}(1 + V_{\text{饼}}) = \rho_{\text{固}}V_{\text{饼}}(1 - \varepsilon) + \rho_{\text{液}}V_{\text{饼}}\varepsilon + \rho_{\text{液}}1$$

$$\rho_{\text{固}}V_{\text{饼}}(1 - \varepsilon) = 594$$

代入数据得：

$$1116(1 + V_{\text{饼}}) = 1500V_{\text{饼}}(1 - \varepsilon) + 1000V_{\text{饼}}\varepsilon + 1000$$

$$1500V_{\text{饼}}(1 - \varepsilon) = 594$$

解得： $V_{\text{饼}} = 0.7069\text{m}^3$ $\varepsilon = 0.4398$

转筒转一周所得滤饼体积为：

$$V_{\text{饼},\text{一周}} = V \cdot V_{\text{饼}} = 5.02 \times 10^{-2} \times 0.7069 = 3.548 \times 10^{-2}\text{m}^3$$

$$L = \frac{V_{\text{饼},\text{一周}}}{A} = \frac{3.548 \times 10^{-2}}{4.9455} = 7.175 \times 10^{-3}\text{m}$$

(3)

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

$$= 8.36 \times 10^{-4} \sqrt{0.5} = 5.91 \times 10^{-4} m^3 / s$$

$$L' = 0.707 q' = 0.707 q \sqrt{\frac{n}{n'}}$$

$$= 0.707 \times 1.014 \times 10^{-2} \times \sqrt{\frac{1}{0.5}}$$

$$= 1.014 \times 10^{-2} m$$