

收时又进行第二次土壤取样测定, 结果见表 7, 从所测数据表明, 速灭杀丁在土壤中消失要比在果实上快, 是由于土壤中微生物对其利用分解还是抽提不完全引起, 待进一步探讨。

结 语

速灭杀丁在金帅苹果上残留动态, 二年试验结果表明, 残留在苹果上的速灭杀丁消失颇为缓慢, 25 天仅消失 26—36%, 其残留量随喷药次数, 用药量而增加, 苹果树全年用速灭杀丁施药 4 次, 常用防治浓度 60ppm, 其残留量在 1 ppm 以下, 其主要残留在果皮中, 果肉中残留量小于检出限度($<0.01\text{ppm}$),

按世界卫生组织 (WHO)^[5] 提出速灭杀丁在苹果上的最高允许残留量为 2 ppm, 故建议速灭杀丁在苹果上的安全使用标准为: 常用浓度为 60ppm, 最高使用浓度为 120ppm, 施药 4 次, 安全间隔期为 15 天。

参 考 文 献

- [1] Sumitomo Chemical Co., Technical report.
- [2] Rachel. S. et al., *J. Agric. Food Chem* 29, 856—860 (1981).
- [3] Terry D. et al., *JAOAC* 65, 1106—1110 (1982).
- [4] 薛家骅, 徐家基等, 南京药学院学报 1, 77—81 (1979).
- [5] WHO, *Pesticides Residues in Food: 1979 Evaluation -The monographs*.

压滤机过滤压密脱水作用的研究

王 中 来

(福州大学化工系)

一、前 言

降低悬浮液的含水量是环境工程中的一个重要课题。许多工业废渣和污泥往往因含水量太多和体积庞大, 造成运输困难或者在综合利用过程中消耗大量的能量。

本文以福州第二化工厂的电石渣水泥生料浆为实验物料进行机械脱水研究。压榨脱水和过滤压密脱水是两种有效的机械脱水方法。国外对前者做了大量的研究^[1-4], 对后者也做了一些工作^[5], 本文试图对过滤压密的脱水机理和实际应用作初步探讨。

过滤压密脱水的设备是压滤机, 压滤机的主要特点是滤室体积固定不变。在压滤机的压滤过程中, 当滤饼充满滤室时, 过滤阶段即告结束, 接着进入料浆挤压滤饼的过滤压密阶段^[5]。后者的特性显著偏离传统的 Ruth

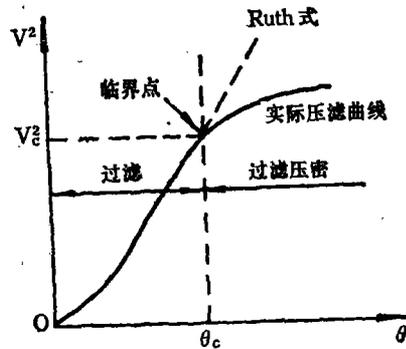


图 1 压滤曲线

公式, 如图 1 所示。

二、实验装置和实验方法

本实验装置的流程图如图 2 所示, 图 3 为实验用板框型压滤机的剖视图。本实验采用压滤面积 $A = 400\text{cm}^2$, 厚度 $L = 2.6 - 6.5\text{cm}$ 范围内的各种滤框进行实验研究。

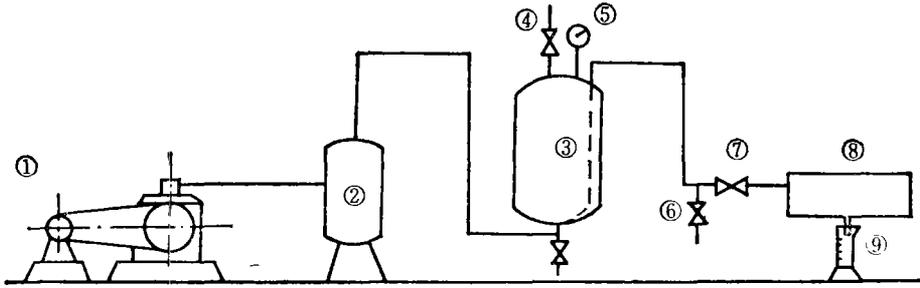


图2 实验装置流程图

① 空压机 ② 缓冲罐 ③ 料浆贮罐 ④ 加料和压力调节阀 ⑤ 压力表 ⑥ 取样阀 ⑦ 进料阀 ⑧ 压滤机 ⑨ 量筒

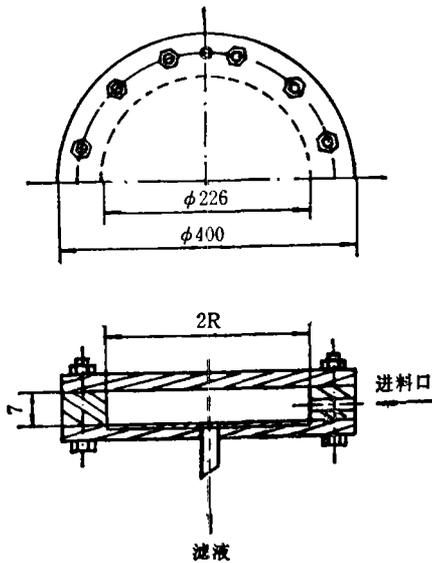


图3 压滤机剖视图

为了防止料浆中固体颗粒的沉降，压缩空气从料浆贮罐的底部通入进行搅拌，在料浆固体浓度 $S = 0.30 - 0.45(-)$ ，压力

$$P = 1 - 11 \text{ kg/cm}^2$$

(表压)范围内进行恒压压滤实验，测定滤液量随时间变化的关系。

表1列出了实验物料的粒度分布数据，

三、实验结果及考察

如前所述，一般情况下，压滤机的压滤过程由符合 Ruth 式的过滤阶段和偏离 Ruth 式

表1 水泥生料浆的粒度分布

固体真密度 $\rho_s = 2.30 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$	
Stokes' dia $d(\mu\text{m})$	重量百分含量(%)
$d > 76$	22.6
$76 > d > 53$	9.8
$53 > d > 40$	8.1
$40 > d > 30$	15.0
$30 > d > 20$	11.6
$20 > d > 10$	11.1
$10 > d > 5$	9.8
$5 > d > 3$	5.4
$3 > d$	6.6

的过滤压密阶段所组成。对于恒浓度的压滤过程，在任一时刻 θ 进行总物料衡算，可得

$$W_s/S = \rho V + m W_s \quad (1)$$

式中 $W_s(\text{kg})$ 是滤饼的固体质量， $V(\text{m}^3)$ 是滤液体积， $m(-)$ 是滤饼的湿干质量比， $S(-)$ 是悬浮液的固体浓度， $\rho(\text{kg/m}^3)$ 是滤液密度。

滤饼的湿干质量比 m 和平均孔隙率 $\epsilon_{av}(-)$ 有如下关系

$$m = 1 + \frac{\rho \epsilon_{av}}{\rho_s (1 - \epsilon_{av})} \quad (2)$$

或

$$\epsilon_{av} = \frac{(m - 1)\rho_s}{\rho + (m - 1)\rho_s} \quad (3)$$

(一) 恒压过滤阶段

对过滤阶段，服从 Ruth 的恒压过滤公

式^[6]。

$$(V + V_0)^2 = K(\theta + \theta_0) \quad (4)$$

式中 $V_0(\text{m}^3)$ 是表示过滤介质阻力的虚拟滤液量, $\theta_0(\text{s})$ 是得到 V_0 时所需的时间, $K(\text{m}^6/\text{s})$ 是恒压过滤常数, 它与平均过滤比阻 $\alpha_{av}(\text{m}/\text{kg})$ 具有如下关系

$$\alpha_{av} = \frac{2A^2P(1 - mS)}{K\mu\rho S} \quad (5)$$

式中 $P(\text{kg}/\text{cm}^2)$ (表压) 是过滤压力, $\mu(\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}^2)$ 是滤液粘度, $A(\text{cm}^2)$ 是过滤面积, $m(-)$ 是滤饼的湿干质量比。

经测定, 本实验中滤饼平均比阻 α_{av} 与过滤压力 P 之间的关系如图 4 所示, 它可以整理成如下关系

$$\alpha_{av} = 1.05 \times 10^{11} P^{0.38} \quad (6)$$

上式的平均误差为 7%, 最大误差为 17%。

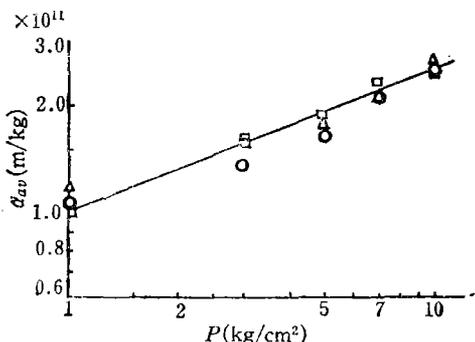


图 4 α_{av} vs. P

- $S = 0.300(-)$
- △ $S = 0.437(-)$
- $S = 0.333(-)$

(二) 过滤和过滤压密临界准数 FC_c

忽略过滤介质阻力时, Ruth 式(4)可简化为

$$V^2 = K\theta \quad (7)$$

如图 1 所示, 由实际压滤曲线与 Ruth 式直线的分界点可求出临界点时间 θ_c 和临界点滤液体积 V_c 。用因次分析法整理实验数据, 得到无因次准数 FC 为

$$FC = \left(\frac{P}{\mu}\right)^{0.84} \left(\frac{g\mu}{\rho_s L^2}\right)^{0.16} \frac{S^{2.45}}{L^2 \alpha_{av} \rho} \theta \quad (8)$$

实验发现, 临界点时间处的无因次准数 FC_c 等于常数 4.92×10^{-4} , 即

$$FC_c = 4.92 \times 10^{-4} \quad (8')$$

因此, 当 $FC < FC_c = 4.92 \times 10^{-4}$ 时, 压滤过程处于 Ruth 式适用的过滤阶段; 当

$$FC > FC_c = 4.92 \times 10^{-4}$$

时, 压滤过程处于 Ruth 式不适用的过滤压密阶段; 而当 $FC = FC_c = 4.92 \times 10^{-4}$ 时, 压滤过程则处于过滤和过滤压密的临界状态。

式(8')的平均误差为 7%, 最大误差为 20%。

(三) 过滤压密所得滤饼的最终孔隙率 $\epsilon_{av,c}$

在过滤期间, 滤饼平均孔隙率一般认为是 不变的, 但是在过滤压密期间, 滤饼平均孔隙率 ϵ_{av} 则随时间逐渐减小, 由物料衡算可得下式

$$\epsilon_{av} = \frac{Q_0(1 - S)\rho_s - V\rho S}{Q_0(1 - S)\rho_s + Q_0\rho S} \quad (9)$$

式中 $Q_0(\text{m}^3)$ 是滤室的体积。

过滤压密期间的滤饼平均孔隙率 ϵ_{av} 从临界点处的 $\epsilon_{av,c}$ 逐渐减小并趋于最终孔隙率 $\epsilon_{av,\infty}$, 如图 5 所示。图中的 θ_{fc} 是过滤压密时间, 即

$$\theta_{fc} = \theta - \theta_c \quad (10)$$

滤饼最终孔隙率 $\epsilon_{av,\infty}$ 与过滤压力 $P(\text{kg}/\text{cm}^2)$ 、料浆浓度 $S(-)$ 、滤饼厚度 $L(\text{cm})$ 的关系, 经实验测得为

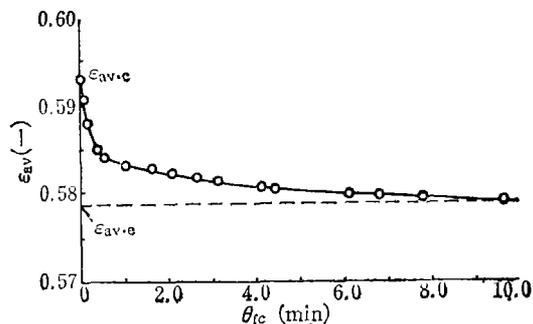


图 5 ϵ_{av} vs. θ_{fc}

$P = 10\text{kg}/\text{cm}^2$ $S = 0.364(-)$

$$\varepsilon_{av} \cdot e = 0.621 - 5.884 \times 10^{-3}P - 1.913 \times 10^{-2}S + 3.462 \times 10^{-3}L \quad (11)$$

上式的平均误差为 1.2%，最大误差为 2.9%。

四、过滤压密过程的解析

假定在过滤期间 ($FC < FC_c$)，滤饼平行于过滤介质在成长，直至充满滤室 ($FC = FC_c$)，接着进入过滤压密阶段 ($FC > FC_c$)。在过滤压密期间，假定滤饼体积一定，由于滤液流线发生变化而引起了压密现象。

(一) 过滤压密微分方程式

现在，把过滤压密期间的滤饼取出微元体 $dx dy dz$ 进行研究，如图 6 所示，微元体的中心坐标是 (x, y, z) 。中心点沿着 X、Y、Z 方向的表观液体流速分别为 v_x, v_y, v_z [m/s]。

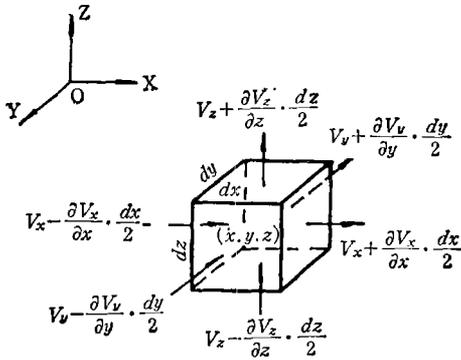


图 6 滤饼的微元体

在图 6 中对滤液进行物料衡算，可得下列微分方程式^[2,7]

$$\frac{\partial e}{\partial \theta_{fc}} = (1 + e) \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \quad (12)$$

式中 $e(-)$ 是局部孔隙比，与局部空隙率 $\varepsilon(-)$ 的关系为 $e = \varepsilon / (1 - \varepsilon)$ 。

假定 Kozeny-Carman 方程^[3]适用，则有

$$\left. \begin{aligned} v_m &= \frac{1 + e}{\mu \rho_s \alpha} \cdot \frac{\partial P_l}{\partial m} \\ m &= x, y, z \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中 α [m/kg] 是局部比阻。

再假定在滤饼内部，土力学中的 Terzaghi 有效应力原理的概念^[5,8]可应用，即

$$P = P_l + P_s \quad (14)$$

式中 P_l (kg/cm²) 是局部液压， P_s (kg/cm²) 是局部滤饼压缩压力， P (kg/cm²) 是总压。

若将容积变化率 m_v (cm³/kg) 和压密系数 C_v (m³/s) 定义为^[2,8]

$$m_v \equiv - \frac{1}{1 + e} \cdot \frac{de}{dP_s} \quad (15)$$

$$C_v \equiv \frac{1 + e}{\mu \rho_s m_v \alpha} \quad (16)$$

并假定 C_v 在过滤压密期间为定值，把式(13)至式(16)代入式(12)，则可得

$$\frac{\partial P_l}{\partial \theta_{fc}} = C_v \left(\frac{\partial^2 P_l}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P_l}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P_l}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

上式就是描述过滤压密期间局部液压变化规律的微分方程式。

(二) 过滤压密微分方程式的求解

为了便于求解，把式(17)转换为柱坐标形式。

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_l}{\partial \theta_{fc}} = C_v \left(\frac{\partial^2 P_l}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial P_l}{\partial r} \right. \\ \left. + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 P_l}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 P_l}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

过滤压密开始时的液压分布与过滤期间的液压分布相同，对象水泥生料这样的中等可压缩性物料，其液压分布近似服从正弦曲线规律^[2]。若考虑到壁效应作用，则在正弦曲线规律中乘一函数 $f(r)$ 。忽略料浆进口处液压梯度的影响，则可得初始条件和边界条件如下

I. C. $\theta_{fc} = 0$ 时，

$$P_l = P \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{z}{L} \right) \cdot f(r);$$

B. C. $z = 0, P_l = 0;$

$$z = L/i, \partial P_l / \partial z = 0;$$

$$r = R, \partial P_l / \partial r = 0$$

式中 R (cm) 是滤室半径， $i(-)$ 是排水面数，对本实验装置 $i = 1$ 。在上述条件下求解

式(18),得

$$P_l = \frac{2P}{R^2} \sum_{M_i} \frac{1}{[J_0(M_i R)]^2} \times \left[\int_0^R r f(r) J_0(M_i r) dr \right] \cdot \sin \frac{\pi z}{2L} \cdot e^{-(M_i^2 + \frac{\pi^2}{4L^2}) C_v \theta_{fc}} \cdot J_0(M_i r) \quad (20)$$

式中 J_0 是 Bessel 函数, M_i 是下式的正根。

$$J_0'(M_i R) = 0 \quad (21)$$

在式(20)中取级数的第一项,并经过一系列变化后可得

$$U_c \equiv \frac{V_{fc}}{V_{fc,\infty}} = \frac{\varepsilon_{av} \cdot c - \varepsilon_{av}}{\varepsilon_{av} \cdot c - \varepsilon_{av} \cdot e} = 1 - e^{-\left(\frac{14.682}{R^2} + \frac{\pi^2}{4L^2}\right) C_v \theta_{fc}} \quad (22)$$

上式即为过滤压密方程。式中 $U_c(-)$ 是过滤压密比, $V_{fc} = V - V_c(\text{m}^3)$ 是过滤压密进行到 θ_{fc} 时所得到的滤液量, $V_{fc,\infty}$ 是 θ_{fc} 为无限大时过滤压密所得到的滤液量。

(三) 过滤压密系数 C_v 的求取

(1) 经验方法

以 U_c 对 $\sqrt{\theta_{fc}}$ 作图,按图7所示方法求切线的斜率,然后再根据斜率按下式求出 C_v 。

$$C_v = \frac{\pi L^2}{8} \times (\text{slope})^2 \quad (23)$$

(2) 半经验法

利用所谓的压密和压缩透过实验^[9,10],可以求出下列经验式。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 P_S^n \\ e &= e_0 - C_c L_n P_S \\ \varepsilon &= \varepsilon_1 P_S^{-\lambda} \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

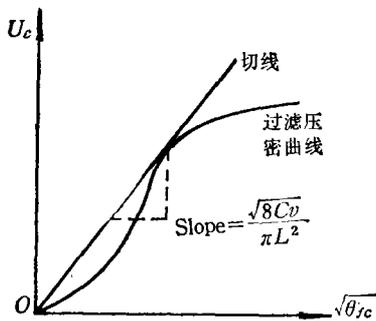


图7 C_v 的经验求取

将上式代入 C_v 的定义式(16)中可得

$$C_v = \frac{P_S(1 + e_0 - C_c L_n P_S)^2}{\mu \rho_S C_c (\alpha_0 + \alpha_1 P_S^n)} \quad (25)$$

式中 $\alpha_0, \alpha_1, n, e_0$ 及 C_c 都是实验常数, P_S 取过滤压密过程中滤饼压缩压力的平均值。

(四) 过滤压密方程的应用

过滤压密期间,压密比随时间的变化关系如图8所示。

图9表示 U_c 与 $\left(\frac{14.682}{R^2} + \frac{\pi^2}{4L^2}\right) \theta_{fc}$ 的关系。

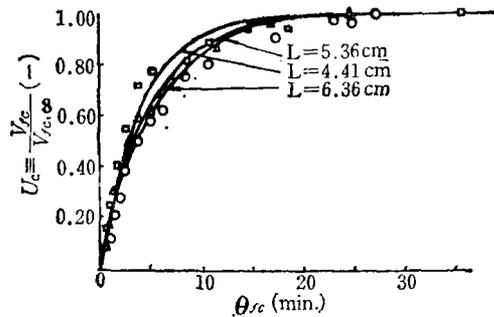


图8 U_c vs θ_{fc}

$P = 3 \text{ kg/cm}^2$ $S = 0.324(-)$
 \circ $L = 6.36 \text{ cm}$
 \triangle $L = 5.36 \text{ cm}$
 \square $L = 4.41 \text{ cm}$
 — 理论线

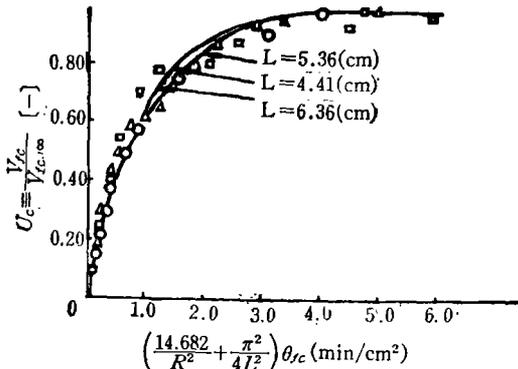
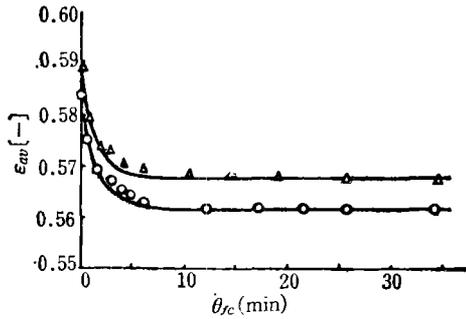
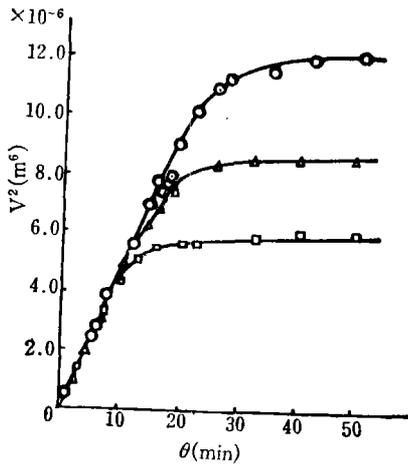


图9 U_c vs. $\left(\frac{14.682}{R^2} + \frac{\pi^2}{4L^2}\right) \theta_{fc}$

$P = 3 \text{ kg/cm}^2$ $S = 0.324(-)$
 \circ $L = 6.36 \text{ cm}$
 \triangle $L = 5.36 \text{ cm}$
 \square $L = 4.41 \text{ cm}$
 — 理论线

图 10 ε_{av} vs. θ_{fc} $P = 11 \text{ kg/cm}^2$ $\Delta S = 0.374(-) L = 4.71 \text{ cm}$ $\circ S = 0.377(-) L = 2.91 \text{ cm}$

— 理论线

图 11 V^2 vs. θ $P = 3 \text{ kg/cm}^2 S = 0.324(-)$ $\circ L = 6.36 \text{ cm}$ $\Delta L = 5.36 \text{ cm}$ $\square L = 4.41 \text{ cm}$

— 理论线

把式(23)代入式(22), 可得以孔隙率表示的过滤压密方程如下:

$$\frac{\varepsilon_{av \cdot c} - \varepsilon_{av}}{\varepsilon_{av \cdot c} - \varepsilon_{av \cdot r}} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{14.682}{8R^2} \pi L^2 + \frac{\pi^3}{32} \right) \cdot (\text{slope})^2 \cdot \theta_{fc} \right] \quad (26)$$

上式体现了滤饼平均孔隙率随过滤压密时间变化的一一对应关系, 如图 10 所示。

利用 Ruth 式(7)和过滤压密理论式(22)或式(26)即可进行整个压滤过程的计算, 如

图 11 所示。

五、结 论

为了给压滤机的设计提供一个过滤压密方程和降低滤饼的含水量, 本文以电石渣水泥生料浆为原料, 用板框型压滤机进行脱水实验, 并从理论上推导过滤压密公式, 所得结论如下:

(1) 压滤机的压滤过程由符合 Ruth 式的过滤阶段和偏离 Ruth 式的过滤压密阶段所组成。

(2) 利用过滤压密作用可以降低滤饼含水量, 过滤压密的最终孔隙率可用式(11)求算。

(3) 过滤和过滤压密临界准数

$$FC_c = 4.92 \times 10^{-4}$$

(4) 过滤压密过程可以以土力学中的 Terzaghi 理论为基础, 按三维压密过程进行解析, 所得的解析式(22)与实验结果表现出较好的一致性。因此, 在一般情况下, 工业压滤机的设计、校核或选型计算, 若以本文所述的方法为基础, 再结合传统的 Ruth 式, 则会更为严密、合理。

本文承蒙李庆斌副教授的指导, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- [1] Körmeny, I, *J. Food Sci.*, **29**, 631(1964).
- [2] 白户纹平等, 化学工学, **31**, 1125(1967).
- [3] 白户纹平等, 化学工学, **34**, 496, 587, 713, 829, 936(1970).
- [4] Shirato, M. et al., Simplified equation for constant pressure expression of Semisolid materials and filter cakes, The Second World Filtration Congress, London, p. 39, 1979.
- [5] 白户纹平等, 化学工学, **36**, 781(1972).
- [6] Ruth, B. F., *Ind. Eng. Chem.*, **38**, 564 (1946).
- [7] 华东水利学院土力学教研室主编, 土工原理与计算(上册), 200 页, 水利出版社, 1980 年。
- [8] Terzaghi, K. and R. B. Peck, *Soil Mechanics in Engineering Practice*, p. 65, John Wiley and Sons Inc., 1948.
- [9] Grace, H. P., *Chem. Eng. Progr.*, **49**, 303(1953).
- [10] 白户纹平等, 化学工学, **23**, 11, 226(1959).