

恒压过滤实验装置

实 验 指 导 书

一、实验目的

- 1、熟悉板框压滤机的构造、过滤工艺流程和操作方法。
- 2、通过恒压过滤实验，验证过滤基本理论。
- 3、学会测定过滤常数 K 、 q_e 、 τ_e 及压缩性指数 s 的方法。
- 4、了解过滤压力对过滤速率的影响。

二、基本原理

过滤是以某种多孔物质为介质来处理悬浮液以达到固、液分离的一种操作过程，即在外力的作用下，悬浮液中的液体通过固体颗粒层（即滤渣层）及多孔介质的孔道而固体颗粒被截留下来形成滤渣层，从而实现固、液分离。因此，过滤操作本质上是流体通过固体颗粒层的流动，而这个固体颗粒层（滤渣层）的厚度随着过滤的进行而不断增加，故在恒压过滤操作中，过滤速度不断降低。

过滤速度 u 定义为单位时间单位过滤面积内通过过滤介质的滤液量。影响过滤速度的主要因素除过滤推动力（压强差） Δp ，滤饼厚度 L 外，还有滤饼和悬浮液的性质，悬浮液温度，过滤介质的阻力等。

过滤时滤液流过滤渣和过滤介质的流动过程基本上处在层流流动范围内，因此，可利用流体通过固定床压降的简化模型，寻求滤液量与时间的关系，可得过滤速度计算式：

$$u = \frac{dV}{Ad\tau} = \frac{dq}{d\tau} = \frac{A\Delta p^{(1-s)}}{\mu \cdot r \cdot C(V+V_e)} = \frac{A\Delta p^{(1-s)}}{\mu \cdot r' \cdot C'(V+V_e)} \quad (1)$$

式中： u ——过滤速度，m/s；

V ——通过过滤介质的滤液量， m^3 ；

A ——过滤面积， m^2 ；

τ ——过滤时间，s；

q ——通过单位面积过滤介质的滤液量， m^3/m^2 ；

Δp ——过滤压力（表压）pa；

s ——滤渣压缩性系数；

μ ——滤液的粘度，Pa·s；

r ——滤渣比阻， $1/m^2$ ；

C ——单位滤液体积的滤渣体积， m^3/m^3 ；

V_e ——过滤介质的当量滤液体积， m^3 ；

r' ——滤渣比阻, m/kg;

C ——单位滤液体积的滤渣质量, kg/m³。

对于一定的悬浮液, 在恒温 and 恒压下过滤时, μ 、 r 、 C 和 Δp 都恒定, 为此令:

$$K = \frac{2\Delta p^{(1-s)}}{\mu \cdot r \cdot C} \quad \text{—— (2)}$$

于是式 (1) 可改写为: $\frac{dV}{d\tau} = \frac{KA^2}{2(V+V_e)}$ —— (3)

式中: K ——过滤常数, 由物料特性及过滤压差所决定, m²/s。

将式 (3) 分离变量积分, 整理得:

$$\int_{V_e}^{V+V_e} (V+V_e)d(V+V_e) = \frac{1}{2}KA^2 \int_0^\tau d\tau \quad \text{—— (4)}$$

即 $V^2 + 2VV_e = KA^2\tau$ —— (5)

将式 (4) 的积分极限改为从 0 到 V_e 和从 0 到 τ_e 积分, 则:

$$V_e^2 = KA^2\tau_e \quad \text{—— (6)}$$

将式 (5) 和式 (6) 相加, 可得:

$$(V+V_e)^2 = KA^2(\tau + \tau_e) \quad \text{—— (7)}$$

式中: τ_e ——虚拟过滤时间, 相当于滤出滤液量 V_e 所需时间, s。

再将式 (7) 微分, 得:

$$2(V+V_e)dV = KA^2d\tau \quad \text{—— (8)}$$

将式 (8) 写成差分形式, 则

$$\frac{\Delta\tau}{\Delta q} = \frac{1}{K}\bar{q} + \frac{2}{K}q_e \quad \text{—— (9)}$$

式中: Δq —— 每次测定的单位过滤面积滤液体积 (在实验中一般等量分配), m³/m²;

$\Delta\tau$ —— 每次测定的滤液体积 Δq 所对应的时间, s;

\bar{q} —— 相邻二个 q 值的平均值, m³/m²。

以 $\frac{\Delta\tau}{\Delta q}$ 为纵坐标, \bar{q} 为横坐标将式 (9) 标绘成一直线, 可得该直线的斜率和截距,

$$\text{斜率: } S = \frac{2}{K} \quad \text{—— (10)}$$

截距： $I = \frac{2}{K}q_e$ —— (11)

则， $K = \frac{2}{s}, \frac{m^2}{s}$ —— (12)

$q_e = \frac{KI}{2} = \frac{I}{s}, m^3$ —— (13)

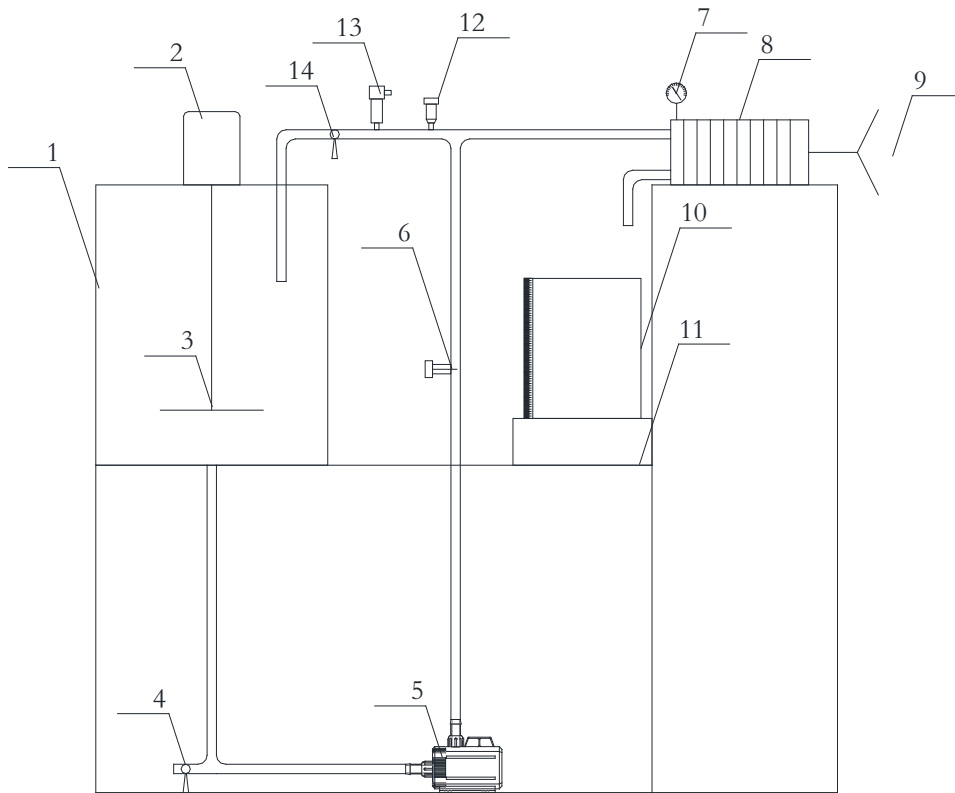
$\tau_e = \frac{q_e^2}{K} = \frac{I^2}{KS^2}, s$ —— (14)

改变过滤压差 ΔP ，可测得不同的K值，由K的定义式(2)两边取对数得：

$\lg K = (1-s)\lg(\Delta p) + B$ —— (15)

在实验压差范围内，若B为常数，则 $\lg K \sim \lg(\Delta p)$ 的关系在直角坐标上应是一条直线，斜率为(1-s)，可得滤饼压缩性指数s。

三、实验装置与流程



1——料液桶；2——搅拌电机；3——搅拌桨叶；4——排空阀；5——浆液泵；6——温度传感器；7——压力表；8——板框过滤机；9——手柄；10——水箱；11——电子天平；12——压力传感器；13——安全泄压阀；14——管路控制阀；

图 1-板框压滤机过滤流程图

本实验装置由料液桶、板框过滤机、滤液槽、电子天平等组成。 $Ca(OH)_2$ 或者 $MgCO_3$ 的悬浮液在配料桶内配制一定浓度后，利用泵加入到板框过滤机中过滤，

滤液流到水箱中，由电子天平处称量。

四、实验步骤

1、实验准备

(1) 配料：在配料罐内配制含 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CaCO_3) 10%~30% (wt, %) 的水悬浮液；

(2) 搅拌：开启搅拌电机，设置搅拌速度，使浆液保持浑浊状态。

(3) 装板框：正确装好滤板、滤框及滤布。滤布使用前用水浸湿，滤布要绷紧，不能起皱。滤布紧贴滤板，密封垫贴紧滤布。（注意：用螺旋压紧时，千万不要把手指压伤，先慢慢转动手轮使板框合上，然后再压紧）。

(4) 灌料：启动浆液泵，打开入口阀，将浆液灌入板框过滤机中。

2、过滤过程

(1) 设定压力：通过控制面板设置过滤过滤压力（调节阀门14，过滤初始阶段压力可能不稳定，可先关闭阀门14，待压力变化范围不大时再调节）。

(2) 过滤：将中间双面板下通孔切换阀开到通孔通路状态。打开进板框前料液进口的两个阀门，打开出板框后清液出口球阀。此时，压力表指示过滤压力，清液出口流出滤液。

(3) 每次实验应在滤液从汇集管刚流出的时候作为开始时刻，启动秒表，记录相应的过滤时间 τ 、液体高度 h 及电子天平读数；测量8~10个读数即可停止实验。若欲得到干而厚的滤饼，则应每个压力下做到没有清液流出为止。

(4) 一个压力下的实验完成后，关上泵。卸下滤框、滤板、滤布进行清洗，清洗时滤布不要折。每次滤液及滤饼均收集在小桶内，滤饼弄细后重新倒入料浆桶内搅拌配料，进入下一个压力实验。注意若水不足，可补充一定水源。

3、实验结束

(1) 先关闭过滤机出口阀，关闭浆液泵电源。

(2) 卸下滤框、滤板、滤布进行清洗，清洗时滤布不要折。

五、实验报告

1、原始数据记录

板框过滤机基本参数：过滤面积 $A=0.0245\text{m}^2$ ，滤液池为 $0.23\text{m} \times 0.23\text{m} \times$

0.3m、带高度标尺的透明有机玻璃水池。实验温度大约为 30℃，该温度下水的密度为 $\rho = 995.7\text{kg/m}^3$ 。

表 1:试验参数记录

序号	0.05MPa			0.1MPa		
	h(mm)	重量(kg)	τ (s)	h(mm)	重量(kg)	τ (s)
1	10	0.542	74	10	0.541	28
2	18	0.966	164	19	0.975	59
3	24	1.258	247	24	1.278	85
4	28	1.481	302	29	1.519	111
5	30	1.619	338	32	1.699	131
6	32	1.724	370	35	1.857	150
7	35	1.839	391	38	1.981	164
8	39	2.056	413	41	2.160	188
9	39	2.061	433	43	2.250	201

2、试验数据处理

根据原始实验数据及相关参数，计算出初步试验结果如下表：

表 2:0.05Mpa 试验初步计算结果记录

序号	$\Delta \tau / s$	V	$\Delta V / m^3$	Δq	$\Delta \tau / \Delta q$	q_n	$(q_n)^{-}$
1	74	0.00054	0.00054	0.022489	3358.462	0.02203	0.01102
2	90	0.000962	0.000422	0.017599	5222.951	0.03927	0.03065
3	83	0.001253	0.000291	0.012107	5995.714	0.05113	0.0452
4	55	0.001474	0.000221	0.009228	6384.375	0.06017	0.05565
5	36	0.001612	0.000138	0.005758	6372.002	0.06581	0.06299
6	32	0.001717	0.000104	0.004349	6852.001	0.07007	0.06794
7	21	0.001831	0.000114	0.004757	7025.263	0.07473	0.0724
8	22	0.002047	0.000217	0.009024	7088.001	0.08357	0.07915
9	20	0.002052	4.9E-06	0.000204	7266.667	0.08377	0.08367

表 3:0.1Mpa 试验初步计算结果记录

序号	$\Delta \tau / s$	V	$\Delta V / m^3$	Δq	$\Delta \tau / \Delta q$	q_n	\bar{q}_n
1	28	0.00054	0.00054	0.022175	1262.675	0.022175	0.011088
2	31	0.00098	0.00044	0.017797	1741.905	0.039972	0.031073
3	26	0.00128	0.00030	0.012429	2091.818	0.052401	0.046186
4	26	0.00153	0.00024	0.009887	2629.714	0.062288	0.057345
5	20	0.00171	0.00018	0.007345	2723.077	0.069633	0.06596
6	19	0.00187	0.00016	0.006497	2924.348	0.07613	0.072881
7	14	0.00199	0.00012	0.005085	2753.333	0.081215	0.078672

8	24	0.00217	0.00018	0.007345	3267.692	0.088559	0.084887
9	13	0.00226	0.00009	0.003672	3539.968	0.092232	0.090395

3、初步计算示例

以 0.05MPa 下的第一组数据为例，计算过程如下：

$$\Delta \tau_1 = \tau_1 - \tau_0 = 74\text{s};$$

$$V_1 = m / \rho = 0.542 / 1000 / 995.7 = 0.00054\text{m}^3;$$

$$\Delta V_1 = V_1 - V_0 = 0.00054\text{m}^3$$

$$\Delta q = \Delta V_1 / A = 0.00054 / 0.0245 = 0.022489\text{m}^3 / \text{m}^2;$$

$$\Delta \tau / \Delta q = 74 / 0.022034 = 3358.462\text{s/m};$$

$$q_1 = V_1 / A = 0.00054 / 0.0245 = 0.022034 \text{ m}^3 / \text{m}^2;$$

$$\bar{q}_1 = (q_1 + q_0) / 2 = 0.011017 \text{ m}^3 / \text{m}^2;$$

其他数据按照上述公式计算，计算结果已列入表 2、表 3 中。

4、两种压差下的 $\Delta \tau / \Delta q \sim \bar{q}$ 关系曲线

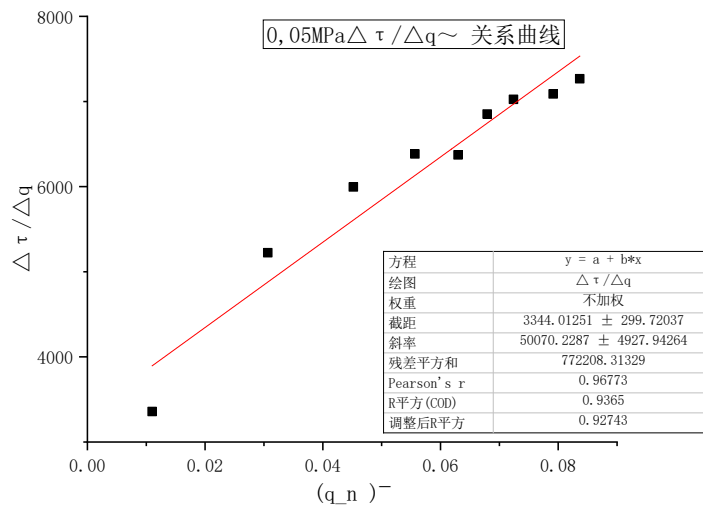


图 2 $\Delta \tau / \Delta q \sim \bar{q}$ 关系曲线 (P=0.05MPa)

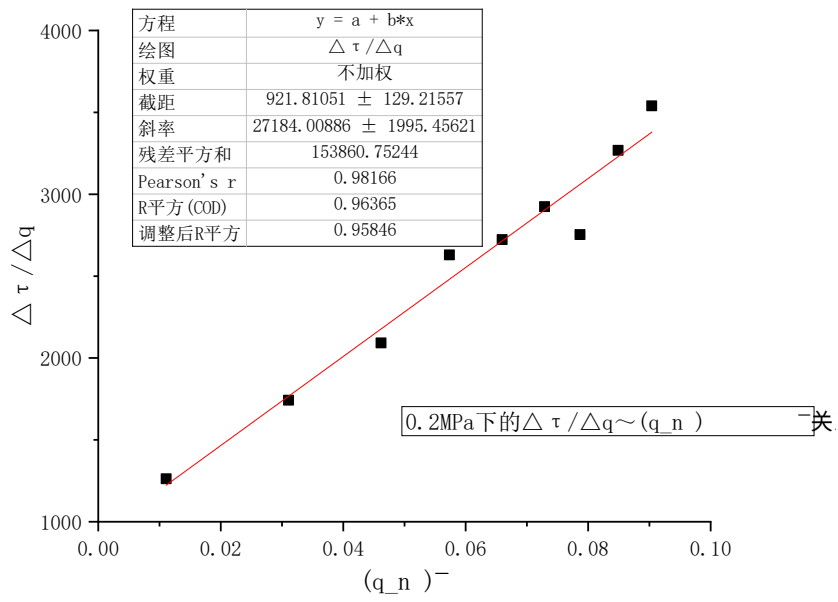


图3 $\Delta\tau/\Delta q \sim \bar{q}$ 关系曲线 (P=0.1MPa)

根据公式 $\frac{\Delta\tau}{\Delta q} = \frac{1}{K}\bar{q} + \frac{2}{K}q_e$ 、 $\tau_e = \frac{q_e^2}{K}$ 得:

表3 两种压差下的K、 q_e 、 τ_e 值

压差/MPa	1/K	$\frac{2}{K}q_e$	K/ m. s ⁻¹	$q_e / m^3 \cdot m^{-2}$	τ_e / s
0.05	50070	3334	1.9972E-05	0.066586779	222.0003196
0.1	27184	921	3.67863E-05	0.033880224	31.20368599

5、滤饼压缩性指数 S 的求取

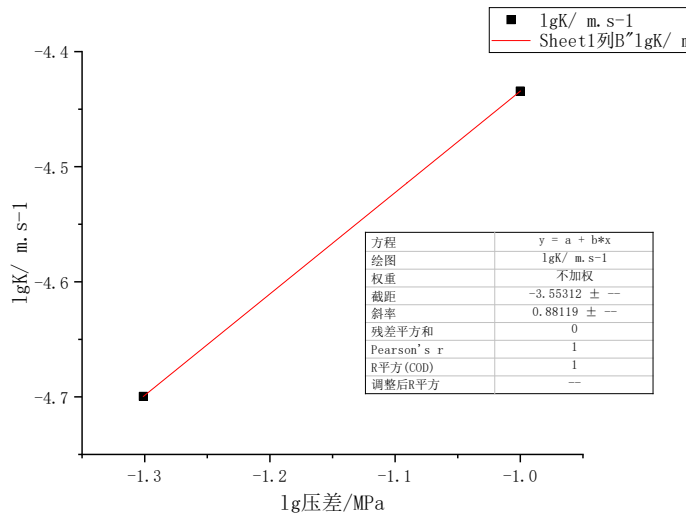


图 4 $lgK \sim lg\Delta P$ 曲线

由图 4 斜率为 0.88119 根据公式： $\lg K = (1 - s)\lg(\Delta p) + B$ 带入 0.05MPa 和 0.1MPa；可知， $S=1-0.88402=0.11811$ ；熟石灰滤饼压缩性指数 S 很小，该滤饼不可压缩。

3、实验结果分析与讨论

(1) 从试验及计算数据可以看出，在同一压力的恒压过滤中，得到相同滤液量的时间间隔随过滤的进行而不断增加；又从表 2、图 3 数据中得出，同一压力下， $\Delta \tau / \Delta q$ 随过滤时间的增加而增大。表明了过滤速度 $dq/d\tau$ 随过滤时间的增加而降低。这是由于在恒压过滤过程中，由于过滤压力和过滤介质阻力都不变，影响过滤速度的主要因素是滤饼阻力。滤饼会随着过滤的进行而增厚，从而使滤饼阻力的不断增加，最终导致了过滤速度随过滤时间的降低。

(2) 从试验及计算的数据可以得出，不同的过滤压力下，得到同体积滤液量的过滤时间不相同，而且，过滤压力较大其过滤相同滤液量的时间较小，也就是其过滤速率较大。从图 2 和图 3 的比较中也可以发现，图 3 直线的倾斜要比图 2 直线的倾斜度要小。表明了过滤速率随过滤推动力的增加而增加。过滤推动力是影响过滤速率的因素之一。两次实验的过滤介质均为碳酸镁悬浮液，单位厚度滤饼层的阻力可以看作恒定，两次实验滤饼阻力的增加速率可以看作相等，即两次实验只改变了过滤压力这一因素。所以得出过滤压力越大，过滤速率也会越大。

六、思考题

1、影响过滤速率的因素有哪些？

答：影响过滤速率的因素有：过滤推动力、过滤阻力。过滤速率与两者的关系为： $\frac{dV}{d\tau} = \frac{A^2 \Delta p^{1-s}}{\mu r v (V+V_e)}$ $\frac{1}{r} = \frac{\varepsilon^3}{s a^2 (1-\varepsilon)^2}$ ，由此可得，影响过滤的因素有 A 过滤面积 s 压缩指数 a 比表面积 v 单位滤液所得体积 ε 空隙率 ΔP 两边压差。

2、 Δq 取大些好还是取小些好？同一次实验， Δq 取的值不同，得出的 K 、 q_e 值会否不同？

答： Δq 取的大，则实验数据的精确性便会相对较低；若取的小，则容易引起误差。所以应通过实验测出最适的 Δq 取值。 Δq 取的值不同，所画的 $\Delta \tau / \Delta q - q$ 直线的取点并不一样，即所画得的直线不一样，所以得出的 K 、 q_e 值不同。

3、过滤压力增大一倍，得到同一滤液量的时间是否会减半？为什么？

答：过滤压力增大一倍时，要得到同一滤液量的时间理论上会减半。但是考虑到滤饼的可压缩性，还有过滤系统在实验过程之中的管路阻力，以及操作时候的带入的误差，实际上很难做到，过滤时间减半。

附：正交实验法实验方案

实验目的：用正交实验法安排实验，最大限度地减少实验工作量。对正交

实验法的实验结果进行科学的分析，分析出每个因素重要性的大小，指出实验指标随各因素变化的趋势，了解适宜操作条件的确定方法。

本次实验选取了料浆浓度、过滤压差、过滤介质、过滤温度四个因素，由于四组因素互不干扰，可做分组实验。

表 1 正交实验的因素和水平

序号	压强差 $\Delta P/\text{MPa}$	过滤温度 $t/^\circ\text{C}$	滤浆浓度 C	过滤介质 M
1	0.2	室温 25.0 $^\circ\text{C}$	10%	碳酸钙
2	0.4	35.0 $^\circ\text{C}$	20%	镁粉
3	0.6		30%	
4	0.8		40%	

表 2 使用正交表的正交实验数据表

列号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
序号	C	ΔP	E	t	M	E	E	E	E
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	1	2	1	2
3	1	3	3	1	2	2	2	2	1
4	1	4	4	2	1	2	1	2	2
5	2	1	2	1	1	2	2	2	2
6	2	2	1	2	2	2	1	2	1
7	2	3	4	1	2	1	1	1	2
8	2	4	3	2	1	1	2	1	1
9	3	1	3	2	2	1	1	2	2
10	3	2	4	1	1	1	2	2	1
11	3	3	1	2	1	2	2	1	2
12	3	4	2	1	2	2	1	1	1
13	4	1	4	2	2	2	2	1	1
14	4	2	3	1	1	2	1	1	2
15	4	3	2	2	1	1	1	2	1
16	4	4	1	1	2	1	2	2	2

由于实验工作量较大，为保证实验顺利进行，建议分组进行实验，根据浆液浓度的不同，将人员分为四组，每组做一个浆液浓度的实验；或者将人员分为八组，每组做一个物料的一个浆液浓度的实验。