

表 14.11 Nuclepore™ 孔径迹微过滤膜的典型特性

指定孔径 μm	孔径范围 μm	公称孔密度 孔/ cm^2	公称膜厚度 μm	在 $10\text{lb}/\text{in}^2 \Delta P$ 和 70°F 下的典型速率
				水 $\text{gal}/(\text{min})(\text{ft}^2)$
8.0	6.9~8.0	1×10^5	8.0	144.0
5.0	4.3~5.0	4×10^5	8.6	148.0
3.0	2.5~3.0	2×10^6	11.0	121.0
1.0	0.8~1.0	2×10^7	11.5	67.5
0.8	0.64~0.80	3×10^7	11.6	48.3
0.6	0.48~0.60	3×10^7	11.6	16.3
0.4	0.32~0.40	1×10^8	11.6	17.0
0.2	0.16~0.20	3×10^8	12.0	3.1
0.1	0.08~0.10	3×10^8	5.3	1.9
0.08	0.064~0.080	3×10^8	5.4	0.37
0.05	0.040~0.050	6×10^8	5.4	1.12
0.03	0.024~0.030	6×10^8	5.4	0.006

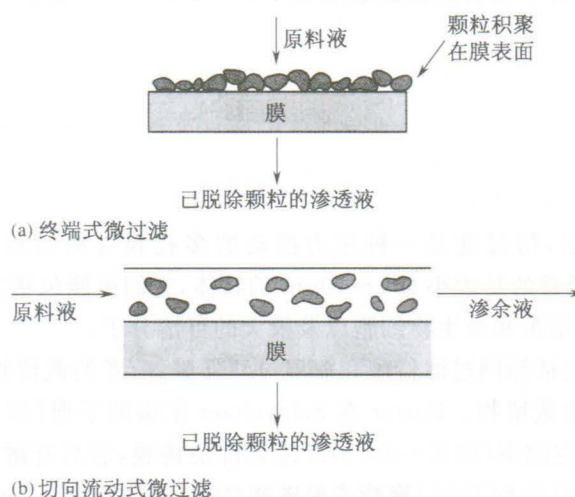


图 14.32 超过滤的普通操作模式

在切向流(错流)微过滤模式(TFF)中,原料液沿膜表面流动,仅其中的部分溶剂通过膜,该模式更适用于大规模连续微过滤。理想情况是已截留的物料被渗余物流带离微过滤器,切向流模式通常伴有大量渗余物循环,与连续进料和排放的超过滤相似,原料-渗余物侧平行于膜表面的切向流速度的典型值是 $3 \sim 25 \text{ ft/s}$ 。切向流模式几乎唯一地用于反渗透和超过滤。这已于节 14.5 和节 14.8 中作了讨论。改善切向流过滤(TFF)的有意义的工作使其演变成高性能切向流过滤(HPTFF),用于分离大分子组分,在 Van Reis 等[53]的研究中,应用 HPTFF 分离分子量接近的蛋白质,在得率和提纯因子方面得到显著改善,在那里对膜孔尺寸分布、膜化学(膜材料与溶质间的静电作用)、为控制溶液 pH 以得到适当的静电位而使用的溶液缓冲剂、流体动力学(包括错流速度和膜两侧的压力)和级数进行了最佳化。

微过滤的膜组件主要是 DEF 的板框式和 TFF 的褶皱式,后者将已褶皱的膜包卷在通透的芯管上。许多组件形式是廉价和一次性使用的,一个典型的一次性使用的过滤芯直径

2.5 in. ,长 10 in. ,具有膜面积 3 ft² ,过滤芯中可以包括一个用来除去大颗粒的预过滤器,使多孔微过滤膜用于所需要的分离,从而延长过滤芯的使用寿命。与 TFF 相比,DEF 具有投资低、操作费用高和操作简单的特点,它特别适用于稀溶液,而 TFF 则宜用于浓溶液。

用于计算超过滤的那些方程同样适用于计算 TFF 微过滤,这包括分批式、连续进料和排放式及重过滤操作模式的。计算 DEF 微过滤的方程是那些用于普通固-液浆料过滤(常被称为滤饼过滤)的方程,它们的推导于下:此处仅考虑膜的阻力和截留于膜表面的滤饼(颗粒层)阻力,在膜内部的任何沉淀物都被忽略,如同微过滤中渗透压总是被忽略一样,由于溶质都是大分子量的。

在任一瞬间,体积渗透速率 J 是

$$J = \frac{1}{A_M} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu(R_m + R_c)} \quad (14-99)$$

式中

Δp ——穿过滤饼和膜的压降;

μ ——渗透液黏度;

R_m 和 R_c ——分别为膜和滤饼对渗透液的阻力;

V ——渗透液体积;

A_M ——膜面积。

假设膜的阻力是常数,滤饼可以作为颗粒填充床,对此可以应用图 6.37 所示的 Ergun 关联式,在典型的流过滤饼的低雷诺数区间,压降由 Kozeny - Carman 方程控制,滤饼阻力为

$$R_c = \frac{150l_c(1-\epsilon_c)^2}{D_p^2\epsilon_c^3} = K_1 \frac{l_c(1-\epsilon_c)^2}{\epsilon_c^3} \quad (14-100)$$

式中

l_c ——滤饼厚度,随时间增加;

ϵ_c ——滤饼空隙率;

D_p ——滤饼中颗粒的有效直径;

K_1 ——特定过滤系统的实验常数。

原料中将被截留成滤饼的固体物料 m_c 为

$$m_c = c_F V = \rho_c(1-\epsilon_c)A_M l_c \quad (14-101)$$

式中 c_F = 单位体积原料液中固体物料量。

将式(14-101)代入式(14-100)消去 l_c ,在将所得的 R_c 方程代入式(14-99)得

$$J = \frac{1}{A_M} \frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p}{\mu \left[R_m + K_1 \frac{c_F V(1-\epsilon_c)}{\rho_c A_M \epsilon_c^3} \right]} = \frac{\Delta p}{\mu \left[R_m + K_2 \frac{c_F V}{A_M} \right]} \quad (14-102)$$

式中 K_2 ——特定过滤系统的实验常数。

恒速率操作

对于恒定渗透速率 J 和相应的恒定渗透物体积流量的操作,由于滤饼的增厚,压降将随时间增大。式(14-102)中的 $dV/dt = V/t$,在 $t=0$ 时 $V=0$,压降随时间的变化由下式给出:

$$\Delta p = J\mu[R_m + K_2 c_F J t] \quad (14-103)$$

开始时, 压降仅取决于膜阻力, 即 $\Delta p = J\mu R_m$, 此后因滤饼厚度增加而随时间线性变化。

恒压操作

对于恒压降操作, 渗透物流量和相应的渗透速率将随时间而减小, 因为滤饼的厚度随时间而增加。对于这种操作, 将式(14-102)积分:

$$\int_0^V \left[R_m + K_2 \frac{c_F V}{A_M} \right] dV = \frac{A_M \Delta p}{\mu} \int_0^t dt \quad (14-104)$$

式(14-104)积分得:

$$R_m V + \frac{K_2 c_F V^2}{2A_M} = \frac{A_M \Delta p t}{\mu} \quad (14-105)$$

式(14-105)是 V 的二次方程, 解得的正根是:

$$V = -\frac{R_m A_M}{K_2 c_F} + \frac{A_M}{K_2 c_F} \left[R_m^2 + \frac{2K_2 c_F \Delta p t}{\mu} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14-106)$$

对式(14-106)微分得到渗透速率

$$\frac{1}{A_M} \frac{dV}{dt} = J = \frac{\Delta p}{\mu} \left[R_m^2 + \frac{2K_2 c_F \Delta p t}{\mu} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (14-107)$$

组合操作

如前面提到的, 采用组合操作能改善得率, 组合操作中(1)在第一阶段采用恒速率操作, 直至压降极限值。接着(2)第二阶段进行恒压操作, 直至达到最小速率为止。令 V_{CF} = 在用时间 t_{CF} 的第一阶段中得到的渗透液体积, 由于是恒渗透速率,

$$V_{CF} = J A_M t_{CF} \quad (14-108)$$

令 Δp_{UL} = 通过滤饼和膜的压降上限。于是对于恒压操作的第二阶段式(14-104)变为

$$\int_{V_{CF}}^V \left[R_m + K_2 \frac{c_F V}{A_M} \right] dV = \frac{A_M \Delta p_{UL}}{\mu} \int_{t_{CF}}^t dt \quad (14-109)$$

上式积分得到 V 的二次方程, 求解此方程得到 V 的正根:

$$V = -\frac{R_m A_M}{K_2 c_F} + \left[\frac{A_M^2 R_m^2}{K_2^2 c_F^2} + \frac{2A_M}{K_2 c_F} \times \left(R_m V_{CF} + \frac{K_2 c_F V_{CF}^2}{2A_M} + \frac{A_M \Delta p_{UL} (t - t_{CF})}{\mu} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (14-110)$$

此处 $V - V_{CF}$ 为时间从 t_{CF} 到 t 的第二阶段中得到的渗透物体积。

将式(14-102)中左端渗透速率定义和中间部分用到式(14-110)得到以下渗透速率式, 由此式可见, 在第二阶段, 渗透物速率随时间而减小。

$$J = \frac{A_M \Delta p_{UL}}{K_2 c_F \mu} \left[\frac{A_M^2 R_m^2}{K_2^2 c_F^2} + \frac{2A_M}{K_2 c_F} \times \left(R_m V_{CF} + \frac{K_2 c_F V_{CF}^2}{2A_M} + \frac{A_M \Delta p_{UL} (t - t_{CF})}{\mu} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (14-111)$$

组合操作的上述方程的应用将于下例中示明。

例 14.15

需对含蛋白质浓度 4.3g/L 的稀释脱脂奶进行微过滤,采用醋酸纤维素膜作了实验,该膜的平均孔径为 $0.45\mu\text{m}$,膜面积是 17.3 cm^2 。对于恒定渗透液流量 15 mL/min 的第一阶段操作,通过滤饼和膜的压降在 400 秒内从 0.3 psia 增加到 20 psia ,渗透液的黏度是 1 cP 。如果操作继续进入恒定压降上限的第二阶段操作,直至渗透液流量降到 5 mL/min 时为止。计算需要增加的时间,并分别标绘渗透液体积 mL 和渗透速率 $\text{mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 与时间 s 间的关系曲线。

解

采用 SI 制, $c_F = 4.3\text{ kg/m}^3$, $A_M = 0.00173\text{ m}^2$, 第一阶段的体积流量 $= 0.25 \times 10^{-6}\text{ m}^3/\text{s}$, 在 $t=0$ 时, $p = 2068\text{ Pa}$, 在 $t=400\text{ s}$ 时, $p = 137900\text{ Pa}$, $\mu = 0.001\text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。根据第一阶段的实验数据,计算 R_m 和 K_2 于下:

从式(14-103)得

$$R_m = \frac{(t=0 \text{ 时的 } \Delta p)}{J\mu} = \frac{2068}{\left(\frac{0.25 \times 10^{-6}}{0.00173}\right) \times 0.001}$$

$$= 1.43 \times 10^{10}\text{ m}^{-1}$$

在 $t=400\text{ s}$ 时

$$K_2 = \frac{\Delta p - J\mu R_m}{J^2 \mu c_F t} = \frac{\Delta p - (\Delta p \text{ 在 } t=0)}{J^2 \mu c_F t}$$

$$= \frac{6895 \times (20 - 0.3)}{\left(\frac{0.25 \times 10^{-6}}{0.00173}\right)^2 \times 0.001 \times 4.3 \times 400} = 3.78 \times 10^{12}\text{ m/kg}$$

假设 R_m 和 K_2 值在第二阶段不变,在第二阶段末,渗透速率 $= J = (5\text{ mL/min}) / (17.3\text{ cm}^2) = 0.289\text{ mL}/(\text{min} \cdot \text{cm}^2) = 4.82 \times 10^{-5}\text{ m/s}$ 。

由式(14-111)解得 $t = 2025\text{ s}$, 渗透液体积和渗透速率对时间的标绘示于图 14.33 和图 14.34 中,它们的数据是应用电子数据表求解第二阶段的时间函数式(14-110)和式(14-111)得到的。

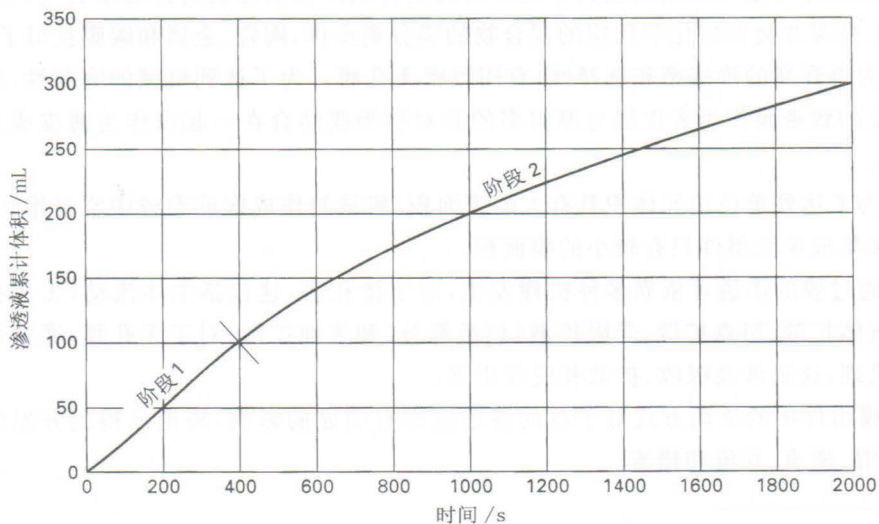


图 14.33 例 14.15 的渗透液累计体积

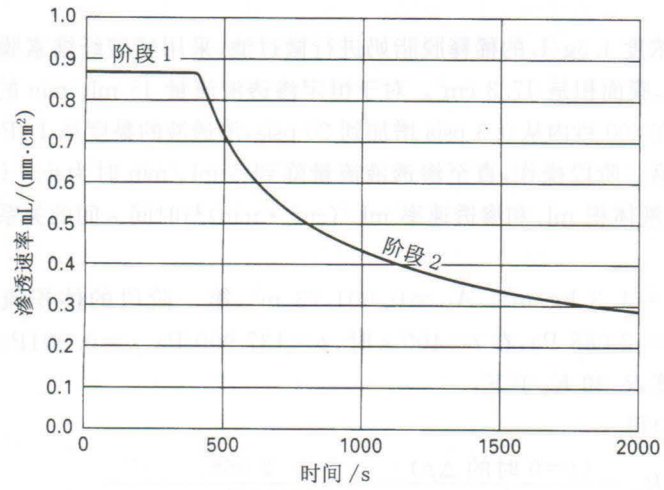


图 14.34 例 14.15 的瞬间渗透速率