



超 滤

吴 琼 发

(中国科学院微生物研究所, 北京)

前 言

超滤是近年日益引人注目和采用的生化分离技术之一。它的优点是: 操作简便易掌握; 操作中既无相的变化和离子状态的变化, 又无温度的变化。

超滤在实验室方面的应用有:

1. 浓缩被膜截留的大溶质, 如蛋白质、核酸、酶、激素、病毒或其他不稳定的生物高聚物。
2. 分离出透过膜的小溶质, 这包括:
 - (1) 脱盐或交换盐(如缓冲液)。
 - (2) 除去未和蛋白质结合的钙离子或某种药物; 除去生物制品中的热原。
 - (3) 滤取酶解液(如蛋白质、淀粉、纤维素等的酶解液)中的低分子量物质(如肽、糖); 滤取生物材料(如脾脏组织)中的转移因子。
3. 分级分离混合溶液中的大溶质。
4. 滤除生化试剂溶液、化学溶剂中的污染物。

原 理

超滤技术是薄膜加压分离技术的一种。它利用一定的压力, 强使溶液通过有选择渗透性的聚合膜(按分子量大小标定), 从而把分子量比较大的溶质和分子量较为小的溶质(包括溶剂、盐类、糖类及氨基酸)分开。这就是超滤的工作原理(图 1)。

把膜的平均孔径和操作压力加以排列比较(图 2), 可看出超滤与反渗透、微孔过滤的区

别。超滤是借助不很高的操作压力(5—100 磅/平方英寸)和大孔径(10—500 埃)的膜进行分离大分子量的溶质; 反渗透是用相当高的操作压力(500—2000 磅/平方英寸)和小孔径(10 埃以下)的膜分离小分子量的溶质(图 3); 微孔过滤则是用相当低的操作压力(通常在 5 磅/平方英寸以下)和更大孔径(500 埃至 14 微米)的膜分离微粒(图 4)。

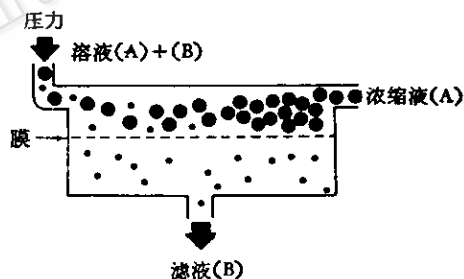


图 1 超滤示意图

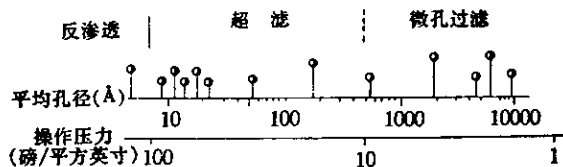


图 2 超滤、反渗透与微孔过滤的区别

“表层”超滤膜

目前在超滤时最有效的膜是“表层”超滤膜(图 5)。它由很薄的表层(0.1 微米或以下)和比较厚且多孔的基层(200—250 微米)紧密粘合而成。表层起超滤作用, 基层则起支撑、增强

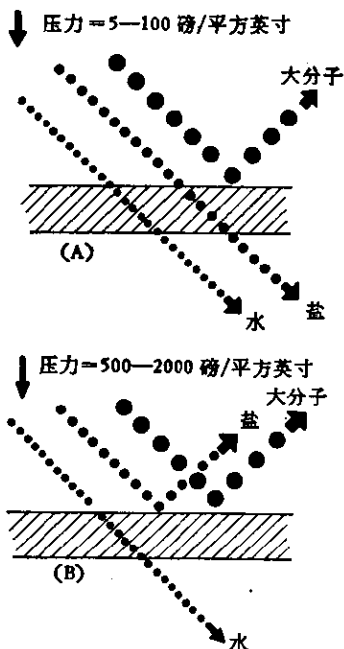


图3 超滤(A)与反渗透(B)的比较(示意图)

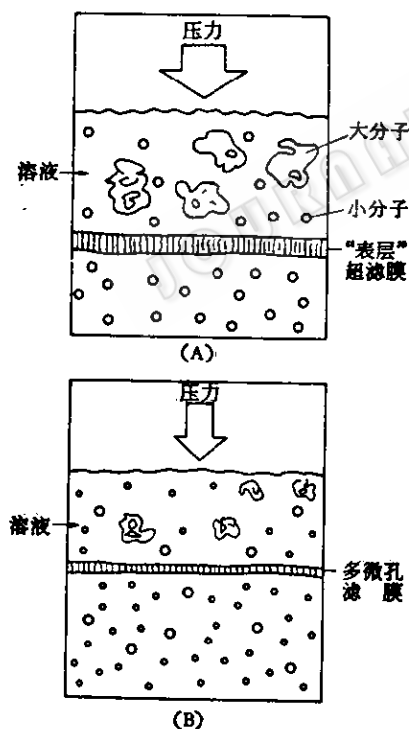


图4 超滤(A)与微孔过滤(B)的比较(示意图)

抗压的作用。表层的位置在膜的最上层,面向溶液。由于表层结构致密,所以能够阻留分子,

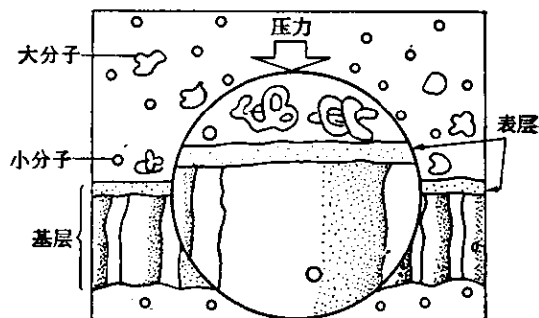


图5 “表层”超滤膜结构示意图

同时由于表层很薄(典型的少于2微米),可使因致密结构所产生的流动阻力减少到最低限度。也由于表层之下有非常多的具孔基层支撑,所以流率相当高。因为这两层的结构不同,被阻留的分子总是留在膜表面上,而不会进入基层,所以这种超滤膜不会造成堵塞。

反渗透所用的膜,其表层结构更为致密,而多微孔过滤用的膜,其结构则是疏松的,孔径最小的一种多微孔膜可截留大分子(如病毒),因此可作为某种超滤膜使用。

超滤系统及装置

超滤系统及装置有如下几种类型:

1. 封闭系统无搅拌式与搅拌式装置(图6)。
2. 浅道系统超滤装置(图7)。
3. 中空纤维系统超滤装置(图8)。

上述各系统及装置的规格、性能、用途等,详见表1—3。

无搅拌系统中,膜的有效使用面积较小,操作压力较大。因不搅拌,浓度极化严重,故标准流量小。搅拌系统中,如室式搅拌,因有较强的搅拌,超滤速率相当高,浓缩大溶质分子可使其浓度达5%。浅道系统可使液体在浅道中形成湍流,产生带有剪力但又稳定的层流,使浓度极化限制在最低,以维持相当高的超滤速率,可使大溶质分子溶液浓度浓缩达4%。中空纤维系统因有坚实的微管型膜,故表面与体积的比率极大,超滤速率很高,阻留大溶质分子的浓度大于0.4%,小于20%。

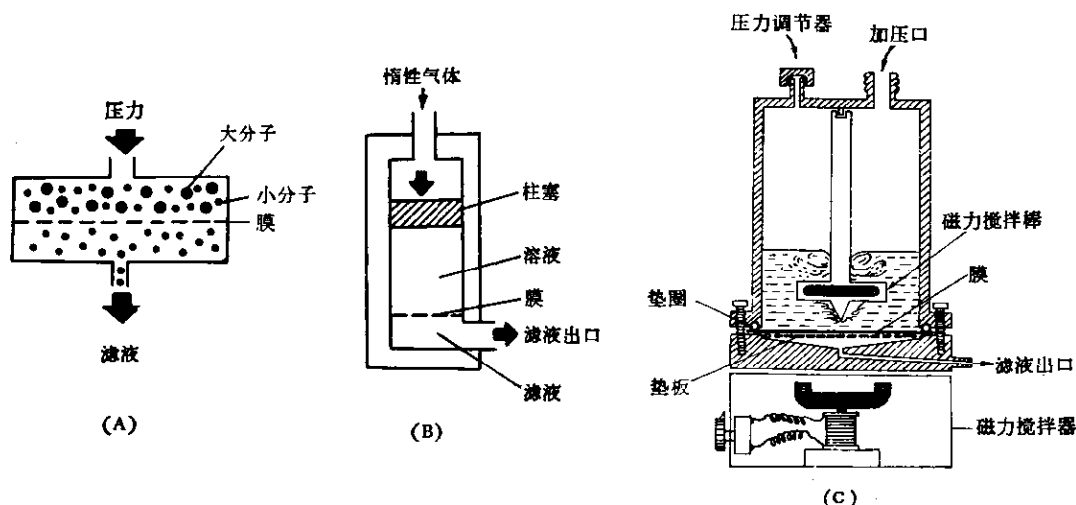


图 6 封闭系统超滤示意图

A: 超滤过程; B: 无搅拌式装置; C: 搅拌式超滤器

表 1 几种实验室超滤装置的规格及其用途

过滤系统	商品型号	处理容量(毫升)		处理浓度(%)		滤膜规格		用 途	备 注
		最低	最高	最初最低	最终最高	直径(微米)	面积(平方厘米)		
搅拌型	12 型	1.0	10	0.05	5	25	3.6	适用于大溶质分子的浓缩及除盐,如处理蛋白质、多肽、多糖,或血液组分、脊髓液、尿及其它体液的处理。	使用 MT2 搅拌台,滤室用化学药剂灭菌;有的滤室可高压灭菌;低温操作。
	52 型	2.5	65			43	12.5		
	202 型	5.0	200			62	27.5		
	402 型	10.0	400			76	39.2		
	2000 型	60.0	2000			150	162.0		
浅道系统	TCF 10	10.0	600	0.05	40	90	40.0	适用于大溶质混合液的分级分离,如处理生物制品、细胞材料的悬浮液、血清、糖浆、抽提液等;回收发酵液中的代谢产物;滤除细菌、病毒、热原。	用化学药剂灭菌;低温操作。
	TCE	300.0	1950			150	138—690	适用于处理血液组分,疫苗,类毒素;浓缩或除去病毒、细菌、聚合物;乳胶或其它胶体的脱水;培养基的澄清。	滤室可高压灭菌;低温操作。
	CEC 1	-	无限			90	43	色谱柱线型洗脱液的浓缩。	化学药剂灭菌,低温操作。
中空纤维	DC 2	100.0	2000	0.4	20	-	900	适用于浓缩及除盐,如处理酶、蛋白质、病毒、类毒素,浸出液,胶体产物等。	同 上
	CH 3	50.0	无限			-	900	同 上	
	DC 30	5000	无限			-	28×10 ⁵	适用于高效透析浓缩,快速处理大分子量的溶液,如血液组分,病毒,疫苗,酶,浸出液,药剂等。	
无搅拌型	10 PA	0.2	14	-	1	25	3.6	适用于浓缩少量稀的生物溶液(低于 1% 大溶质分子溶液)以及快速研究或分析临床样品。	低温操作。

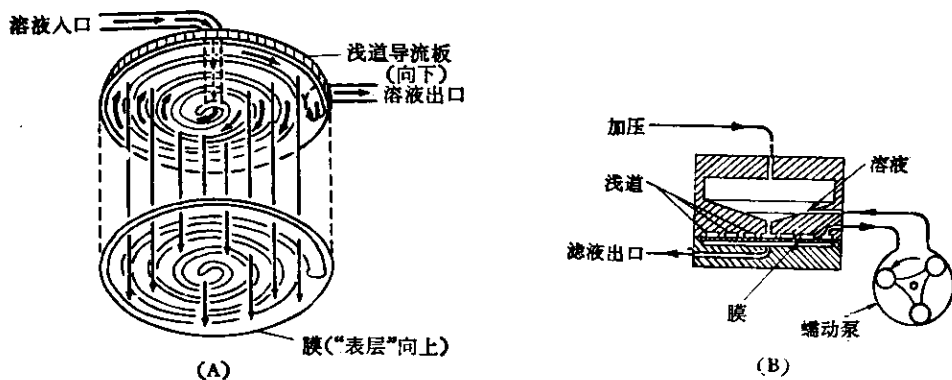


图7 浅道系统超滤示意图

A: 超滤过程 B: 超滤装置

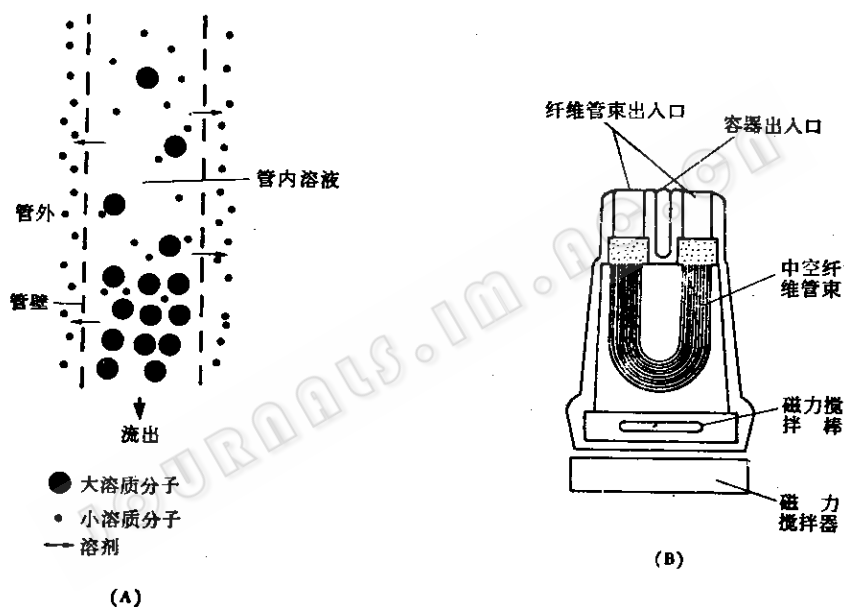


图8 中空纤维超滤示意图

A: 超滤过程 B: 中空纤维浓缩-透析仪

表2 各种超滤系统滤出液流量的比较*

系 统	膜 面 积 (平方厘米)	操作压力 (磅/平方英寸)	流 量 (毫升/分)	标 准 流 量 (毫升/分·厘米 ² ·磅英寸)
非搅拌型	3.4	70	0.05	0.0002
搅 拌 型	39	50	2.7	0.0014
浅 道 型	40	25	8.0	0.008
中空纤维	900	7**	50.0	0.007

* 超滤材料为1%牛白蛋白,用分子量规格为10000的膜截留。

** 平均的透膜压力。

表 3 影响膜性能的环境因子

膜 型 号	最高耐受温度 (°C)	灭 菌	禁 用 物**
UM	50	5% 甲醛, 75% 乙醇, 合格的灭菌气体混合物(环氧乙烷, 浓度不超过 20%)	>0.05M 的磷酸缓冲液, >10% 的 HCl 和 HNO ₃ , >5% 的其它酸类, >pH12 的碱; 和水不混溶的溶剂, >30% 的水可混溶溶剂, >0.5% 的酚, 强离子表面活性剂和去污剂(包括十二烷基磺酸钠)。
PM, HP	125	5% 甲醛, 70% 乙醇, 合格的灭菌气体混合物, (环氧乙烷, 浓度不超过 20%) 完全浸于缓冲液, 盐水或蒸馏水中高压灭菌*	>10% 的磷酸, 芳香烃及氯化烃, 酮类, 极性芳香族化合物, 脂肪族酯类, 二甲基甲酰胺(DMF), DMSO, m-pyrol 等。
XM, HX	50	5% 甲醛, 70% 以下的乙醇, 合格的灭菌气体混合物(环氧乙烷, 浓度不超过 20%)	丙酮, 乙腈, 环己酮, 糠醛, 硝基乙烷, 硝基甲烷, 环酮, 胺类, DMF。
DM	50	70% 以下的乙醇, 合格的灭菌气体混合物(环氧乙烷, 浓度不超过 20%)	强碱, 氨, 胍, DMF, DMSO, DMAC, m-pyrol。

* HIP 10, HIP 100 及 10P 100 型中空纤维管壳超滤器可高压灭菌; HIP8 及 H10 P8 型超滤器可高压灭菌, 但分子量的截留水平稍为增高; HIP5 及 H10 P5 型的不能高压灭菌。

** 超滤要使用溶剂时, 必须先查明膜的配伍性。

超滤的工作过程

在超滤过程中, 当发生浓度极化时, 就妨碍超滤的进行, 因此要对浓度极化过程有所了解, 才能掌握好这种方法。

未加压力前, 容器内的溶质分子的浓度和分布都是均匀的(图 9)。加压后, 溶剂及小溶质分子开始迅速运动通过膜, 不能通过膜的大分子就停留在膜的表面, 因为这些大溶质的分子量大, 所以扩散缓慢, 不能很快回到主体溶液中去, 于是在膜上成梯度积聚起来, 成为大溶质浓缩层。这个过程称为界面层的形成(图 10)。

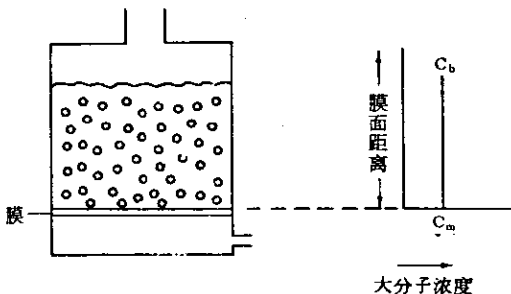


图 9 超滤前溶质分子的浓度及分布示意图

$C_b - C_m$ 曲线表示大溶质分子分布均匀

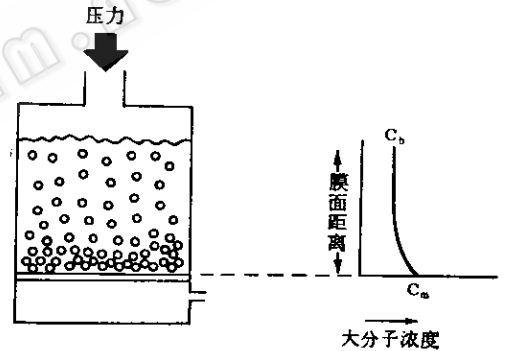


图 10 界面层形成的示意图

$C_b - C_m$ 曲线下方(接近膜面)表示界面层

界面层形成时, 究竟发生膜控制态过滤还是发生凝胶限制态过滤, 主要取决于溶质的扩散性。如有高度扩散性的细胞色素 C, 一般不会生成凝胶层, 此时影响滤液流率的是膜的渗透性与压力(图 11)。这就是膜控制状态过滤。

分子量或分子构象的不同, 影响溶质的扩散性, 因而影响凝胶形成和流率。一般说来, 比重轻的分子扩散快, 球形分子比相同分子量的线形分子更易扩散。图 12 中的原胶原(Tropocollagen) 分子为纤维状, 该溶质的浓度超过 1% 即生成凝胶, 而 γ -球蛋白在室温下溶解可达

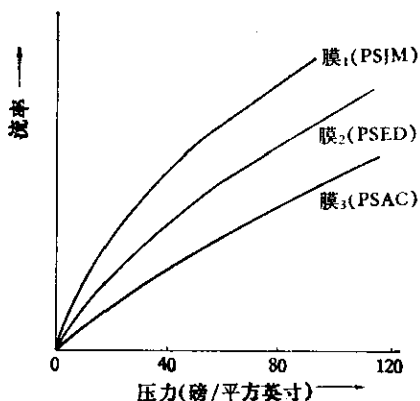


图 11 细胞色素C的膜控制态过滤时,膜的渗透性、压力与流率的关系

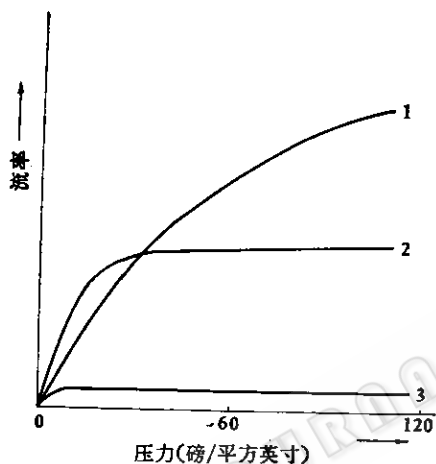


图 12 溶质的分子构象对流率的影响

1. γ -球蛋白(球形,分子量 160,000);
2. 蓝色葡聚糖(球形,分子量 2,000,000);
3. 原胶原(纤维形,分子量 320,000)

20% (重量计)。原胶原的分子量 (320,000) 约为后者的一倍多,但两者的扩散性却相差很大,故原胶原的滤液流率是后者滤液的 1/20。

在膜控制态过滤中,压力是影响流率的重要因素之一。以不同的压力进行简单的过滤试验,就可以确定一种溶质所表现的是凝胶控制态过滤还是膜控制态过滤,如图 12, γ -球蛋白的过滤是属于膜控制态过滤。

分子扩散性较差的溶质,在界面层内容易积聚,当压力升高,它就进一步浓缩,终于很快达到极限浓度,形成半固体状态的凝胶层。这种大溶质分子高度集中的现象称为大溶质分子的浓度极化(图 13)。当凝胶在整个膜表面迅

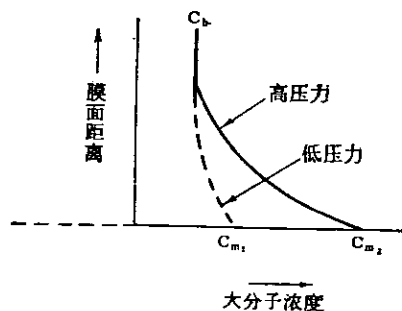


图 13 大溶质分子的浓度极化

$C_b - C_{m1}$ 示界面层形成, $C_b - C_{m2}$ 示凝胶层形成

速生成完整的涂层时(在几分钟之内),凝胶就成为滤液流率的限制因素,此时膜的界面层阻力不再影响流率,此种过滤状态称为凝胶限制态过滤。图 14 示用几种类型的膜过滤蓝色葡

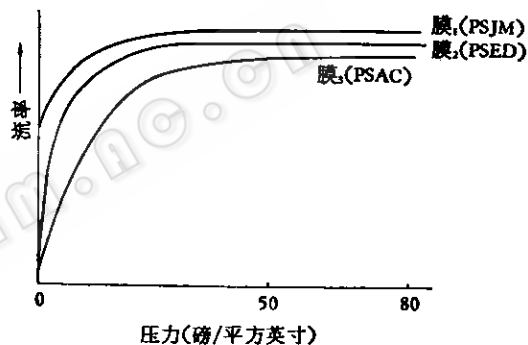


图 14 蓝色葡聚糖的凝胶态过滤

聚糖,当凝胶限制流动现象出现后,各该膜的滤液流率就进入极限水平,维持稳定状态,如压力再增高,流率并不增加,而只是暂时增进溶液向膜流动(图 15),有更多的溶质积聚,使凝胶层变得更厚,终于阻碍渗透,此时流率又再减慢到凝胶限制态的流率,终于使溶质沉积到凝胶层上的速率和溶质从凝胶流回主体溶液的速率相等,处于平衡状态。

凝胶层还起着一种过滤作用,可看作是扩大的超滤膜(或称次级膜),故溶质分子必须通过原来的聚合膜和后来形成的次级膜,才能进入滤液,因而降低溶剂的透过外,还妨碍正常可通过膜的大分子和较为小的溶质的通过。在大多数情况下,即使增高压力,溶质通过的百分率还是要下降的(图 16)。

为了降低凝胶的极化,就必须加大被阻留

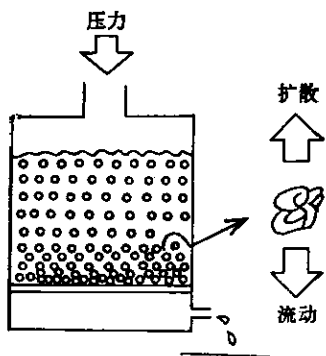


图 15 凝胶限制态过滤中,增加压力只暂时起增进溶质向膜流动的作用

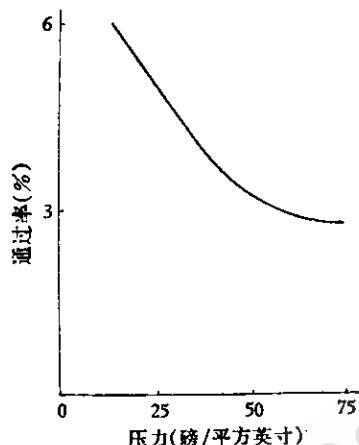


图 16 溶质通过率与压力之间的对应关系 (PSED 膜过滤 1% β -乳球蛋白)

的大溶质从界面层回到主体溶液的再分配速率,所以借助外力(如搅拌)来稳定再分配速率。在搅拌情况下,凝胶层的厚度虽可被剪力削减,但它并不消灭。尽管这样,一般仪器仍要采用机械搅拌,以便得到确实有效的流率(图 17)。

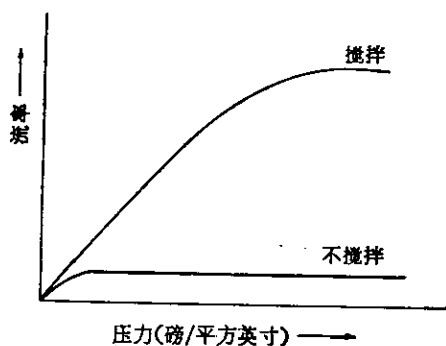


图 17 搅拌在凝胶限制态过滤中的作用

调控超滤的几个参数

影响超滤的因素如膜、压力、搅拌、溶质浓度、温度、离子环境等,必须加以调节和控制,才可增加流量。

一、膜

膜的渗透性对凝胶限制态过滤的流率无明显的影响,但对膜控制态过滤则有显著的影响。例如用两种膜比较浓缩大的免疫球蛋白(分子量 160,000—1,000,000)稀溶液,发现用额定分子量 100,000 的膜比额定分子量 10,000 的膜完成浓缩所需的时间减少大半。前者是一种疏松膜,比紧密膜的流率一般要高。实验证明免疫球蛋白并没有通过疏松的膜,因此疏松膜宜用于阻留不易形成凝胶的溶质,而且可让较为小的溶质通过,这一点对分级分离有实用意义。

二、压力

一般说,在超滤中增加压力也增加极化,同时也妨碍某些并不生成凝胶的大溶质通过,所以增加压力并不能成比例增加流量。对于高度扩散性分子的稀溶液的超滤,压力的效应是比较明显的,所以在超滤中运用压力,除要依据溶质分子扩散性和溶液浓度外,还要看溶质由于搅拌产生回流的速度及其产生凝胶的趋向。

三、搅拌

搅拌是有效地减低浓度极化并提高流率的措施之一。增加剪力(即增加搅拌)可使流率加快,在凝胶限制态过滤中的搅拌作用要比在膜控制态过滤中的作用更为明显(图 18)。一般说,增加搅拌的同时也增加压力是提高流率最有效的办法。

有些生物高分子(如酶),对于剪力很敏感,若采用搅拌提高流率,就要衡量搅拌所引起破坏的程度。

四、溶质浓度

有些溶液的超滤可用稀释的办法,既可减

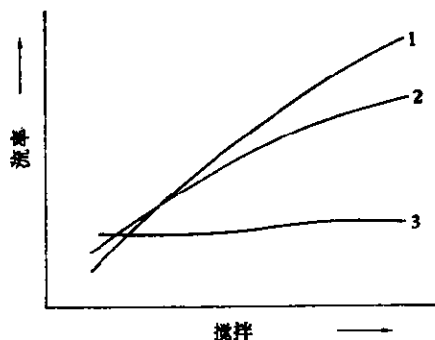


图 18 搅拌作用的比较

1. 凝胶限制态过滤(蓝色葡聚糖); 2. γ -球蛋白过滤; 3. 膜控制态过滤(细胞色素 C)。

低浓度极化,还可提高滤液流率,但会延长过滤时间。在同样压力下,截留浓度低的大分子的流率,往往比截留浓度高的大分子的流率要高(图 19),在恒定压力下,稀溶液浓缩到高浓度时,流率必然下降,所以要看溶质浓度的变化来确定如何使用压力。

五、温度

增温可使流量增加,但一增温就使溶质分子的溶解度、流动性和活性都增加,而溶液粘度则减少,这样就全面降低形成凝胶层的趋向。

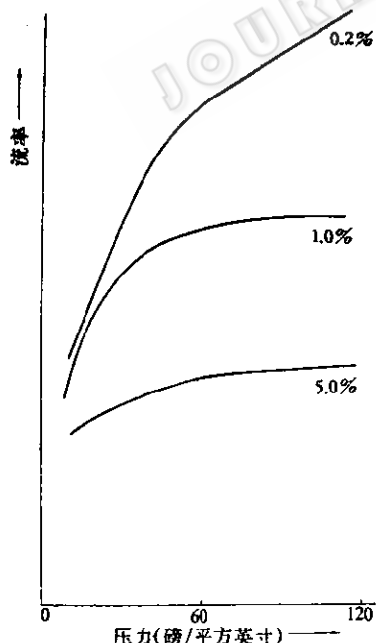


图 19 不同浓度的 7S-球蛋白在不同压力下的超滤过程

六、离子环境

溶液中分子的构象,常因围绕该分子的电荷密度及离子环境的变化而改变分子的扩散性及其形成凝胶的能力。pH 及离子强度的改变和缓冲液的种类都影响流率,因此必须对每个溶质-溶剂系统进行测定。一般说,使大分子的溶解度增加到最大限度就能提高流率,增加溶质的溶解度以减低溶质形成凝胶的倾向,或增加大分子的扩散,这都是增加流量的办法。例如将血清白蛋白溶液的 pH 由 5.2 (接近等电点或最低溶解度的 pH) 提高到 7.0,流量就加倍。

超滤膜与超滤装置的选择

一、滤膜的选择

主要从额定截留水平(nominal cut-off level)和流率两方面考虑。

(一) 额定截留水平

额定截留水平以额定分子量范围 (nominal molecular weight limit, nmwl) 表示。每种超滤膜都有指明的额定分子量范围,表示在这个分子量上下(以球形溶质分子计)的大多数(99%)的溶质分子都为膜所截留。因此,要最大限度地截留一种已知分子量溶质分子时,最好选择额定分子量范围稍低于该溶质分子的滤膜(参阅表 4 和表 5)。再如 Millipore 厂的商品膜“Pellicon”,是一种上层由极薄的非纤维素聚合膜,下层为较厚的多孔纤维素。其中 PSAC, PSED, PSJM 三种型号的膜,额定分子量范围分别为 1000, 25000, 和 100000。

(二) 流率

流率受许多因素影响,如大溶质分子的类型、溶解度、扩散性,溶质浓度,膜类型与表面积,一定的压力,流体剪力,离子环境以及影响溶液粘度的温度。由于各种因素的复杂性,某种溶质的绝对流速是不易测出的,所以一般只以无离子水的流速作为表示膜渗透性的尺度(见表 3)。

(三) 环境因子

溶剂的成分、温度、灭菌过程等(见表 3),

表 4 Diaflo 超滤膜的种类与性质*

膜 型 号	额定截留水平 (nmwl)	表面孔径 (埃)	去离子水的流率** (毫升/平方厘米/分)	使用温度 范围及 pH	制 膜 材 料***
UM 05	500	21	0.02—0.04	50℃ pH2—12	聚合电解质复合物
UM 2	1,000	24	0.04—0.08		
UM 10	10,000	30	0.1—0.3		
PM 10	10,000	38	1—4	115℃ pH0—14	聚砜
PM 30	30,000	47	2—5		
XM 50	50,000	66	0.5—2.0	70℃ pH1—14	丙烯腈-氯乙烯共聚物
XM 100A	100,000	110	0.4—1.4		
XM 300	300,000	480	0.75—2.0		
DM 5	5,000		0.04—0.1		与 UM 膜类似

* 表列各型超滤膜均为 Amicon 厂产品。

** UM、PM 及 XM50、DM 膜的流率系在压力 55 磅/平方英寸下测 5 分钟, XM 100A、XM300 膜则在压力 10 磅/平方英寸下测 5 分钟。

*** 近年用非纤维素合成聚合物为制膜材料的还有尼龙和聚偏二氟乙烯 (Polyvinylidene fluoride)。

表 5 Diaflo 滤膜的溶质阻留率

溶 质	分子量	阻 留 率 (%)									
		UM 05* (55)	UM 2 (55)	UM 10 (55)	PM 10 (55)	UM 20 (55)	PM 30 (55)	XM 50 (55)	XM 100A (10)	XM 300 (10)	CF50A (1000 × g)
D-丙氨酸	89	80	0	0	0	0	0	0	0	0	—
DL-苯丙氨酸	165	90	0	0	0	0	0	0	0	0	—
色氨酸	204	80	0	0	0	0	0	0	0	0	—
蔗 糖	342	80	50	25	0	—	0	0	0	0	—
棉籽糖	594	90	—	50	0	—	0	0	0	0	—
菊 粉	5000	—	80	60	—	5	—	—	—	—	—
葡萄糖 T10	10000	—	90	90	5	—	—	—	—	—	—
细胞色素 C	12400	>95	>95	90	90	—	45	30	35	0	10
聚乙二醇	16000	>95	>95	80	—	—	—	—	—	—	—
肌红蛋白	18000	>95	>95	95	80	60	35	20	—	—	60
α-糜蛋白酶元	24500	>95	>98	>95	>95	90	75	85	25	0	—
胃蛋白酶元	35000	>99	>99	>99	>95	—	80	—	—	—	40
卵清蛋白	45000	>99	>99	>99	>99	—	—	—	—	—	—
红血球	64000	>99	>99	>99	—	>95	95	95	45	10	65
白蛋白	67000	>98	>98	>98	>98	95	>90	>90	45	10	90
葡萄糖 110	110000	>99	>99	>99	30	—	20	10	5	0	0
醛缩酶	142000	>99	>99	>99	>99	—	>99	>95	—	50	>90
免疫球蛋白	160000	>98	>98	>98	>98	>98	>98	>98	90	65	—
脱铁铁蛋白	480000	>98	>98	>98	>98	>98	>98	>98	>95	85	—
免疫球蛋白	960000	>98	>98	>98	>98	>98	>98	>98	>98	>98	—

* 膜的型号,下面括号中为操作压力(单位是磅/平方英寸);右起第一栏中括号内数字是离心力(单位为×g)

对膜的影响很大,使用膜时应加选择。

(四) 溶质的回收

有些膜是由惰性的合成聚合物制成,在某些应用中,由于它的有限非共价吸附损失(finite

non-covalent adsorptive losses) 而影响溶质的回收,还有膜表面高浓度的溶质形成凝胶或滤饼所引起的损失,也影响溶质的回收。缓冲液也影响膜的吸附,已知磷酸盐增加吸附损失,而

用三羟甲基氨基甲烷缓冲液或琥珀酸盐缓冲液时,其溶质回收率较好。

二、超滤装置的选择

选择超滤装置也要考虑以下几个方面:

(一) 主要用途

超滤装置大都根据用途(如浓缩或阻留大溶质分子,或除去、交换透过膜的小溶质分子)而设计,但各种超滤装置商品,在性能上有所侧重,因此需要选择符合主要用途的一种型号。

(二) 阻留大溶质最高浓度的水平

这主要是了解在浓缩程度增高时,膜表面所形成的溶质层(即浓度极化),在本超滤系统中是否有降低浓度极化而又能维持最低限度流速的能力。为此,须弄清楚每个装置的上限和下限的浓缩水平。所谓浓缩最高水平是指浓缩或分级大溶质分子时,最后大溶质分子含量达到比较恒定时水平。有时仪器系统能全部发挥它的性能,可得到超过上限水平的结果。

(三) 储液容器

要有足够大的储液容器,以便装载需要处理的溶液。

总之,高效能的超滤装置主要是指装置的超滤系统设计很合理,再加上使用合适的超滤膜。这样的装置在工作时才能保证膜附近(指显微镜下)的溶剂对流状态最好,使溶质被膜最有效地选择阻留。为此,适当地加快溶液流过膜表面的速度,减低浓度极化,方可能达到效率高的超滤。对于性质很稳定的酶,可用高剪率层流或高速循环系统的装置进行超滤,但对于

某些很不稳定的酶则不宜采用,应换用慢速循环或单传送流程系统的装置,以低剪力低压力(低于 25 磅/平方英寸)和在低温下进行超滤。

应用举例

一、选择膜及装置几例

(一) 400 毫升酶溶液(分子量 +3000)浓缩至 25 毫升

本例为大溶质分子的浓缩,由于酶的不稳定,对剪力敏感,故用单程传送的浅道系统和高流量膜(如 PM10)的超滤装置(如 TCF10 型超滤仪)。

(二) 从 7% 牛血清中分离白蛋白

本例为大溶质分子分级分离。要选择对白蛋白有较大渗透性又对免疫球蛋白有极好排斥率的中空纤维,如 HIP 100 型或 HIX 50 型的中空纤维,超滤装置如可采用 DC2 型中空纤维透析-浓缩仪或 HIX 50 中空纤维超滤器(内压 1—2 磅/平方英寸),或 HIP100 型中空纤维超滤器。

(三) 5% 白蛋白溶液 50 升脱盐并浓缩至 20%

本例为大溶质分子脱盐及浓缩,要选择流速较快,可处理大量体积的浓缩仪,如 DC30 型或 HIOP8 中空纤维超滤仪。TCI-5E 型浅道系统及 PM30 型超滤膜亦可采用。

(四) 常规色谱柱线型洗脱液浓缩 5 倍

本例可用 CEC1 型洗脱物浓缩仪及 PM10 膜,样品不需集中并随即浓缩。

(下转第 48 页)

表 6 几种酶的浓缩及回收

酶	初始体积 (毫升)	终了体积 (毫升)	体积浓缩因素	酶浓度(单位/毫升)			回收率 ¹⁾ (%)
				原样品	浓缩液	滤液	
青霉素酶	1800	150	12.3	100	950	0	79.3
β -半乳糖苷酶	1000	33	30.3	0.75	5.44	0	24 ²⁾
胰蛋白酶 ³⁾	1400	310	4.52	4.5	18.7	0	91.3
胰蛋白酶	1320	290	4.56	4.3	14.9	0	76.6

1) 回收率 = $\frac{\text{浓缩液总酶活}}{\text{原样品总酶活}} \times 100$ 。

2) 此数非真正回收率,对样品中 47% 的半乳糖苷酶活性因置放而损失。

3) 此酶在 11℃ 下过滤,其它酶在 25—26℃ 下过滤。

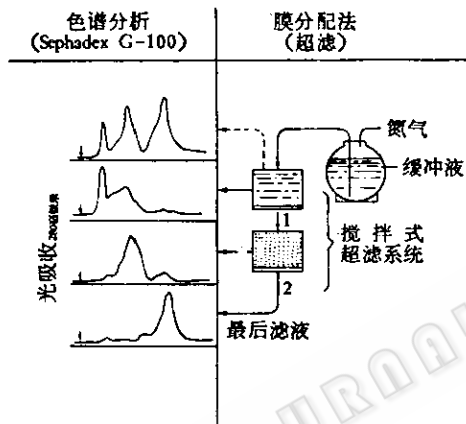


图 20 牛乳乳清经超滤多级分离后由色谱分析鉴定
1. PM30 膜, 分子量 30,000; 2. PM10 膜, 分子量 10,000。

二、超滤结果举例

(一) 几种酶的浓缩及回收

结果见表 6。本试验用 UM-1 膜过滤。

(二) 大溶质分子分级分离

牛乳乳清经超滤多级分离后, 由色谱分析鉴定, 结果见图 20。

参 考 文 献

- [1] Amicon Corp: Publication No. 447A, 1975.
- [2] Amicon Corp: Publication No. 448, 1975.
- [3] Millipore Corp: Catalog No. RP309, 1977.
- [4] Blatt, W. F.: Principle and Practice of Ultrafiltration, *Membrane Separation Process* (ed. by Meares, P.), Elsevier Scientific Publishing Company, N. Y. 1976.
- [5] Hwang, S. T. and K. Kammermeyer: *Membrane in Separations*, Wiley-Interscience, N. Y. 1975.