

# 膜分离技术的应用

何旭敏, 何国梅, 曾碧榕, 孙洪贵, 杨黄浩, 陈少鸿, 周花,  
李春艳, 胡建华, 丁马太, 林昌健, 夏海平\*, 蓝伟光\*

(厦门大学材料科学与工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 报道膜分离技术用于垃圾渗沥水、6-氨基青霉烷酸(6-APA)裂解液以及维生素C发酵液中的分离浓缩过程, 各项实验均进行了中试放大, 取得了良好的效果。

**关键词:** 膜; 超滤; 纳滤; 垃圾渗沥水; 6-氨基青霉烷酸; 维生素C

**中图分类号:** TQ 028.8

**文献标识码:** A

分离膜是一种特殊的、具有选择性透过功能的薄层物质, 它能使流体中的一种或几种物质透过, 而其他物质不透过, 从而起到浓缩和分离纯化的作用。常见的膜分离过程有反渗透(RO)、纳滤(NF)、超滤(UF)、微滤(MF)、气体分离和渗透蒸发(PV)等。

近30多年来, 膜分离作为一种新兴的高效的分离、浓缩、提纯及净化技术, 获得了极为迅速的发展, 已得到广泛应用, 形成了独特的新兴高科技产业。各种膜过程具有不同分离机理, 适于不同对象和要求。但有其共同点, 如过程较简单, 经济性较好, 往往没有相变, 分离系数较大, 节能, 高效, 无二次污染, 可在常温下连续操作, 可直接放大, 可专一配膜等。由于膜过程特别适用于热敏性物质的处理, 在食品加工、医药、生化技术等领域有其独特的适用性。

在制药工业中可应用UF膜分离工艺除去(或降低)注射用药物(药液)中热原含量; 应用UF、NF等膜分离技术分离、浓缩、提纯医药制品等方面正在日益广泛的应用。例如日本、美国药典允许大输液除热原采用RO和UF单元<sup>[1]</sup>。Joachim Danzig等人<sup>[2]</sup>研究了在连续的酶催化反应制备6-APA过程中, 采用RO膜分离法浓缩青霉素裂解液, 随着浓缩倍数的增加, 膜通量降低而对6-APA截留率基本能维持在98.5%以上, 但当料液浓度达400mmol/v时, 截留率显著下降, 此时的渗透压为44 bar。Adikane<sup>[3]</sup>等人研究了用MF膜去除青霉素G发酵液中的菌丝体, 青霉素G的回收率可达98%。近年来, 我国膜技术在抗生素生产中的应用已有一些研究<sup>[4~6]</sup>。蔡邦肖<sup>[7]</sup>选用了不同性能的聚酰胺NF膜, 对药厂提供的螺旋霉素进行了分离和浓缩,

**收稿日期:** 2001-02-15

**基金项目:** 国家“九五”攻关(96-C02-02-01)、教育部重点科技、教育部骨干教师基金、教育部回国人员基金和福建省自然科学基金(C9910003)资助项目

**作者简介:** 何旭敏(1965-), 女, 博士; 夏海平(1964-), 男, 教授。

\* 联系人: 夏海平 E-mail: hpxia@jingxian.xmu.edu.cn; 蓝伟光 E-mail: lanwg@singnet.com.sg

在进料流量 55 L/h、操作压力 1.5 Mpa 条件下,所选用的膜对螺旋霉素几乎全部截留,膜的渗透通量可高达 30 LMH. 刘路等<sup>[8]</sup>在原有林可霉素提炼工艺上应用 UF 和 NF 的组合分离技术,纯化浓缩林可霉素发酵液,大大节省溶媒和能源,缩短并优化了传统工艺路线,提高了收率及产品质量. 近年来,UF 膜法已逐渐应用到中药制剂工艺中,取得了良好的效果<sup>[9~12]</sup>. 李淑莉等<sup>[13]</sup>初步研究了聚砜 UF 膜对黄芩(根)、黄连(根茎)、黄柏(皮)、金银花(花)、五味子(果)、大青叶(叶)等中药提取液的渗透行为,结果表明各中药有效成分的回收率均高于 74%. 上述大部分处于实验室研究阶段的膜法分离浓缩药物制剂,将对我国传统医药工业中分离技术的改进,起到一定的促进作用.

自从膜技术问世以来,人们很快就发现它在环境工程中的作用. 目前,它在国外已经成为一项广泛用于工业废水治理的有效手段<sup>[14~17]</sup>. 膜法处理垃圾渗沥水,在国外已有成功的例子. 美国 Masoud Pirbazari<sup>[18]</sup>等人研究了超滤-生物活性碳(UF-BAC)技术处理垃圾渗沥水,污染物的去除是靠吸附、生物降解和膜分离来完成的. 结果表明 UF-BAC 技术对含有重金属和有机物的渗沥水的总有机碳(TOC)及易生物降解的渗沥水的 TOC 去除率分别为 95%~97%和 95%~98%,有机物去除率分别达 99.5%和 99%. 1994年,瑞典 Kristina Linde<sup>[19]</sup>等研究了 RO 膜法处理 3 种不同类型(普通、可生物降解及主要成分是灰份)的垃圾渗沥水,研究发现,前两种渗沥水的 COD 和 NH<sub>4</sub>-N 截留率达 98%以上,但是 RO 膜法不适合处理第 3 种渗沥水,这是由于盐的浓缩使渗透压过高膜通量太低的缘故. 对第 3 种渗沥水采用 NF 膜法处理<sup>[20]</sup>,则通量提高了 27~37 倍,且大部分重金属被截留. 在我国,基本上采用生化法处理垃圾渗沥水,处理后的水质尚不能达到国家二级排放标准,到目前为止未见膜法处理垃圾渗沥水的报道.

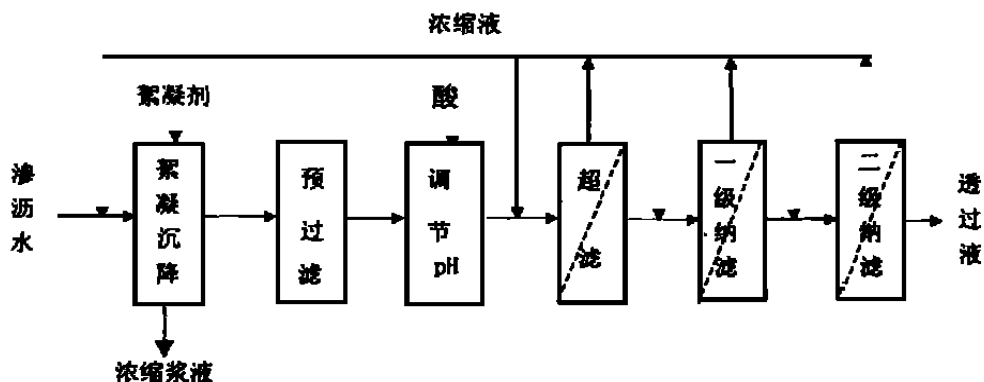
渗透蒸发(PV)是近 20 多年迅速发展起来的一种新的液体混合物分离技术,可用于传统分离手段较难处理的恒沸物、近沸物系的分离,微量水的脱除,及水中微量有机物的去除. 各国学者对 PV 膜分离技术进行了广泛的研究和探讨. Chen W. J. 和 Martin C. R.<sup>[21]</sup>曾尝试用聚苯乙烯磺酸/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 制备的复合膜来分离甲醇/MTBE. 结果表明,与镁离子交联的复合膜比与钠离子交联的复合膜对甲醇的选择性高得多,分离系数高达 5 000~35 000. Zhou M 等<sup>[22]</sup>研究了添加六氟磷酸盐和对甲苯磺酸盐的聚吡咯膜对苯/甲醇的 PV 特性,研究发现,当甲醇含量低时,分离效果很好. 丁马太等<sup>[23,24]</sup>研究了壳聚糖/聚丙烯酸钠共聚离子复合膜以及壳聚糖/褐藻酸钠聚离子复合膜的醇-水渗透汽化分离性能. 夏海平等<sup>[25,26]</sup>研究了氢型沸石掺杂聚乙烯醇膜的渗透汽化性质及其在酯化反应中的催化作用,结果发现,掺杂 H-Y 型沸石的聚乙烯醇催化酯化膜用于醇酸酯化反应时,具有催化和分离功能;同时还研究了硫酸铁掺杂聚乙烯醇复合膜的催化酯化作用,结果表明,硫酸铁的加入对膜的渗透性能和酯化反应的选择性及转化率的提高有重要作用. 陈永康等<sup>[27,28]</sup>研究了新型的 PASA(聚酰胺砜酰胺)及改性 PASA 的醇-水体系的渗透汽化行为,结果发现 PASA 膜是优先透过水的. 如何提高 PV 膜的选择性和渗透通量,以及如何使两者取得适度平衡等是当前研究的重点,目前, PV 膜分离法已在无水乙醇生产等方面实现产业化,预计将在水中微量有机物脱除及有机物中微量水的脱除等方面获得广泛的应用.

## 1 膜法处理垃圾渗沥水

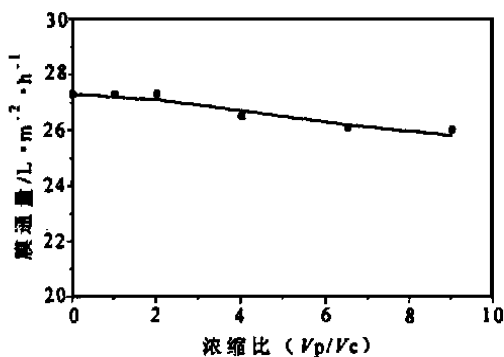
本项目系国内首次使用膜分离技术处理垃圾渗沥水. 国外已有许多膜分离法处理垃圾渗

沥水的成功实例,一般是用一级超滤及两级反渗透处理的方法,使约 80%的渗沥水透过分离膜,成为达到排放标准的透过液(permeate)排入地表水,其余 20%左右为浓缩液,返送到垃圾场或进一步蒸发及干燥处理.我们研究了膜分离技术近年的最新进展,发现达到同样的渗透通量,纳滤膜所需的压力(推动力)比反渗透膜低 0.5~16 MPa.这是因为纳滤膜在透过水的同时允许某些一价离子大量透过,因而渗透压大为减少,从而大大降低了所需推动力;在同等压力下,膜的通量大大增加,而一价离子对环境一般是无害的.本项目已于 2000 年 4 月通过建设部和福建省科委鉴定.已被国家科委列入国家高技术产业发展项目计划.

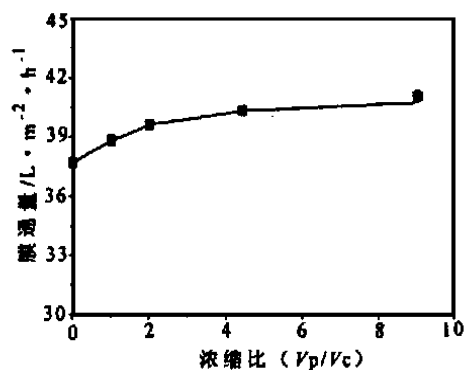
本试验中,采用纳滤膜分离系统代替反渗透膜分离系统,在较低压力(1.0~2.5 MP)下,可使 85%~90%的渗沥液转化成符合排放标准的透过液,仅余 10%~15%的浓缩泥浆.生产中,可将此泥浆返回垃圾池,或利用焚烧垃圾的余热烘干并进一步焚烧.工艺流程如下:



中试结果与讨论:由于垃圾渗沥液中污染物含量高于一般生活污水,我们选用了对堵塞不敏感、易于清洗、压力损失较小的管式膜作为超滤膜组件;由于经过了絮凝沉降及超滤的预处理



(a)



(b)

图 1 预处理后纳滤通量随浓缩比的变化

(a) 一级纳滤; (b) 二级纳滤

Fig. 1 Permeate flux variation with concentration for pretreated leachate

理,去除大部分固体悬浮物质后,我们选用了结构简单、单位膜面积的价格较低、装填密度较高及拆装方便的卷式膜作为两级纳滤膜组件。

通过对卷式纳滤膜的工作压力对膜截留率及膜通量的影响实验,确定了工作压力为 1.0~2.5 Mpa 的操作条件;同时还对预处理方法进行了实验,结果表明:在渗沥液 pH 值为 7~9,絮凝剂投加量为 100~200 mg/L 时,COD<sub>Cr</sub> 去除率可达 25%~30%,电导率降低率为 8%~12%,SS 去除率达 70%~80%,混凝沉淀后的上层液体经预过滤器过滤,再通过超滤,可进一步去除液体中的固形物.超滤过程已基本脱除悬浮物。

为了确保透过液达到国家排放标准,采用两级纳滤系统进行试验.图 1 为经预处理后的纳滤透过液通量随浓缩比变化的情况.从图 1 可以看出第一级纳滤通量衰减较缓;第二级纳滤透析液通量则几乎不受浓缩比影响,而随着运行过程温度的升高略有增加.一、二级纳滤透析液平均通量分别为 27 L/m<sup>2</sup>·h 及 40 L/m<sup>2</sup>·h,污染物含量详见表 1(主要技术指标与国际权威性的 PCI 资料相近).表中可见,最终透过液水质指标符合国家排放一级标准。

## 2 基于膜分离过程的 6-APA 生产技术

随着半合成抗生素需求量的增加,半合成青霉素的生产已成为我

表 1 膜分离渗透液的水质指标(厦门市环境监测中心站现场取样测定)与国家排放标准

Tab. 1 List of the quality of the final stage permeate and the Highest Discharging Sander of China

| 污染物<br>/mg·L <sup>-1</sup> | 渗沥液                  | 透过液                  | GB8978-1996<br>一级标准 |
|----------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| pH                         | 8.10                 | 8.32                 | 6~9                 |
| 悬浮物                        | 1190                 | 7                    | 20                  |
| BOD <sub>5</sub>           | 3890                 | 3.00                 | 20                  |
| COD <sub>Cr</sub>          | 5030                 | 16.3                 | 60                  |
| NH <sub>3</sub> -N         | 734                  | 1.26                 | 15                  |
| As                         | 0.109                | 0.0035               | 0.1                 |
| Cd                         | 0.01                 | 0.01                 | 0.1                 |
| 总 Cr                       | 0.674                | 0.007                | 1.5                 |
| Pb                         | 0.01                 | 0.01                 | 1.0                 |
| 总 P                        | 0.939                | 0.0125               | 0.1                 |
| Zn                         | 0.081                | 0.025                | 2.0                 |
| Cu                         | 0.01                 | 0.01                 | 0.5                 |
| Ni                         | 0.26                 | 0.09                 | 1.0                 |
| Mn                         | 0.04                 | 0.01                 | 2.0                 |
| Hg                         | 5.0×10 <sup>-5</sup> | 3.0×10 <sup>-5</sup> | 0.05                |
| F <sup>-</sup>             | 69.00                | 1.30                 | 10                  |
| 色度(倍)                      | 1000                 | 0                    | 50                  |
| 石油类                        | 7.30                 | 0.31                 | 5                   |
| S <sup>2-</sup> (硫化物)      | 2.34                 | 0.01                 | 1.0                 |
| 动植物油                       | 35.9                 | 0.8                  | 10                  |
| 挥发酚                        | 5.28                 | 0.05                 | 0.5                 |
| 总大肠菌群                      | >238000              | <9                   | 500                 |

国医药工业的一个重要发展方向,6-氨基青霉烷酸(简称 6-APA)是生产半合成青霉素的关键原料,用于生产各种半合成青霉素药物,如氨苄西林、阿莫西林等.试制和生产 6-APA 是发展我国半合成青霉素的重要一环.我国一些制药厂采用青霉素酰化酶的基因工程菌的技术生产 6-APA.该技术生产平均克分子收率约为 85%.随着时间性的推移,6-APA 技术有了很大的发

展,市场竞争愈来愈烈,特别是近几年,该技术与国际先进水平有了相当的差距,在生产中,发现固定化细胞法中酶的比活性低,裂解收率低,不易形成大规模的生产。

本项目采用的超滤及纳滤膜分离联用技术,对原有工艺进行改造,提高了 6-APA 的结晶收率及减少母液中 6-APA 的损失,使得 6-APA 的平均克分子收率达 90% 以上。同时新工艺大大地降低了溶媒的消耗,节约了生产成本。本项目为国家“九五”攻关专题的子课题,已于 2000 年 7 月通过教育部验收与鉴定,并获 2000 年度厦门市科技进步二等奖。

1) 工艺流程:本实验的工艺流程如下:首先,青霉素工业钾盐用硼酸缓冲液配制,经超滤膜处理后进入有固定化酶的反应罐中裂解,在一定的温度下,用 3N 氨水调节反应液 pH = 7.5 ~ 8.8 至裂解完全;裂解液经纳滤膜浓缩;然后采用溶媒抽提工艺结晶,通过正交试验,确定溶媒加入比例、pH 最佳控制点,还通过自动化仪表设备控制结晶过程,严格控制等电点,尽可能降低结晶母液中 6-APA 损失。产物经真空干燥得成品,结晶母液中的溶媒和苯甲酸回收利用。

2) 实验结果与讨论:中试共投料 30 批,每批投料 5 Kg,共投料 150 Kg,6-APA 的平均效价为 2 690  $\mu\text{M/g}$ ,裂解率为 97.5%,平均透光度 98.0%,平均克分子收率为 90.20%。将新工艺扩大到实际生产中,对第二批酶进行了 800 批次的实验,产品的平均克分子重量收率达 90.18%,而老工艺(固定化细胞法)平均克分子收率仅有 84.11%。

本实验采用了纳滤膜分离技术浓缩裂解液,通过裂解液的浓缩,提高了 6-APA 结晶浓度,不仅降低了溶媒消耗,而且使结晶母液中的 6-APA 损失减少,从而提高了成品的收率(表 2)。根据酶反应动力学可知,酶裂解反应的产物的收率随着料液浓度的减少而增加,而 6-APA 浓度低,母液体积大,结晶收率会受到限制。本工艺采用了纳滤膜浓缩系统,使得低浓度裂解高浓度结晶得以实现。

对于地处多雨霉菌较多地区制药公司,生产周期较长时,会出现大量丝状霉菌于青霉素酰化酶中,所以有必要对青霉素酰化酶进行消毒。消毒实施后,对延长酶的使用寿命,减缓反应时间增长的速度,降低噻唑酸单位,提高裂解收率起了很好的作用(表 3)。

此外,生产上可采取补加旧酶,降低青霉素工业钾盐投料量等方法来增加单位体积的酶量,促进裂解反应进行,能起到稳定反应时间及裂解收率和延长了酶的使用寿命的作用。

### 3 Sun-flo 膜分离系统在维生素 C 生产中的应用

我国首创的二次发酵法<sup>[29]</sup>生产维生素 C(以下简称 Vc),是使山梨醇直接发酵制备 Vc 中间体 2-酮基-L-古龙酸(钠),全工艺包括发酵、提取和转化三大步

表 2 采用纳滤膜浓缩前后结晶收率比较

Tab. 2 Comparison of traditional separation process and NF process

|        | 溶媒用量/<br>$\text{L} \cdot \text{Kg}^{-1}$ | 母液单位/<br>$\mu \cdot \text{mL}^{-1}$ | 母液损失率/<br>(%) | 结晶收率/<br>(%) |
|--------|--|-------------------------------------|---------------|--------------|
| 纳滤膜浓缩后 | 0.8                                      | 5000                                | 3.5           | 93.1         |
| 纳滤膜浓缩前 | 1.0                                      | 4000                                | 4.5           | 92.          |

表 3 青霉素酰化酶消毒前后情况对比

Tab. 3 Comparison of yield of enzymatic hydrolysis to 6-APA sterilized and unsterilized

|                | 噻唑酸/ $\mu \cdot \text{mL}^{-1}$ | 收率/(%) |
|----------------|---------------------------------|--------|
| 消毒前 10 批实验平均结果 | 4021                            | 91.21  |
| 消毒后 10 批实验平均结果 | 3296                            | 92.54  |

骤. 由于采用细菌发酵, 发酵液中残留着菌丝体、蛋白质和悬浮微粒等杂质. 原工艺采用加热沉淀法<sup>[30]</sup>去除这些杂质. 此工艺通过一次树脂和加热沉淀法除蛋白. 加热既要耗能, 又造成古龙酸损失近 4%, 且发酵液直接通入离子交换树脂, 使树脂表面污染严重, 交换容量下降.

我们采用超滤膜分离技术, 对原工艺进行改进, 其工艺流程示意如下:

发酵液 → 超 滤 → 树脂脱盐 → 浓缩结晶 → 古龙酸

此工艺采用超滤一步去除发酵液中残留的菌丝体, 蛋白质和悬浮微粒等杂质, 省去了预处理、加热、离心等工序, 既节约了能耗, 又提高了古龙酸的收率. 生产中结合对超滤的滤渣加水洗涤, 古龙酸的收率可达 99%. 在此之前已有超滤应用于古龙酸提取的报道<sup>[30,31]</sup>, 但仍存在不少缺点, 如发酵液需预处理后进入超滤设备, 否则超滤膜堵塞严重, 因此, 有必要不断寻求最佳化的超滤膜和超滤膜系统. 本实验采用厦门大学三达膜科技有限公司的 Sun-flo 超滤膜系统处理 Vc 发酵液, 发酵液可以不经预处理, 滤液质量高, 并且可达到高、恒定的膜通量, 因此 Sun-flo 超滤膜系统是目前处理 Vc 发酵液的最佳膜设备.

### 3.1 实验结果及讨论

本实验采用 Sun-flo UF-54 中试设备, 截留分子量分别为 3 万(1<sup>#</sup>)、7 万(2<sup>#</sup>)和 10 万(3<sup>#</sup>)的超滤膜, 对某药厂古龙酸发酵生产线上的 Vc 发酵液进行中试. 通过对超滤膜的筛选, 我们发现截留分子量为 3 万的超滤膜去除白效果最好, 所以我们选择 1<sup>#</sup>膜进行超滤实验.

用 1<sup>#</sup>膜分别处理 1~4 批发酵液, 进行了膜通量衰减实验(图 2). 结果表明:(1) 1<sup>#</sup>膜的平均膜通量可高达 150 L · m<sup>-2</sup> · h<sup>-1</sup>左右, 这说明 Sun-flo 超滤系统具有很强的处理能力.(2) 膜通量随过滤时间的延长而逐步衰减. 这主要是由于随过滤时间的延长, 膜表面沉积增加, 发酵液含固量提高, 发酵液流动性能变差造成的, 但膜通量衰减速度较为缓慢, 尤其在 实际生产中, 发酵液总量较大, 超滤过程中发酵液浓度变化较慢, 膜通量衰减得就更为缓慢, 这说明 Sun-flo 超滤系统具有很强的连续稳定运行能力, 一般可以连续运行 8~10 h.

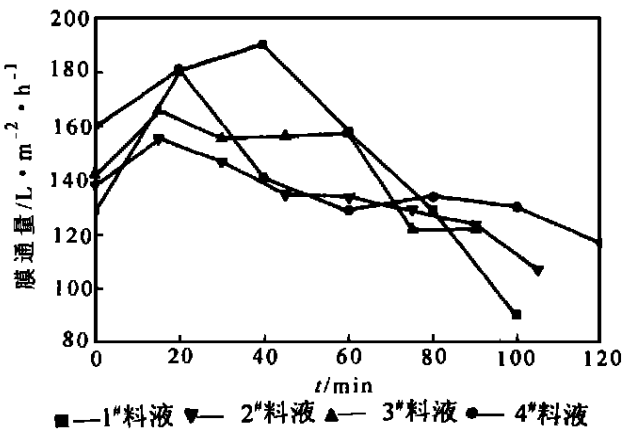


图 2 膜通量衰减曲线

Fig. 2 Permete flux variation with operation time for Victamin C fermentation liquor

Sun-flo 膜系统能维持超乎寻常高的膜通量, 主要在于其膜组件具有独特的内部结构. 其组件内部的每一片膜均已被变形扭曲以适应支撑板的棱纹结构, 形成不平的错流通道, 从而增加了涡流, 既破坏了膜表面层的浓差极化, 又阻止了表面吸附引起的膜堵塞.

每批次过滤完成后, 都要停机进行膜清洗. 实际工业生产中, 一般可连续运行 8~10h 后再清洗, 不必停机, 通过阀门切换到清洗液进行循环清洗. 清洗步骤为: 1) 排出滤渣, 用清水洗去系统残余的滤渣; 2) 在 T = 50℃ 下, 用浓度为 1% (kg/kg) 的专用洗涤剂循环清洗 30~40 min; 3) 排出清洗剂, 并用清水洗至 pH 呈中性; 4) 测定水通量, 1~4 批次的平均水通量为 400 L ·

$\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ .

本实验处理 1~4 批次发酵液是用同一个膜件进行的试验,从图 1 可看出,它们初期的膜通量均非常相似,膜通量的衰减曲线也很有相同的规律,这说明了 Sun-flo 膜系统具有很强的清洗恢复能力.

## 3.2 结 论

采用 Sun-flo 超滤系统进行 Vc 发酵液的分离,发酵液可以不经预处理,直接进入膜分离系统,大大简化了工艺,降低了生产成本;此系统运行过程中可维持高的膜通量,且可长时间稳定运行;可有效地除去发酵液中可溶性蛋白,滤液质量好,同时整个过程在常温下进行,古龙酸不发生分解,所以可提高后工艺的古龙酸提取收率;Sun-flo 超滤系统具有很强的清洗恢复能力;此系统实行封闭操作,滤液不受外界污染,排渣不须手动,减轻了劳动强度;新工艺无须添加絮凝剂,节省了费用,由于不含絮凝剂,滤渣可以直接回收利用,既增加了附加收益,又减少了环境污染.

## 参考文献:

- [1] 楼福乐,毛伟钢,陆晓峰,等. 超滤技术在制药工业中除热原的应用[J]. 膜科学与技术,1999,19(3):8-12.
- [2] Joachim Danzig, Wilhelm Tischer, Christian Wandrey. Continuous Enzyme-Catalyzed Production of 6-Aminopenicillanic Acid and Product Concentration by Reverse Osmosis [J]. Chem. Eng. Technol., 1995, 18: 256-259.
- [3] Adikane H V, Singh R K, Nene S N. Recovery of penicillin G from fermentation broth by microfiltration [J]. J. Membr. Sci., 1999, 162: 119-123.
- [4] 张治国,王世展,姜作禹,等. 板式反渗透装置在链霉素生产工艺中的应用[J]. 水处理技术,1994,20(6):349-351.
- [5] 李锡源,栾宝林,韩贵安. 超滤法在抗生素提炼中的应用[J]. 水处理技术,1996,22(4):213-216.
- [6] Lin Yongbin, Yin Defan, Lan Weiguang. Industrial membrane filtration systems for the production of bulk antibiotics. In: Preprints of International Conference on Membrane Science and Technology (ISMST '98) [C]. Beijing: Chinan, 1998: 182-183; 390-391.
- [7] 蔡邦肖. 纳滤膜技术在螺旋霉素生产中应用初探[J]. 膜科学与技术. 1999, 19(5): 55-57.
- [8] 刘路,刘玉荣. 膜分离技术在林可霉素发酵液分离浓缩中的应用[J]. 水处理技术. 2000, 26(3): 169-171.
- [9] 宋洪涛,戴京美,韩家荣,等. 超滤法用于复方当归注射液制备工艺的改进[J]. 药学情报通讯, 1993, 11(3): 41-43.
- [10] 简惠. 超滤新技术应用于中药口服液可行性实验研究[J]. 中药新药与临床药理, 1994, 5(1): 49-50.
- [11] 刘洪谦,屈凌波,贾金付,等. 生脉饮口服液超滤技术研究[J]. 中草药, 1996, 27(4): 209-211.
- [12] 欧兴长等. 中药制剂工艺中超滤法应用的进展和问题[J]. 水处理技术, 1999, 25(3): 125-129.
- [13] 李淑莉,陈斌,欧兴长,等. 药液种类和浓度对超滤影响的初步研究[J]. 膜科学与技术, 1999, 19(3): 41-43.
- [14] Lahiere R J, Goodboy K P. Ceramic membrane treatment of petrochemical wastewater [J]. Envir Prog., 1993, 12(2): 86-89.
- [15] Trouve E, Urbain V, Manem J. Treatment of municipal wastewater by membrane bioreactor: Results of a semi-industrial pilot-scale study [J]. Water Sci. Tech., 1994, 30: 151-157.
- [16] Geemans M G E, Li L, Gioyna E F. Separation of metal oxides from supercritical water by crossflow

microfiltration[J]. *J. Membr. Sci.*, 1997, 124(1): 129-145.

- [17] 童金忠, 邢卫红, 徐南平, 等. 陶瓷微滤膜处理钛白粉水洗液的过程强化研究[J]. *高校化学工程学报*, 1999, 13(5): 421-427.
- [18] Massoud Pirbazari, Varadarajan Ravindran, Badri N, et al. Hybrid membrane filtration process for leachate treatment[J]. *Wat. Res.*, 1996, 30(11): 2 691-2 706.
- [19] Kristina Linde, Ann-sofi Jonsson, Roland Wimmerstedt. Treatment of three types of landfill leachate with reverse osmosis[J]. *Desalination*, 1995, 101: 21-30.
- [20] Kristina Linde, Ann-sofi Jonsson. Nanofiltration of salt solutions and landfill leachate [J]. *Desalination*, 1995, 103: 223-232.
- [21] Chen W J, Martin C R. Highly methanol-selective membranes for the pervaporation separation of methyl t-butyl ether/methanol mixtures[J]. *J. Membr. Sci.*, 1995, 105: 101-108.
- [22] Zhou M, Persin M, Sarrazin J. Methanol removal from organic mixtures by pervaporation using polypyrrole membranes[J]. *J. Membr. Sci.*, 1996, 117: 303-309.
- [23] 卢灿辉, 许晨, 丁马太. 壳聚糖/聚丙烯酸钠共聚离子复合膜的醇-水渗透汽化分离性能[J]. *水处理技术*, 1996, (2): 75-79.
- [24] 卢灿辉, 许晨, 丁马太. 壳聚糖/褐藻酸钠聚离子复合膜的渗透汽化分离性能研究[J]. *功能高分子学报*, 1996, (3): 383-389.
- [25] 夏海平, 陈小艾, 何国梅, 等. 氢型沸石掺杂聚乙烯醇膜的渗透蒸发性质及其在酯化反应中的催化作用研究[J]. *功能材料*, 2001, (待发表).
- [26] 夏海平, 陈小艾, 彭赛群, 等. 硫酸铁掺杂聚乙烯醇复合膜的催化酯化作用[J]. *化学通报*, 2000, (3): 39.
- [27] Chan W H, Ng C F, He X M. Preparation of Derivatized Poly( amidesulfonamide) s ( PASAs) and Their Applications in Dehydration of Aqueous Alcohols through Pervaporation[J]. *J. Membr. Sci.*, 1999, 160: 77-86.
- [28] Chan W H, Ng C F, Lam-Leung S Y, et al. Pervaporation of Aqueous Ethanol Solution through Poly( amide sulfonamide) s ( PASAs) Membrane[J]. *Polymer*, 1998, 39: 2 461-2 467.
- [29] 熊宗贵, 白秀峰, 徐亲民, 等. 发酵工艺原理[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1995. 386-370.
- [30] 严荣庆, 李一通, 马承继, 等. 超滤应用于维生素 C 提取工艺[J]. *中国医药工业杂志*, 1990, 21(1): 1-3.
- [31] 范光辉. 平板滤膜用于维生素 C 提取工艺改进[J]. *分离信息荟萃*, 1996, 14: 54-58.

## Application of Membrane-Separation Technology

HE Xu-min, HE Guo-mei, ZENG Bi-rong, SUN Hong-gui, YANG Huang-hao,  
CHEN Shao-hong, ZHOU Hua, LI Chun-yan, HU Jian-hua, DING Ma-tai,  
LIN Chang-jian, XIA Hai-ping<sup>\*</sup>, LAN Wei-guang<sup>\*</sup>  
(Dept. of Material Sci. and Eng., Xiamen Univ., Xiamen 361005, China)

**Abstract:** This report introduce the applications of membrane-separation in landfill leachate treatment and the separation-concentration of 6-aminopenicillanic acid and 2-keto-L-gulonic acid. All experiments were carried out in pilot-plant scale and the performances of membranes in the three kinds of feed solutions mentioned above were satisfactory.

**Key words:** membrane; ultrafiltration; nanofiltration; landfill leachate; 6-APA; vitamin C