

纳滤膜分离技术的应用进展

王 薇, 杜启云

(天津工业大学 中空纤维膜材料与膜过程教育部重点实验室, 天津 300160)

摘要:纳滤膜是一崭新的分离膜, 本文综述了纳滤膜技术在食品、化工、饮用水、废水处理等领域的应用进展。并简单介绍了纳滤膜在有机溶剂中的应用研究。

关键词:纳滤膜; 膜分离; 应用

根据 Web of science 统计, 从 1997 年至 2006 年, 相关纳滤(Nanofiltration, NF)的出版物有 1790 项, 图 1 列出近年来有关纳滤(NF)、反渗透(RO)、超滤(UF)出版物的增长趋势。从图中可以看到作为新的膜技术, 纳滤越来越受到重视, 相关报道的数量已经和传统的反渗透相当。

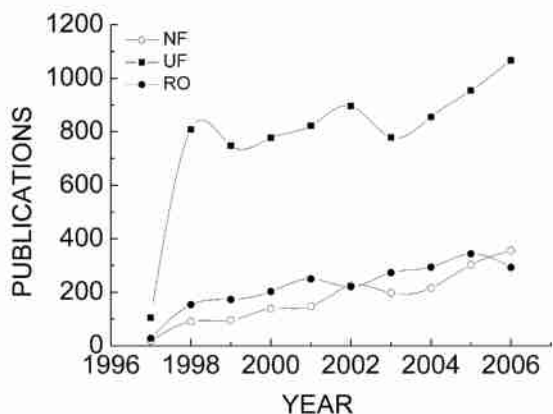


图 1 超滤、纳滤和反渗透的出版物(1997~2006)

Figure 1 Publications of UF, NF and RO 1997~2006 (Web of Science Database, access 1/11/2007, full & general topic search options)

根据纳滤膜分离的特点, 其可应用范围主要为三个方面^[1]: (1) 对单价盐并不要求有很高的截留率; (2) 欲实现不同价态离子的分离; (3) 分离出某种分子质量的有机物。纳滤膜的实际应用体系往往是多组分的混合水溶液体系, 有机溶剂的体系较少。而且, 由于分离目的和要求不同, 纳滤过程也往往与其它分离手段相结合。目前, 纳滤技术已涉及的应用领域包括食品、医药、环保、水资源、化工等。

1 食品工业

在食品工业中, 膜分离技术主要用来对料液进行浓缩、脱盐、脱色、调味和脱除杂质。

1.1 低聚糖的分离和精制

天然低聚糖通常是从菊芋或大豆中分离提取。Agarwal 等^[2]研究从大豆废水中提取低聚糖, 他们用超滤去除大分子蛋白、反渗透除盐和纳滤精制分离低聚糖, 大大地提高了经济效益。Kamada 等^[3]研究了用超滤-纳滤集合技术从 2.5% 菊苣根浸取液中纯化、浓缩低聚糖, 纳滤出水的单糖、二糖的浓度从 9% 减

基金项目: 天津市高等学校科技发展基金计划项目(项目编号 20060516)

作者简介: 王薇(1971—), 女, 博士, 从事纳滤膜方面的研究, Email: wangwei7126@126.com.

少到 2%，低聚糖被浓缩了 20 倍；合成低聚糖常用高效液相色谱法 (HPIC) 分离精制，以除去原料蔗糖和副产物葡萄糖^[4]。HPIC 法处理量小，且浓缩过程需要大量的水稀释，因而能耗也很高。采用纳滤技术能在很高的浓度区域实现三糖以上的低聚糖同葡萄糖、蔗糖的分离，可大大降低操作成本，提高产品纯度。

叶晓等^[5]的研究工作也表明纳滤对于多糖与小分子糖的分离有明显的分子量分级效果。其中，姬松茸、枸杞和茶树菇多糖可利用 0.2 μ m 微滤—50000Da 超滤—10000 Da 超滤—纳滤联用技术进行分子量分级处理。

1.2 果汁的高浓度浓缩

传统上，果汁是用蒸馏法或冷冻法浓缩，能耗大且果汁风味和芳香成分有损失。由于渗透压的限制，单一的反渗透法难以把果汁浓缩到较高的浓度。Versari 等^[6]将两级纳滤应用于葡萄汁的浓缩，透过液中的糖被浓缩至 77%~97%，果酸和酒石酸的含量较低。红葡萄汁浓缩加工时，往往因酒石结晶粘附在蒸发器上，造成传热效果差和产品产生混浊沉淀。刘安虎等^[7]采用纳滤技术在红葡萄汁蒸发浓缩前去除其中的钾离子，使红葡萄汁在浓缩过程中不发生酒石沉淀。葡萄汁在低温下被预浓缩到 20~30°Bx，蒸发时间缩短，成本降低，产品质量和蒸发效率提高。

1.3 牛奶及乳清蛋白的浓缩

牛乳超滤透过液 (MUP) 和乳清是乳酪生产的主要副产品。两种液体的 COD 高达 60,000mg/L，必须处理后才能排放。另外，这些废液中含有高浓度蛋白质和乳糖，可用于幼儿食品、熟食和冰激凌等的制作，但其中含有的矿物质影响口味。Giorgio 等^[8]报道了乳酪制备中采用纳滤膜将牛乳预浓缩的优势。研究表明纳滤能将牛乳浓缩 2~3 倍，并能去除大部分的一价盐，所制备的 Quarg 型乳酪更甜，钙含量高，原有的苦味被去除，乳清更易于处理。Eva 等^[9]研究了 MUP 和乳清纳滤脱盐的工艺条件，所用的组件为 DK2540C (Osmonics, USA, MWCO 200g/mol)。实验表明纳滤过程能很好地去掉两种液体中的 NaCl，保留有益离子 Ca²⁺，蛋白质和乳糖的流失几可忽略。

1.4 酵母生产

酵母生产废水中含糖类、深色素、较高的 BOD 和 COD。这些废水通常是先蒸发浓缩，再用生物方法进行处理。韩少卿等^[10]对酵母抽提物 (糖液) 进行纳滤处理实验。实验表明纳滤膜能在高通量下除去 97% 的 COD 和 56% 的 BOD，溶液体积缩小 10 倍以上。另外，NF 膜有较好的抗污染能力，细菌不容易在膜表面繁殖。

1.5 制茶工业

肖文军等^[11]在中试规模的基础上，以多种茶叶深加工制品浓缩前的料液为原料，系统研究了 300Da 纳滤、200Da 纳滤、反渗透、真空蒸发等浓缩方法对不同制品的浓缩效应 (见表 1)。结果表明：在加工速溶绿茶时，采用 300Da 膜进行浓缩的工效较高，收率为 98.86%；在去苦味速溶茶、茶黄素、没食子儿茶素和没食子酸酯高纯制品加工中，纳滤浓缩、反渗透浓缩能提高目标产品中相应功能成分的纯度，并依反渗透、200Da 纳滤、300Da 纳滤次序效果递增；4 种方法对功能成分的损失率差异不显著，但采用 300Da 纳滤浓缩效果稍好；对产品重金属含量的影响上，纳滤浓缩能显著降低产品中铅与砷的含量。纳滤技术与传统多效真空浓缩相比，提取液中的固有的色、香、味物质得到很好的保留，在简化工艺，节约能耗，缩短生产周期和提高效率方面也具明显优势。

表 1 不同浓缩方法的功效比较

Table 1 Efficiencies composition of different concentration methods				
浓缩方法	浓缩倍率/倍	固形物损失/%	能耗/kW	产品冷溶性/(0.45g/140mL)
300Da 纳滤	14.22	1.14	8.91	20s 内溶解, 透亮
200Da 纳滤	13.85	0.88	10.05	20s 内溶解, 透亮
反渗透	13.34	0.67	12.35	20s 内溶解, 透亮
真空蒸发	14.91	1.54	35.39	1min 内不溶解, 浑浊

2 化工

2.1 染料工业

仅 2003 年,我国染料产量达到约 70 万吨,占世界染料总产量的约 60%。然而,受到除盐、去杂质等净化技术水平的限制,不少染料生产厂后处理加工粗糙,基本上以滤饼或原染料的方式将染料出口或售给国内的外资企业。活性染料的分子量在 600~2000 之间,而纳滤膜可截留分子量为 200~2000 左右的物质,故多数生产厂家已先后采用了这一新技术^[12],如上海染化八厂、上海臻锋染料化工厂等。实践证明:合理采用膜分离技术,可以除去合成染料中的高盐份、副染料、反应中间体等杂质,从而提高染料的纯度、强度,节约热能,降低成本。

2.2 制药工业

自 1995 年起,纳滤膜技术在国内制药领域的应用日益增加,膜公司与企业用户之间产学研联系密切,研究、开发出几十项纳滤膜软件及配套设备。纳滤技术制药工业的典型应用有^[13]:抗生素树脂解吸液的浓缩、脱盐(头孢 C、氨基糖苷类抗生素、克林霉素等);半合成抗生素合成、转化上下游工艺前的浓缩,提高酶转化效率(6-APA、7-ACA、7ADCA 等);酶转化液提取后浓缩提纯(对羟基苯甘氨酸);维生素浓缩(Vc、VB2、VB12 等);结晶母液回收(阿莫西林、6-APA、头孢拉定等)。

以抗生素为例,抗生素在原料液中含量少,浓度低。传统结晶方法回收率低损失大,真空浓缩易破坏抗生素的抗菌活性。用 NF 膜可通过两种途径回收和纯化抗生素:(1) 溶剂萃取后,用纳滤膜浓缩。由于溶剂循环使用,可节约 80% 的成本;(2) 先用膜浓缩,再用溶剂萃取。可提高萃取设备的生产能力,降低溶剂用量。目前,NF 技术已经在泰乐星生产中得到应用^[14]。三达与华北制药厂合作^[15]将纳滤技术成功应用于青霉素 6-APA 的浓缩工艺,解决了青霉素 6-APA 低浓度裂解和高浓度结晶的关键技术。

2.3 多肽和氨基酸的分离

多肽一般经色谱柱纯化后再通过热蒸发方式进一步浓缩。由于多肽浓度过低(0.1%~0.5%),长时间蒸发消耗大量的有机/水淋洗液,破坏提纯的产品。采用 NF 膜可在常温下浓缩多肽、并可将小分子有机物和盐分除去。利用纳滤膜的荷电性,还可实现氨基酸和多肽的分离。Tsuru 等^[16]通过调节溶液 pH 值,进行了某些多肽和氨基酸混合体系的纳滤分离实验。Garem 等^[17]利用无机和高分子复合型纳滤膜成功进行了九种氨基酸和三种多肽的分离。

2.4 中药生产

中药成分复杂,通常含有无机盐、生物碱、氨基酸、有机酸、酚类、酮类、皂苷、甾族和萜类化合物以及蛋白质、多糖、淀粉、纤维素等。胶体和纤维素等非药用性成分或药用性较差的成分是高分子量物质,药物有效部位的相对分子质量一般较小^[18, 19]。传统的中药分离工艺复杂,效率低,且用于分离萃取的许多有机溶剂有毒。杭州水处理中心采用纳滤技术建造 12m³/d 的中药醇提取液和 24m³/d 的中药水提液^[20]。实践表明,纳滤浓缩后的酒精可直接回用,能耗也显著降低;纳滤对皂甙的截留率达 99.5% 以上,由于膜分离常温无相变,药品质量也更稳定;分离效率高,生产周期缩短到原来的 1/3~1/5。

3 饮用水

3.1 水的软化

美国佛罗里达州近 10 多年来新的软化水厂都采用膜法软化,代替常规的石灰软化和离子交换过程。如科氏^[21]在印第安河县(VERO Beach, Florida)设计并安装总产水为 11,355m³/d 的两套膜堆,用于降低当地井水的硬度、TDS 和减少潜在的三卤代甲烷的形成,该系统满足了当地的市镇用水供给,所用的纳滤膜为 TFC-S 8921 超低压聚酰胺复合纳滤(处理流程见图 2)。

3.2 制备饮用水

目前,大多数城市的给水水源均受到不同程度的污染,而自来水厂的常规处理工艺对水中有机物去除率不高,当采用氯杀菌消毒时,氯又会与水中的有机物会生成卤代消毒副产物。要制取清洁的饮用水,

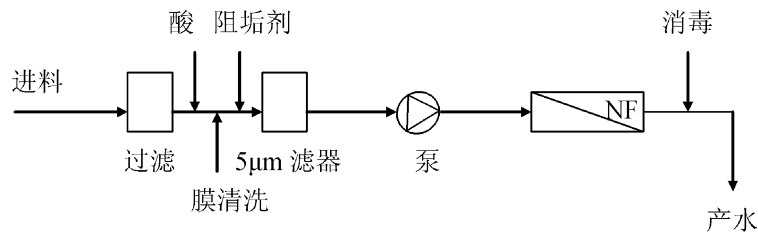


图 2 纳滤膜软化水流程示意图

Figure 2 Schematic diagram of soft water by NF membrane

必须将上述有害物质去除。法国 Mery-sur-Oise 水处理厂负责巴黎西郊 6,500 居民的饮用水供给。该厂于 1999 年安装纳滤膜水处理线(200,000m³/d),传统水处理法和纳滤系统的供水比例为 1:4。Peltier 等^[22]调查了 1999~2003 年间纳滤系统对供水水质的影响,研究表明:采用纳滤系统后水中的 DOC 降低到平均 0.7mg C/L,这样出水残留氯的含量由 0.35mg/L 减少到 0.1mg/L,管网中三卤甲烷(THMs)的形成比未采用纳滤系统时减少了 50%。另外,由于生物降解型溶解有机碳(BCOD)的减少,提高了产水的生物稳定性。Escobar 等^[23]在南佛罗里达州 30,000m³/d 的 NF 膜法水厂近一年的研究也证明纳滤膜能很好地去除 BCOD(去除率 97%),去除效果甚至与 BCOD 浓度和水质变化无关,但是不能去除可同化有机碳(AOC)。杜宇欣等^[24]对比了反渗透、纳滤和电渗析技术应用于农村饮水降氟的效果。研究表明:对于 TDS 含量较高的原水,采用反渗透和纳滤降氟设备可以在满足饮水降氟的同时,降低水中溶解性盐类的含量,改善口感。纳滤可使水氟降低至 1.0mg/L 以下(去除率为 75.32%),总硬度、TDS 也有不同程度下降(去除率为 64.9%);反渗透在降氟的同时去除水中大部分人体必需微量元素,不能作为长期饮用的优质水;对 TDS 含量低的原水可以考虑采用电渗析降氟。Kuan 等^[25]总结了不同膜过程的除砷效果(见表 2)。由于所用的纳滤膜带有负电荷,以负离子的形式存在的 As(V)的脱除效果明显比以质子化的形式存在的 As(Ⅲ)的好。为了保证去除所有的砷,一般要求将 As(Ⅲ)预先氧化成 As(V),但氧化剂(如氯等)对一些膜材料有破坏性,因此砷处理过程需注意选择膜的材料。

表 2 膜过程除砷

膜过程	As 去除率/%		
	As (total)	As(V)	As(Ⅲ)
RO	—	96~100	40~85
NF	95~99	60~100	10~75
ED	>95	—	—
UF	—	50~65	10~53

3.3 优质饮用水深度处理

生活污水、工业废水的排放加上农田径流、大气沉落等非点源污染直接或间接地造成了饮用水水源的污染,其中以有机污染最为严重。常规的絮凝沉淀、过滤、消毒净化工艺不能有效去除水中的病原菌、病毒等。因此,以去除饮用水中有机污染及有毒有害物质为目标的饮用水深度净化技术日益得到重视。李灵芝等^[26]以太湖水和淮河水为水源的两地水厂出水为对象,研究纳滤膜组合工艺对饮用水中 AOC 和致突变物的去除效果。纳滤膜对 AOC 的去除率为 80%,能确保饮用水的生物稳定性;对致突变物的去除率大于 90%,使 Ames 实验结果由阳性转为阴性。

4 废水处理

4.1 生活污水

生活污水一般用生物降解/化学氧化法结合处理,氧化剂用量很大,残留物多。若在它们之间加上 NF 环节,使能被微生物降解的小分子($M_w < 100$)透过,而截住不能生物降解的大分子($M_w > 100$),这样

可充分利用生物降解作用,节约氧化剂和活性碳用量。刘研萍等^[27]研制开发新型抗污染纳滤膜的纳滤中试成套设备处理生活污水,产水量 12L/min,回收率 85%,除盐率 72.8%。

4.2 城市垃圾填埋场垃圾渗沥液

垃圾渗滤液是一种成分复杂的高浓度的有机废水,直接排入环境会造成严重的环境污染^[28]。垃圾渗沥液 BOD/COD 比值低,可生化性差,生物处理效率不高;物化法处理成本较高,不适于大量垃圾渗沥液的处理。运用超滤—纳滤分离系统处理垃圾渗沥液,系统出水无色透明,COD 总去除率 99%,氨氮总去除率 90%,达到国家一级排放标准。

4.3 食品工业废水

袁其朋等^[29]采用 UF-NF 组合工艺对大豆乳清废水进行处理(见图 3)。经 UF 处理后的乳清废液。再经 NF 浓缩 10 倍后,浓缩液中总糖约有 77%被截留。其中功能性低聚糖水苏糖和棉子糖的截留率高达 90%以上。浓缩液中总糖含量达 8.72%,再经活性炭脱色和离子交换脱盐及真空浓缩,即可得到透明状大豆低聚糖糖浆(干基含量 76%)。该法的优点在于既解决了废水的排放问题,同时又通过回收利用有用组分,增加了经济效益。

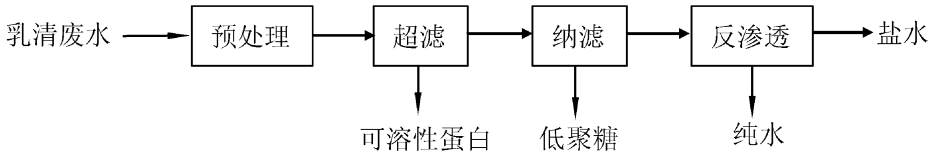


图 3 纳滤膜处理乳清废水工艺流程图

Figure 3 Flow scheme of soybean whey wastewater treatment by NF membrane

4.4 电镀废水

镀铬过程产生大量的铬酸废液,为达到接近零排放的要求,电镀工厂往往采取酸化、化学无害化、沉降和分离污泥等步骤。尽管经过了复杂的处理步骤,产水仍然含盐无法重新回用。Frenzel 等^[30]用膜法处理含铬废水,所采用的膜过程为:MF→NF→RO,系统运行 380 天,纳滤出水水质良好,出水经过 RO 抛光后完全达到回用标准。其中,纳滤过程的出水水质如表 3,从表中可见大部分有害离子被截留。

表 3 纳滤进、出水水质对比

Table 3 Compositions of exhausted rinsing effluent (feed) and permeate after treatment by NF

	进水	透过液	截留率/(%)
pH	2.5	5.7	
κ (mS·cm ⁻¹)	22 0	66	97
Al (ppm)	12	<0.2	>98
Cr _{total} (ppm)	1900	44	98
Cr(VI) (ppm)	1700	44	97
Cu (ppm)	709	<0.06	9.9
Fe (ppm)	210	<0.05	99.9
Na (ppm)	1160	152	87
Ni (ppm)	62	0.1	99.8
SO ₄ ²⁻ (ppm)	6600	49	99.3
Zn (ppm)	80	<0.02	99.9

4.5 造纸废水

在纸浆和造纸业中,匀浆、漂白和造纸等工序都需要大量的水。广泛采用的活性污泥法的产水还含有一定量的有色化合物、微生物、抗体、少量生物分解物和悬浮固体等,因此仅能被用于制造包装纸,不能用于更高级别纸的生产。另外,该法不能减少无机盐的含量,因此不能实现造纸过程水和废水的循环使用。Koyuncu^[31]对比了(1)造纸废水→纳滤和(2)造纸废水→活性污泥→纳滤两种处理方法的实用性,实验表明:两种方法的出水质量相似,第二种方法的产水通量很好,出水可以用于造纸。但由于纳滤产水

仍然含有一定量的单价盐,需要再增加低压反渗透装置脱除盐类才能保证水循环的质量。超滤—纳滤集成系统也在芬兰的 M-Real Kirkiniemi 造纸厂得到成功应用^[32],该厂在超滤系统后增加了纳滤膜处理系统(900m²),实现了造纸机排水经膜法处理后的直接回用。

4.6 炼油厂综合废水

炼油厂综合废水由三个来源构成:(1)炼油厂工艺废水;(2)成品油的脱水;(3)厂区生活污水。由于对石油化工行业的吨油耗水量的严格要求,炼油工业废水的深度处理回用被提到了重要地位,但常规生化处理方法很难完成。目前,超膜已开始显露优势。2004 年,中石油新疆克拉玛依炼油厂将纳滤技术应用于炼油厂综合废水的处理^[33],工艺流程见图 4。经过长期运行,纳滤膜元件的性能相当稳定,在 0.55MPa 的运行压力下,压力损失为 0.40MPa,产水量高于 60m³/h,滤和反渗透已经在部分炼油企业得到了应用,但运行压力低、产水水质好的纳滤回收率大于 75%,废水中 COD_{Cr} 的去除率可达 70%,且脱盐率稳定高于 90%,产水可直接回用。

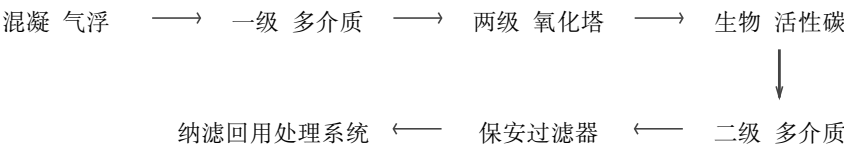


图 4 深度回用处理工艺流程简图
Figure 4 Flow scheme of advanced treatment and reuse of oil refining sewage

5 纳滤膜在有机溶液中的应用

现有纳滤膜一般只适用于水溶液中,应用于有机溶液的纳滤膜是新的研究方向,适用于从有机溶剂中回收有机金属催化剂,脱除植物油中的游离酸等^[34]。生物转化法在手性物质的合成方面越受到重视,但存在以下两方面的局限性:(1)大部分生物转化基和产品具有疏水性,但生物催化剂只有在水中效果最好。(2)反应基和产物对生物催化剂的活性具有抑制性。Rogelio 等^[35]将有机溶剂型纳滤膜生物反应器应用于生物转化反应,实验以香叶醇在面包酵母的作用下转变成 *R*-香茅醇的反应作为生物转化法的模型(见图 5)。研究表明:膜能够稳定两相界面,并能有效避免上述问题,应用该系统后反应物的产量很

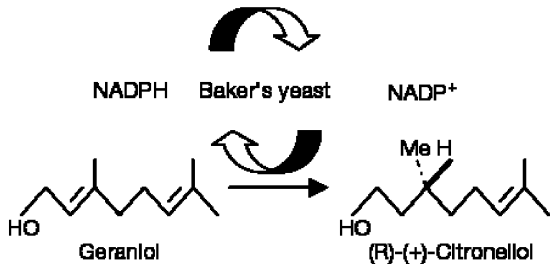


图 5 生物转化反应模型:香叶醇在面包酵母的作用下转变成 *R*-香茅醇
Figure 5 Model biotransformation: geraniol to citronellol by baker's yeast

大。动态动力学拆分法(DKR)是制备对映体纯乙醇的重要方法,消旋底物转化成手性产物的产率大于 50%。该技术的缺陷是动力拆分体系中的催化剂及溶剂与消旋体系的催化剂和溶剂往往互不相溶,如强碱性的消旋催化剂与酶类的拆分催化剂之间。Roengpithya^[36]将纳滤膜应用于该过程提出了“膜增强型动态动力学拆分”(MDKR)的新方法,非常有利于手性产物的富集,但现存问题是缺乏能在碱性条件下使用的耐有机溶剂型纳滤膜。Koris 等^[37]利用 SP15A 纳滤膜从粗大豆和葵花油中去除磷脂。纳滤分离过程对磷脂的截留率为 77%,往油中加入少量水可使磷脂截留率提高到 97%以上。

参考文献:

- [1] Bequet S, Abenzoza T, Aptel P, et al. Desalination, 2000, 131, 299~305.
- [2] Agarwal, Ashok K. USP, 6833073, 2004—12—21.
- [3] Kamada T, Nakajima M, Nabetani H, et al. Eur Food Res Technol, 2002, 214, 435~440.
- [4] 冯文亮, 王静, 贾晓江. 乳业科学与技术, 2003, 3, 102~106.
- [5] 叶晓, 易建平, 俞军, 等. 食品科技, 2006, 8, 106~109.
- [6] Versari A, Ferrarini R, Parpinello G P, et al. Trans IChemE, 2003, 81, Part C, 275~278.
- [7] 刘安虎, 韩永斌, 顾振新. 饮料工业, 2005, 8(1), 39~41.
- [8] Mucchetti G, Zardi G, Orlandini F, et al. EDP Science, Lait, 2000, 80, 43~50.
- [9] Eva S, Alberto L, Alvarez-Blancob S, et al. Desalination, 2006, 199, 345~347.
- [10] 韩少卿, 韩金智, 赵芹, 等. 膜科学与技术, 2006, 26(2), 33~40.
- [11] 肖文军, 刘仲华, 龚志华. 膜科学与技术, 2006, 26(1), 55~60.
- [12] 杨军浩. 上海染料, 2005, 33(3), 40~42.
- [13] Garem A, Daufin G, Maubois J L. Biotechnology and Bioengineering, 1997, 54(4,), 291~302.
- [14] 李杰妹, 周培艳, 王亚卿, 等. 化工学报, 2005, 56(4), 738~744.
- [15] 朱国民, 李菊芳. 过滤与分离, 2006, 12(2), 36~38.
- [16] 张道方. 海峡药学, 2005, 17(5), 15~17.
- [17] 何旭敏, 夏海平, 胡建华, 等. 精细与专用化学品, 2002, (19), 13~14.
- [18] 谢全灵, 何旭敏, 夏海平, 等. 膜科学与技术, 2003, 23(4), 180~187.
- [19] 王晓琳, 杨健, 徐南平, 等. 南京工业大学学报, 2005, 27(5), 104~110.
- [20] 纪晓声, 楼永通, 高从璿. 水处理技术, 2006(32)3, 11~14.
- [21] Peltier S, Benezet M, Gatel D, et al. J Water Supply: Research and technology-AQUA, 2002, 51(5), 253~263.
- [22] Peltier S, Benezet M, Gatel D, et al. J Water Supply: Research and technology-AQUA, 2003, 3(12), 193~200.
- [23] Escobar I C, Randall A A, Hong S K, et al. J Water Supply: Research and Technology-AQUA, 2002, 51(2), 67~71.
- [24] 杜宇欣, 王玉海, 李玉玲, 等. 环境与健康杂志, 2006, 23(4), 316~318.
- [25] Kuan-Seong Ng, Ujang Z, Le-Clech P. Environmental Science and Bio/Technol, 2004, (3), 43~53.
- [26] 李灵芝, 王占生. 重庆环境科学, 2003, 25(3), 17~18.
- [27] 刘研萍, 王琳, 王宝贞. 水处理技术, 2005, 31(1), 41~45.
- [28] 陈尧, 方富林, 熊鹰, 等. 膜科学与技术, 2005, 25(1), 44~49.
- [29] 袁其朋, 马润宇. 水处理技术, 2001, 27(31), 61~63.
- [30] Frenzel I, Stamatialis D F, Wessling M. Separation and Purification Technol, 2006, 49, 76~83.
- [31] Koyuncu I, Kural E, Topacik D. Water Science and Technology, 2001, 10 (43), 233~240.
- [32] Lien L, Simonis D. Proceedings of the TAPPI International Environmental Conference, Book 2, USA, 1995, 1023~1027.
- [33] 毕飞, 刘翔, 钱文英, 等. 流程工业, 2006, (10), 26~27.
- [34] Pereira A M, Timmera M, Keurentjes J. Desalination, 2006, 200, 381~382.
- [35] Rogelio V B, Ferreira F C, Jorge R F, et al. Desalination, 2006, 199, 429~431.
- [36] Roengpithya C, Patterson D A, Taylor P C. Desalination, 2006, 199, 195~197.
- [37] Koris A, Vatai G. Desalination, 2002, 148, 149~153.

Application Development of Nanofiltration Membrane Separation Technology

WANG Wei *, DU Qi-yun

(Key Laboratory of Hollow Fiber Membrane Material and Membrane Process, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160, China)

Abstract: Nanofiltration membrane is one of separation membrane. Applications of nanofiltration membrane technology in food industry, drinking water and wastewater treatment, and so on, were reviewed. And studies of its application in organic solution were introduced briefly too.

Key words: Nanofiltration membrane; Membrane separation; Application