

文章编号: 1004-0609(2004)S1-0310-07

纳滤膜及其应用^①

高从堦, 陈益棠

(国家海洋局 杭州水处理技术研究开发中心, 杭州 310012)

摘 要: 随着膜技术的发展, 20 世纪 80 年代出现的纳滤膜弥补了反渗透与超滤之间的空白。纳滤膜(nanofiltration membrane, NF) 又称“疏松型”反渗透膜。通常情况下, 膜的截留相对分子质量界限为 200~ 1 000, 与截留相对分子质量相对应的膜孔径为 1~ 3 nm, 故将这类膜称为纳滤膜。纳滤膜可以截留糖类等低相对分子质量有机物和高价无机盐(如 MgSO_4 等), 但对单价无机盐的截留率低(仅为 10%~ 80%), 具有相当大的透过能力。由于单价盐可以自由透过纳滤膜, 使得膜两侧因离子浓度不同而造成的渗透压差远远低于反渗透膜。在相同通量条件下, 纳滤膜所要求的驱动压力比反渗透膜要低得多。一般纳滤的操作压力为 0.5~ 1.5 MPa。由于纳滤膜的这种独特分离性能, 确定了它在水软化和低相对分子质量有机物纯化浓缩的地位。此外, 纳滤膜能有效去除许多中等相对分子质量溶质, 如消毒副产物、残留农药和某些色素等, 因而在水净化处理和脱色中得到广泛的应用。

关键词: 膜技术; 纳滤膜; 纳滤; 软化; 纯化浓缩; 水净化; 脱色

Nanofiltration membrane and its application

GAO Cong-jie, CHEN Yi-tang

(Research and Development Center of Water Treatment Technology, SOA, Hangzhou 310012, China)

Abstract: The appearance of nanofiltration membrane(NF) in 1980s fills in the gap between reverse osmosis(RO) and ultra-filtration. Normally, the molecular mass cutoff(MWCO) range is 200~ 1 000, and its relative pore size is 1~ 3 nm, so this membrane is called as NF. NF can retain low relative molecular mass organism and high-valent mineral salt, such as MgSO_4 , but to univalent mineral, its rejec is low(10%~ 80%), that is to say, univalent mineral salt can permeate NF freely, which makes the difference of permeation pressure between the two sides of the membrane due to different ion concentration, is much lower than that of RO membrane. In the same flux, NF requires much lower driver pressure than RO membrane. The operation pressure of NF is 0.5~ 1.5 MPa. The particular separating property of NF confirms its status in water softening and low relative molecular mass organism purification and concentration. Furthermore, NF can effectively remove many middle molecular mass solutes, such as the pre-substance of side-products of disinfection, residual pesticide, some pigment. So NF is widely used in water purification and decoloring.

Key words: membrane technology; nanofiltration membrane; nanofiltration; softening; purification and concentration; water purification; decoloring

1 纳滤膜

纳滤膜的成膜材料基本上与反渗透膜材料相同。商品化纳滤膜的膜材质主要有以下几种: 醋酸

纤维素(CA)、磺化聚砜(SPS)、磺化聚醚砜(SPES)、聚酰胺(PA)和聚乙烯醇(PVA)等。无机材料制备的纳滤膜目前也已商品化。

纳滤膜的制备工艺大致有以下几种: 相转换法、

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(29836160)

作者简介: 高从堦(1942-), 男, 中国工程院院士。

通讯作者: 陈益棠, 研究员; 电话: 0571-88935369

稀溶液涂层法、界面聚合法、热诱导相转化法、化学改性法等, 其中界面聚合法是制备纳滤膜最常用的方法。无机材料纳滤膜一般采用溶胶-凝胶法制备。

表 1 所示是部分纳滤膜的分离性能, 可以看出, 不同纳滤膜的分离性能不完全相同, 它们有一个共同点, 即膜对单价离子的截留率低, 对硫酸根

和蔗糖的截留率高, 膜对单价离子的截留率随溶液浓度的增高而迅速下降。膜的这些特性受控于膜材料、膜结构形态和膜的表面性质等。

2 纳滤膜组件

商业上用的纳滤膜组件中大多为卷式组件, 此外也有采用管式和中空纤维式的纳滤膜组件。表 2

表 1 部分纳滤膜的分离特性

溶液	NF40 ^①	NF70 ^①	NTR7450 ^②	NTR7410 ^②	NTR7250 ^②	SU600 ^③	SU200 ^③	AM M TM ④
NaCl	40	70	51	15	60	80	65	40
Na ₂ SO ₄	—	—	92	55	99	—	99.7	—
MgCl ₂	20	—	13	4	90	—	99.4	—
MgSO ₄	95	98	32	9	99	99	99.7	98
乙醇	—	—	—	—	26	10	—	—
异丙醇	—	—	—	—	43	35	17	—
葡萄糖	90	98	—	—	94	—	—	—
蔗糖	98	99	36	5	98	99	99	97

实验条件: ①质量分数 0.2%, 压力 0.4 MPa; ②质量分数 0.2%, 压力 1 MPa; ③质量分数 0.1%, 压力 0.75 MPa; ④质量分数 0.1%, 压力 0.7 MPa; 实验温度均为 25 ℃

表 2 部分纳滤膜组件的性能

生产厂家	组件	溶质	浓度/(mg•L ⁻¹)	压力/MPa	温度/℃	产量/(m ³ •d ⁻¹)	截留率/%
Film Tec	S-NF-70-400	MgSO ₄	2 000	0.48	25	47.00	95.0
Film Tec	S-NF-90-400	MgSO ₄	2 000	0.48	25	39.00	> 95.0
Film Tec	SR90-400	MgSO ₄	2 000	0.9	25	37.00	①
Film Tec	NF90-400	MgSO ₄	2 000	0.48	25	39.00	> 97.0
Film Tec	NF270-400	MgSO ₄	2 000	0.48	25	47.00	> 97.0
Film Tec	NF200-400	MgSO ₄	2 000	0.48	25	25.70	97.0
Film Tec	NF-2540	MgSO ₄	2 000	0.89	25	32.70	> 99.0
Film Tec	NF-4040	MgSO ₄	2 000	0.89	25	92.60	> 99.0
Film Tec	NF-400	MgSO ₄	2 000	0.89	25	381.50	> 99.0
Hydranautics	ESNAF-4040	NaCl	500	0.52	25	8.70	80.0
Hydranautics	ESNA1	NaCl	500	0.52	25	41.60	80.0
Hydranautics	ESNA2	NaCl	500	0.52	25	58.80	60.0
Toray	SV-320	NaCl	500	0.75	25	44.00	60.0
Trisep	8040-TS-40-TSA	NaCl	500	0.7	25	41.70	40.0
Trisep	8040-TS-40-TSA	MgSO ₄	500	0.7	25	41.70	98.0
Desal	DK8040F	MgSO ₄	1 000	0.75	25	30.28	96.0
Desal	DL8040F	MgSO ₄	1 000	0.75	25	38.86	94.0
Nitto	NTR-7250	NaCl	1 500	1.5	25	48.00	60.0
Nitto	NTR-7410	NaCl	2 000	0.5	25	25.00	10.0
Nitto	NTR-7450	NaCl	2 000	1.0	25	13.00	50.0
水处理中心 ^②	HNF-130	NaCl	20.9	1.0	25	17.80	45.7
水处理中心 CA ^③	CA-NF-4040	NaCl	2 565	1.25	25	7.70	37.0

①—以 35 000 mg/L 的海水为料液, 钙、镁、氯和硫酸根离子的截留率分别为 23%、76%、4% 和 98%; ②—中空纤维式; ③—卷式

所示是部分纳滤膜组件的性能。

3 纳滤膜应用

纳滤膜有 2 个特性: 1) 对不同有机物组分的分离性能, 分子量的“切割”范围约为 200~1 000; 2) 膜表面负电荷对不同电荷和不同价态阴离子的 Donnan 电位不一样。纳滤膜的独特性能决定了它的应用范围, 适用于下述 3 种情况下的物质分离: 1) 对单价盐分离的截留率要求不高; 2) 要求进行不同价态离子的分离; 3) 需要对高分子量有机物与低分子量有机物进行分离。

3.1 在水处理领域中的应用

3.1.1 水软化^[1-3]

纳滤膜的最大应用领域是水软化(包括饮用水)。钙、镁、碳酸根和硫酸根等两价离子是形成水硬度的主要原因。采用膜法软化代替传统的石灰软化和离子交换法软化的优点是无污泥, 不需要再生, 并且还可以完全除去悬浊物和有机物, 设备操作简便, 占地少, 而在投资、操作和维修费用方面与传统方法大致相同。因此, 美、欧、日等发达国家提出的水质改善计划中均将膜技术作为最有效的水净化手段, 尤其是纳滤技术, 在 21 世纪将成为水净化的首选技术。

地球上有人类生存的许多地方并没有人类可以直接利用的合格饮用水, 长期饮用高硬度水会影响人体健康。采用纳滤处理可使高硬度的陆源水软化成合格的饮用水, 例如, 美国佛罗里达州就有许多这样的纳滤水软化工厂。有很多地方的天然水含氟量高, 不适宜饮用, 需要除氟处理, 经纳滤处理后可以降到饮用水的水平。

3.1.2 除硝酸盐

在一些以农业为主的地区, 地下水中的硝酸盐含量很高, 不符合饮用水标准。可将原水先用纳滤膜处理除去二价离子, 膜透过水再进行离子交换处理除去硝酸盐, 使离子交换树脂的再生周期延长 2~3 倍。

纳滤膜的透过液中含有较高含量的硝酸钠(同时还有氯化钠)。当透过液经过离子交换柱时, 硝酸根离子被氯离子交换, 处理后的液体(无硝酸根)再与纳滤浓缩液混合, 得到硝酸盐含量符合饮用标准的饮用水。

3.1.3 污染地下水和地表水处理^[4-6]

工业废水和农业排放水造成水环境污染问题越

来越受到人们的关注。工、农业废水进入水域, 往往导致有机物含量增加, 这些有机物容易与水处理过程中的氯反应生成致癌性物质——三卤化合物 (THMS)。纳滤膜能够有效去除这些有毒有机物、痕量除草剂、杀虫剂、重金属、天然有机物及部分硬度、硫酸根等物质。在美国佛罗里达州采用纳滤膜脱除饮用水中 97% 的有机卤, 并且使总有机炭 (TOC) 含量降低 90% 以上。采用纳滤处理的优点是水质好而且稳定, 化学药剂用量少, 省劳力, 易于管理和维修, 并且基本上可以达到零排放。

巴黎 Mery-Sur-Oise 纳滤饮用水处理厂^[7](处理能力 $3.4 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{d}$) 由于用臭氧加活性炭处理的河水仍不能满足饮用水 (TOC 的浓度 $< 2 \text{ mg/L}$) 的要求, 1999 年 9 月法国巴黎北区采用纳滤对饮用水进行深度处理, 工艺流程如下所示:

河水 → 取水池 → 澄清 → 臭氧 → 絮凝 → 双层过滤 → 中间水池 → 低压泵 → 保安滤器 → 高压泵 → NF → UV → 与生化处理水混合 → 给水水池

3.1.4 海岛地下苦咸水脱盐

海岛地下苦咸水的特点是硬度高, 同时, 由于海水侵入等原因, 往往含盐量也很高。海岛淡水水源有限, 岛上居民长期以来饮用这种口味极差的地下苦咸水, 极大地影响了身体健康。山东长岛县南隍城地下苦咸水的处理采用纳滤工艺, 装置操作压力 0.75 MPa, 淡水回收率 56%, 每吨水耗电 1.43 kW·h。海岛地下苦咸水经纳滤处理后, 水质已符合饮用要求, 可直接供岛上居民饮用^[8]。

3.1.5 海上石油开采用水

在海上石油开采中, 通常需要往油井中灌注海水以提高原油的产量。但在某些海域中, 原油中含有较高的钡离子, 钡离子极易与海水中的硫酸根离子结合生成硫酸钡沉淀, 堵塞油井渗油层的渗油管道。纳滤膜能选择性地除去硫酸根离子, XP45 纳滤膜对海水中硫酸盐的脱除率在 75% 的水回收率下运行几乎保持不变 (98%~99%)。

3.1.6 海水淡化

海水经纳滤膜处理后, 可以除去 50% 以上的 TDS, 对 SO_4^{2-} 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 等硬度离子和总硬度的脱除率分别大于 98%, 95%, 89%, 77% 和 94%, 几乎可以完全脱除浊度和微生物。海水淡化与纳滤结合不仅可以减少海水高硬度和含各种杂质带来的许多问题, 而且还可以降低进入反渗透膜组件的海水盐度, 为提高海水淡化回收率创造了条件。图 1 所示是科威特·吉达海水淡化厂的纳滤—反渗透海水淡化工艺流程^[9]。

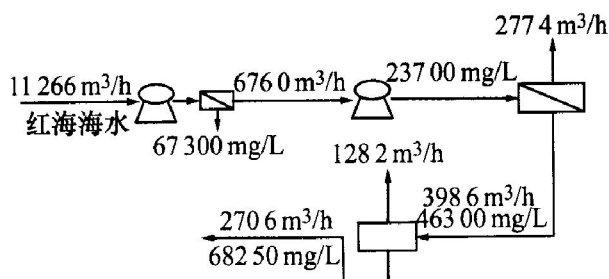


图 1 吉达纳滤—反渗透海水淡化工艺流程

3.1.7 高回收率海水淡化工艺简介

受渗透压影响, 反渗透海水淡化回收率只有 40%, 纳滤—反渗透组合工艺可使回收率大幅度提高。模拟设计计算基础, 海水浓度 35 000 mg/L, 反渗透膜的脱盐率为 99%, 纳滤膜的截留率为 50%, 反渗透采用同样的操作压力, 当反渗透回收率为 40% 时, 总的产水回收率可提高到 60%。新工艺流程见图 2。

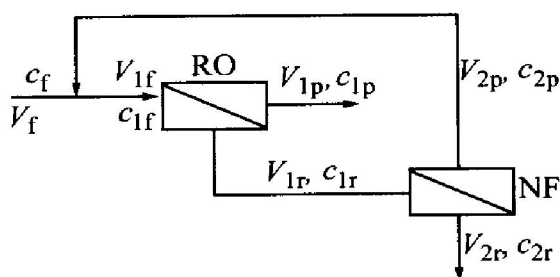


图 2 纳滤—反渗透海水淡化组合工艺

(V_f —进水量; V_{1f} —反渗透进水量;

V_{1r} —纳滤进水量; V_{2r} —浓水排放流量;

V_{1p} —产水量; V_{2p} —回流流量;

c_{1f} —反渗透进水浓度; c_{1r} —纳滤进水浓度;

c_{2r} —浓水排放浓度; c_{1p} —产水浓度; c_{2p} —回流水浓度)

3.2 医药和染料领域的应用^[10-15]

3.2.1 抗生素的纯化与浓缩

抗生素的相对分子质量一般在 300~1 200 之间。抗生素的生产过程为先将发酵液澄清, 用选择性溶剂萃取, 再通过减压蒸馏得到抗生素产品。

纳滤膜技术可以从 2 个方面改进抗生素的浓缩和纯化工艺:

1) 用纳滤膜技术浓缩未经萃取的抗生素发酵滤液, 除去水和无机盐, 然后再用萃取剂萃取。由于水、无机盐和小分子有机物透过膜进入渗透液, 抗生素得到预纯化和浓缩, 这样可以大幅度提高设备的生产能力, 大大减少萃取剂的用量。

2) 用溶剂萃取抗生素后, 用耐溶剂纳滤膜浓缩萃取液。透过膜的萃取剂可以循环使用, 这样可

以节省蒸发溶剂所需设备的投资及蒸发的所需的热能、改善操作环境。

纳滤浓缩抗生素发酵液工艺(见图 3)已成功地用于红霉素、金霉素、万古霉素和青霉素等多种抗生素的浓缩和纯化过程中。

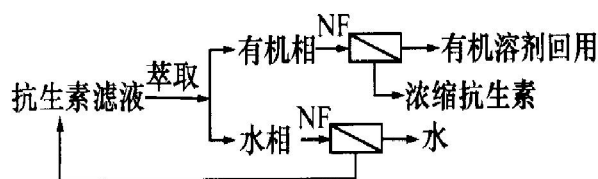


图 3 纳滤浓缩抗生素发酵液

3.2.2 多肽的纯化与浓缩^[16]

多肽是由蛋白质水解或氨基酸合成制得的。生产中, 通常采用色谱柱或层析从有机溶液或水溶液中纯化多肽产品, 然后进行蒸发浓缩。采用纳滤膜技术代替蒸发, 优点是可以低温操作, 效率高, 操作简便, 在浓缩过程中同时也纯化了多肽。

3.2.3 氨基酸的分离纯化^[17]

氨基酸是一种两性化合物, 分子中既有正电荷基团, 又有负电荷基团。净电荷从正电到负电的转变点的 pH 值称为氨基酸的等电点 (Isoelectric point, IEP)。可以通过控制 pH 的方法, 采用纳滤分离和纯化氨基酸。例如, 天冬氨酸、异白氨酸和鸟氨酸的等电点分别是 2.8、5.9 和 9.7。荷电型纳滤膜对氨基酸的截留率大小是 pH 值的函数。当 pH 为 5.0 时, 膜对天冬氨酸的截留率为 40%, 而对异白氨酸和鸟氨酸的截留率小于 10%。尽管截留率之间的差别不是很大, 但已足够实现不同氨基酸的分离。

纳滤在这方面的应用还可包括环糊精、乳酸酯、酵母、有机酸等的生产或副产物的回收。

3.2.4 染料脱盐浓缩^[18]

采用纳滤膜渗滤除盐和脱水浓缩过程相结合就可以达到活性染料的纯化和浓缩的目的。活性染料纯化和浓缩的工艺流程如图 4 所示。

料液首先用纳滤膜渗滤, 以除去所含的绝大部分无机盐。渗滤是在恒体积容量条件下进行的, 即

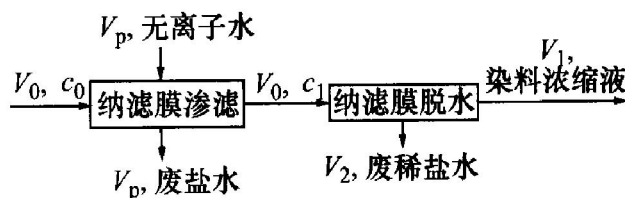


图 4 活性染料纯化和浓缩工艺示意图

(V —体积; c —浓度)

加入的无离子水的体积与纳滤排出浓盐水的体积相等。经几个渗滤循环以后,可使活性染料液中的盐含量降到 0.2% 以下。经第一步渗滤处理后的料液进入第二步的纳滤脱水过程,使纳滤浓缩液中的染料浓缩 2~3 倍,达到 20%~25%,然后送喷雾干燥,制成染料成品。

3.3 食品加工

在食品加工业中,纳滤膜用于食品废水的脱水浓缩和除盐。在这些应用中,纳滤膜技术有许多优于传统技术的特点:1) 能耗低、成本低;2) 加工温度低、热损小;3) 系统设计简单。许多食品加工过程中,产品(例如糖、蛋白质等)在冲洗、漂白、去皮等操作中大量损失,进入废水中。回收废水中的产品(涉及增收的产品和增加的处理费用)具有很大的吸引力。

3.3.1 奶酪加工^[3,19]

采用纳滤渗滤技术可以对含盐乳清进行脱盐和浓缩。可溶性盐透过纳滤膜,可以再利用或排放,截留的浓缩物则返回重新利用。在运行操作中,浓缩液不断返回贮槽,同时加入无离子清洗水,直到乳清中的盐度降到预定的水平。实践中一般是除去 90% 的盐,乳清浓缩 4 倍。

3.3.2 酵母生产^[20~23]

酵母通常是用糖类在嗜氧条件下发酵产生的。发酵液通过离心分离进行酵母富集,水洗,然后干燥制得酵母产品。生产过程中产生含糖类、深色素、较高生化需氧量(BOD)和化学需氧量(COD)的废水。这些废水通常采用先蒸发浓缩,然后通过生物处理来解决。新工艺改用微孔膜代替离心或传统过滤法富集酵母,经渗透脱水后制得干燥酵母。脱水产生的废水再用纳滤膜浓缩富集水中的糖类和蛋白质,干燥后作为牲畜的饲料。

纳滤也利于发酵溶液中有机的回收利用。发酵溶液在适当的 pH 范围内可以采用纳滤膜除去发酵液中的有机酸,截留的酵母菌、未发酵的糖和其他有用组分返回发酵罐中重新利用。这样不仅可以降低产物对发酵过程的抑制作用,同时也利于酵母菌和糖类的回收利用,提高产率,降低成本。

3.4 废水和污水处理与回用

3.4.1 重金属废水处理^[24]

在金属加工和合金生产中,经常需用大量水冲洗。这些清洗水含有一定浓度的重金属,如镍、铁、铜和锌等盐类。为了使这些含有重金属的废水达到

排放要求,传统处理方法是把这些金属处理成氢氧化物沉淀后除去。另外也可以采用纳滤膜技术,回收 90% 以上的废水,同时使重金属离子含量浓缩 10 倍,加以利用。长沙力元电镀泡沫镍漂洗水处理流程见图 5。设计漂洗水处理量为 50 m³/h。整个流程实现闭路循环,只需补充因蒸发损失的少量纯水和电镀槽消耗的化学品。

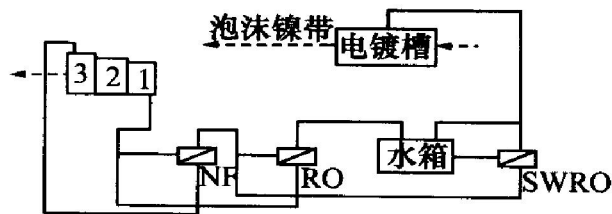


图 5 电镀泡沫镍漂洗水回收工艺流程

类似的重金属废水处理还有含铬废水和镀铜液的纳滤处理。

3.4.2 造纸废水处理^[25,26]

纳滤膜技术可以代替吸收和电化学方法去除纸浆厂冲洗水中的深色木质素和来自木浆漂白过程中产生的氯化木质素。因为这些水中污染物多为带负电的有色有机物,它们易被带负电的纳滤膜所截留。纳滤膜对色度的去除率大于 98%,并且对膜也不易产生污染。此外,在处理过程中,对阳离子(如 Na⁺)的脱除率并没有严格的要求。采用超滤/纳滤处理牛皮纸制造过程产生的废水效果很好,含有硫酸木质素等有色化合物的废水,采用纳滤膜处理效果也很好。

3.4.3 纺织废水^[27,28]

在纺织工业中,各种工艺过程中均需使用大量的水,如洗浆、洗涤、印染、漂白和成衣品料,这些过程产生的废水含有盐、染料、脂肪酸、表面活性剂、洗涤剂、油脂、氧化还原剂等各种污染物。废水的温度为 30~90 °C, pH 值为 4~12。采用微滤和纳滤混合膜过程回收棉纺纤维洗涤废水中氢氧化钠是可行的。微滤膜可以有效除去皂化蜡、果胶及无机络合物等悬浊物,而纳滤膜可以除去两价无机盐、色素和有机物,但能让氯化钠通过膜。含有氯化钠的纳滤透过液流经电解池,氯化钠电解成氢氧化钠,放出氯气,纳滤过程可以延长电解池的使用寿命。

3.4.4 有机废水处理^[29,30]

有机化工废水因含有无机盐,处理有一定难

度。采用纳滤处理可以截留高相对分子质量有机物, 让一价的盐溶液透过膜, 从而达到盐与有机物分离浓缩的目的。含有机物的浓缩液经湿氧化处理后, 透过液再生化处理。

乳清废水是一种极严重的污染源, 它含有 4% ~ 6% 氯化钠, 6% 固溶物和 45 000 mg/L 的 BOD。采用纳滤处理, 透过液可以再次循环使用或排放, 截留的固溶物可以加到常规的乳清生产线中。该工艺不仅解决了废水排放问题, 而且效益明显。

3.4.5 二级污水深度处理

纳滤过程在市政废水中应用日益受到重视, 市政总废水中最令人关注的是溶解固溶物的去除。传统的市政废水处理很难去除这些物质。反渗透和纳滤等膜过程可以去除有机物、色度和总溶解固溶物, 是废水资源化的一种重要手段。主要流程包括前段的常规处理, 如絮凝沉降, 过滤、消毒等, 后段采用膜法处理, 膜法的产水可用于工业过程用水, 地下水回注水、灌溉用水及路面和厕所的冲洗用水等。

3.5 其它应用

纳滤的应用领域还有很多, 以下是可能采用纳滤的潜在应用: 从含催化剂的溶剂中回收催化剂; 从废糖液中回收糖^[32]; 对糖脱色树脂再生液进行再处理, 回用水; 从废酸、碱溶液中回收酸、碱; 生产低盐淡色酱油等。

4 展望

纳滤在水软化、有机低分子(相对分子质量 200 ~ 1000)的分级浓缩、有机物的除盐净化和浓缩等方面具有独特的优点和明显节能效果。应用实践对纳滤膜也提出了新的要求: 提高膜的分离精度及提高膜的耐试剂、耐热、耐氧化和抗污染性能; 在工艺方面, 着重在集成工艺的开发和过程的优化, 扩大纳滤膜的应用领域。随着纳滤技术的进步, 它的作用将更加突出。

参考文献

- [1] Raman L P, Cheryan M, Rajagopalan N, Consider nanofiltration for membrane separations [J]. Chemical Engineering Progress, 1994, 5: 68 - 74.
- [2] Winston H W S, Sirkar K K. Membrane Handbook [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [3] Rautenach R, Groschl A. Separation potential of nanofiltration membranes [J]. Desalination, 1990, 77: 73 - 84.
- [4] Amy G L. Removal of dissolved organic matter by nanofiltration [J]. J Environmental Engr, 1990, 116: 200 - 208.
- [5] Tan L, Sudak R G. Removing color from a ground water source [J]. J Amer Water Works Assn, 1992, 84: 79 - 84.
- [6] Hofman J A M H, Beerendonk E F, Folmer H C, et al. Removal of pesticide and other micropollutants with CA. PA and ultra-low pressure RO membranes [J]. Desalination, 1997, 113: 209.
- [7] Ventresque C, Gislou V, Bablon G, et al. An outstanding feat of modern technology: the Mery-Sur-Oise NF treatment plant (340 000 m³/d) [J]. Desalination, 2000, 131: 1.
- [8] 张国亮, 陈益棠. 纳滤膜软化技术在海岛饮用水制备中的应用 [J]. 水处理技术, 2000, 26(2): 67 - 70.
- [9] Hassan A M, Al-Sofi M A K, Al-Amoudi A, et al. A new approach to membrane & thermal seawater desalination processes using nanofiltration membranes [J]. Desalination & Water Reuse, 1998, 8(1): 53 - 59; 1998, 8(2): 39 - 45.
- [10] Eriksson P K. Nanofiltration — what it is and its application, technical publication [M]. Minneapolis MN: Film Tec Corp, 1991.
- [11] 宋玉军, 孙本惠. 纳滤膜的应用 [A]. 中国膜工业协会首届学术报告会论文集 [C]. 北京: 中国膜工业协会, 1995. 270 - 274.
- [12] 吴麟华. 分离膜中的新成员 —— 纳滤膜及其在制药工业中的应用 [J]. 膜科学与技术, 1997, 17(5): 11 - 14.
- [13] 毕可英, 刘玉荣. 纳滤技术浓缩分离 1, 6 - 二磷酸果糖氯化钠水溶液的研究 [J]. 水处理技术, 1995, 21(5): 271 - 273.
- [14] 高以烜, 姚仕仲, 刘淑秀, 等. 膜分离 (UF、NF 及 RO) 技术对麻黄碱生产工艺改造若干技术问题的研讨 [J]. 膜科学与技术, 1998, 18(1): 27 - 29.
- [15] 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.
- [16] 严希康. 生化分离技术 [M]. 上海: 华东理工大学出版社, 1996. 115 - 120.

- [17] Raman L P, Cheryan M, Rajagopalan N, et al. Consider NF for Membrane Separation[M]. Chemical Engineering Progress, 1994. 68 - 74.
- [18] 高从堦, 张建飞, 鲁学仁, 等. 纳滤纯化和浓缩染料试验[J]. 水处理技术, 1996, 22(3): 147 - 150.
- [19] Technical Bulletin. Filtration Engineering[M]. New Hope M N, 1991.
- [20] 高以烜, 姚仕仲, 刘淑秀, 等. UF、NF 处理酵母废水可行性研究[A]. 第二届全国膜与膜过程学术报告会[C]. 杭州: 中国海水淡化和水再利用学会, 1996.
- [21] Cheryan M. Ultrafiltration Handbook[M]. Lancaster P A: Technomic, 1986.
- [22] Murakami K. Application of membrane technology for waste water treatment at a Baker's Yeast Manufacturing Plant[A]. International Conference on Membranes[C]. Chicago: The International Desalination & Water Reuse, 1990.
- [23] Schicher L R, Cheryan M. Reverse osmosis of lactic acid fermentation broths[J]. J Chem Technol Biotechnol, 1991, 49: 129 - 134.
- [24] 陈益棠, 王寿根, 楼永通, 等. 膜分离技术在电镀漂洗水处理中的应用(II) —镍的浓缩回收[A]. 2001 年膜技术应用国际会议论文集[C]. 上海 & 杭州: 中国膜工业协会, 2001. 429 - 435.
- [25] Bindoff A, Davies C J, Kerr C A, et al. The nanofiltration and reuse of effluent from the caustic extraction stage of wood pulping[J]. Desalination, 1987, 67: 455 - 460.
- [26] Zaidi A. Ultra and nanofiltration in advanced effluent treatment schemes for pollution control in the pulp and paper industry[J]. Water Sci Technol, 1992, 25: 263 - 271.
- [27] Treffry-Goatley K, Buckley C, Groves G. Reverse osmosis treatment and reuse of textile dyehouse effluents[J]. Desalination, 1983, 47: 313.
- [28] Porter J, Goodman G. Recovery of hot water, dyes and auxiliary chemicals from textile wastewaters[J]. Desalination, 1984, 49: 185.
- [29] 袁其朋, 马润宇. 膜分离技术处理大豆乳清废水[J]. 水处理技术, 2001, 27(3): 161 - 163.
- [30] 罗 敏. 第三届全国膜和膜过程学术报告会论文集[C]. 北京: 清华大学化工系, 1999. 527 - 537.

(编辑 李向群)