



科爱传播
KEAI COMMUNICATIONS

· 导读版 ·

膜科学与工程大全

Membrane Operations in Molecular Separations

分子分离过程中的 膜操作

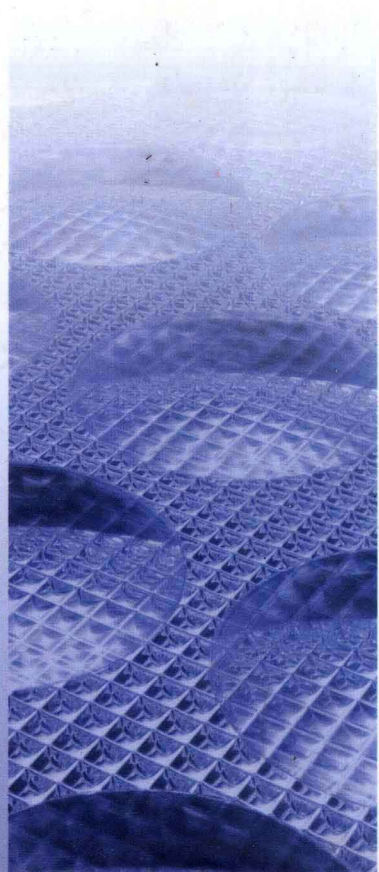
Enrico Drioli , Lidietta Giorno



原版引进



科学出版社



膜科学与工程大全

Membrane Operations in Molecular Separations

分子分离过程中的膜操作

Enrico Drioli , Lidietta Giorno

科学出版社

北 京

图字：01-2011-4503 号

Membrane Operations in Molecular Separations

Enrico Drioli, Lidieta Giorno

ISBN-13: 9780444532046

Copyright © 2010 by Elsevier Inc. All rights reserved.

Printed in China by Science Press under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 与科学出版社在中华人民共和国境内（不包括香港、澳门特别行政区以及台湾地区）发行与销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

图书在版编目(CIP)数据

分子分离过程中的膜操作=Membrane Operations in Molecular Separations:
英文/(意)德里奥利(Drioli, E.)等编著. —北京:科学出版社, 2012
(膜科学与工程大全)

ISBN 978-7-03-034501-1

I. ①分… II. ①德… III. ①膜—技术—英文 IV. ①TQ028.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 109675 号

责任编辑: 霍志国 田慎鹏

责任印制: 钱玉芬 / 封面设计: 耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 6 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2012 年 6 月第一次印刷 印张: 32 3/4

字数: 776 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

导 读

反渗透和纳滤

2.01 反渗透基础

早期提出的反渗透传递机理和模型描述了反渗透膜中溶质和溶剂透过行为,大致分为三类:(1)基于现象论方程(膜为黑匣子)的不可逆热力学模型,(2)基于膜为无孔或均相的溶解-扩散模型,(3)基于膜为多孔的孔道传递模型(优先吸附-毛细管流动模型、木村-索里拉金解析、摩擦模型、孔流及表面流模型)。本章对以上三类模型进行了较为详尽的描述和演绎,结合早期经典文献中的一些实验数据论述了压力、温度、浓度、料液流速和 pH 等操作条件对反渗透膜传递行为的影响。传递模型的好坏在于能否预测膜的溶质透过行为,基于这点可以认为反渗透不是一个过滤过程而是一个溶解-扩散过程,而且反渗透膜的截留率取决于膜材料,并从单组分盐、混合盐、单组分有机溶质、混合有机溶质、非水溶剂、膜电荷、膜污染及浓差极化现象等方面深入细致地描述了反渗透膜的传递行为。

(本章作者之一 Jonsson 教授关于反渗透研究发表了许多经典论文)

2.02 商业化 RO 和 NF 膜的制备、膜组件及其应用

近年来膜技术在材料(适于各种膜分离操作的高性能材料的分子设计)、形态(高性能膜的形态设计)、组件及组器(保持膜的高性能的组件及组器设计)、膜过程(工厂设计与过程优化)等 4 个方面均取得了巨大进步。工业用反渗透膜的制备可以分为非对称膜和复合膜,并予以评述。较为详细地综述了反渗透膜的应用进展,包括适于苦咸水淡化的低压膜、海水淡化膜(浓盐水回收系统和脱硼反渗透膜)、适于废水处理的抗污染膜等。最后介绍了几个典型集成膜系统,如用于海水淡化的 MF/UF+SWRO+BWRO、用于饮用水生产的 MF/UF+MF/UF、用于中水处理回用的 MF/UF+RO 和 MBR+RO 等集成膜系统。

2.03 反渗透膜系统脱盐的现状与(发展)趋势

近年来反渗透(RO)技术应用于海水淡化过程的研究热点主要集中在膜及膜过程、原料液预处理过程,以及降低 RO 过程的成本、能耗及环境影响等 3 个方面。目前对于 RO 卷式膜组件的主要改进包括承受料液压力增大(84 bar)、提出大规格卷式膜组件及提高总溶解固体(TDS)截留率或淡水产率等 3 个方面,其他方面如高硼酸截留,膜组件内部设计等。本章介绍了造成膜污染的几类物质、被污染膜组件解剖过程以及膜污染的表征方法。同时,作者提出根据污染物质的不同,可以选择合适的清洗方法,其中化学清洗对卷式膜最有效。介绍了预处理过程中水质参数及水中各类物质的分析方法,其中着重介绍了用于统计微小浮游生物及细菌的流式细胞仪的原理及测试方法。比较了不同时段不同区域敞开式及封闭式水源的原水水质变化及不同预处理过程处理效果。最后介绍了 RO 膜分离技术用于海水脱盐过程中降低能耗、环境影响及操作费用的一些研究进展,其中详细介

绍了两种新型功交换器——“PX pressure exchanger^{*}”和“DWEERTM work exchanger”用于回收浓海水中水压能量，降低单位能耗。

2.04 纳滤膜传递现象

对纳滤膜传递现象的研究需要考虑溶液跨膜通量，溶质通量和溶质的分布 3 个基本问题。在纳滤膜模型发展的过程中，陆续考虑了位阻效应、道南效应、静电排斥和介电排斥等分离机理的影响，最终形成了 DSP&DE 模型。该模型对单组分中性溶质，电解质甚至双组分混合溶质在纳滤膜中的截留率都有较好的预测效果。最后介绍了该模型的近似形式，模型参数的计算过程，并对纳滤膜体积电荷密度进行了评论。尽管对纳滤膜过程的传递现象研究已经发展了 40 多年，由于纳滤膜的纳米级孔径引起的特殊效应以及溶液体系中复杂的相互作用，使得这个过程很多问题依然悬而未决，如静电和介电参数（膜内的体积电荷密度和介电常数）的测量，混合离子溶液中膜电荷密度形成机理的确定等。随着测量手段和计算机技术的进步，对纳滤膜过程实现彻底完全的描述和预测将成为可能。

2.05 非水相体系纳滤技术

纳滤是指用于分离分子质量在 $200 \sim 1000 \text{ g mol}^{-1}$ 之间的二价离子、糖、染料等溶质的一种压力驱动膜分离操作。当前，有机溶剂纳滤分离操作（OSN）已受到越来越多的关注。鉴于有机溶剂对纳滤膜可能的化学腐蚀，人们已采用适当的聚合物（如聚酰亚胺、聚丙烯晴）和无机材料（如陶瓷）制备出了这种新型纳滤膜（OSN 膜）。根据膜结构的不同，OSN 膜可以分为一体化非对称膜和 TFC 复合膜。当前已经用于商品化的产品主要包括 Koch 公司生产的 SelRO MPF 系列、MET 公司生产的 Starmem 和 DuraMem 系列、SolSep 公司生产的 SolSep 系列。同时，Inopor 公司制备出了商品化的陶瓷膜系列。使用截留分子质量、溶胀、SEM、AFM、孔径分布接触角等手段可以对 OSN 膜物理化学特性及操作特性进行表征。虽然对有机溶剂纳滤分离操作技术的研究仍处于摸索阶段，但是它在精细化工、药物合成、食品加工以及炼油等领域具有广泛的应用前景。

超滤和微滤

2.06 超滤：基础与工程

超滤是在 $0.2 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 驱动压力下使液体溶剂和部分较小溶质透过膜的一种膜分离过程，主要应用于渗透产品的净化、截留产品的浓缩以及溶质提纯。根据不同的应用条件可以选择不同的膜组件，一般较小规模的过滤操作是正常流量过滤（NFF），而大多数商业化操作选择切向流过滤（TFF），这一过程包括渗透液体透过膜和在膜表面流动两种形式。其操作的费用较低且能广泛适用于各种条件。超滤技术基础知识主要包括表面极化、截留率、流量、传质系数和膜污染等。在掌握诸如超滤过程的单元操作、集成操作等知识的基础上，通过后续的诸如整批处理、操作步骤、过程监控和设备选择的系统性改良，可以使得超滤过程最优化，从而利于其工业放大。超滤过程仍存在着低通量、低生产量和集成性能欠缺等不足，这些可以通过对工艺技术和操作过程的改良而得到改善。

2.07 错流微滤基础

微滤（MF）作为膜工艺家族中的一种水处理技术，应用广泛。目前多用于一些通过

传统水处理技术无法使水质达到要求的水处理过程，还可作为膜生物反应器（MBR）的一部分用于废水处理和水的回用中。本章简介了 MF 膜的一般孔径范围及孔径分布情况，通过测试孔径分布来检验膜的质量；MF 膜可分离溶液中的胶质、乳状剂、细菌及微生物等，通常是由多种聚合材料或陶瓷制成的选择性薄膜，有管状膜、平板膜、卷式膜组件及中空纤维膜 4 种形式。然后介绍了错流 MF 过程的分离机理及过程中的促进传递现象，在错流 MF 过程中，浓差极化产生渗透压而导致有效跨膜压差（TMP）推动力减小；阐述了膜表面溶质浓度与溶剂通量的关系式，但对大分子和颗粒物质，两者关系不同，同时用无量纲参数来描述膜表面浓差极化，也正因此在 UF 和 MF 中，扩散系数非常小且边界层非常薄，这也就导致局部溶质浓度过高而引起膜污染，而膜污染主要是由吸附的大分子、凝胶或沉淀在膜表面的颗粒等造成膜孔堵塞造成的，而不是浓差极化引起的。同时膜污染也会引起阻力增加，因此需要理解其中的传递过程，建立合适的模型。根据膜过滤过程污染产生的原因及污染物种类综述了预防和减少膜污染的方法（主要是反冲洗），并分别考虑在膜污染不存在及存在两种条件下膜过滤过程的通量模型。在不存在膜污染条件下，溶质膜通量与膜结构、渗透物动力学粘度及渗透压有关，而其中渗透压与溶质浓度有关。在污染存在下，微滤过程主要是增加了可恢复阻力和不可恢复阻力，并建立了通量与不同污染形式（膜孔完全堵塞、孔内部堵塞、部分膜孔堵塞及滤饼过滤）之间的统一模型；由于孔内部堵塞是非常严重的膜污染，所以正确选择膜孔大小非常重要；根据体系物性及应用范围选择超滤和微滤过程；同时在超临界流量下虽然系统有轻微膜污染，但其运行较经济。

气体分离

2.08 用于气体分离的聚合物膜

聚合物膜因投资低、能耗少等优点在气体分离方面得到广泛应用。气体在聚合物中的传递机理包括其渗透特性，在橡胶态和玻璃态聚合物中溶解扩散机理，以及操作参数（温度、压力、浓度）的影响。本章详细介绍了用于气体渗透膜组件的基本框架和设计方法，阐述了单级设计的能量需求，气体的回收和多级分离过程。聚合物膜的工业应用主要体现在 H_2 的提纯、空气中 N_2 的分离、天然气中 CO_2 的分离、易挥发有机化合物的回收以及气体的干燥等。最后，作者对气体分离膜材料发展趋势进行了展望：（1）控制膜内化学反应增强选择性；（2）聚合物与吸附剂结合突破分离上限限制；（3）突破膜超薄皮层的约束；（4）扩大操作范围等。

2.09 用于易挥发性有机物回收的膜

利用膜法进行有机气体回收被誉为目前最尖端的膜分离技术，将膜技术与传统的吸收、吸附或压缩过程相结合用于易挥发性有机物回收将更具竞争力。有机气体分离膜主要为平板膜，膜组件主要为卷式或者信封式，用于易挥发性有机物回收的分离膜的制膜聚合物主要有聚甲基硅氧烷（PDMS）和聚辛基硅氧烷（POMS）两种。PDMS 膜对不含 N_2 和 O_2 的有机蒸气体系具有很好的分离效果，而 POMS 膜除了兼具 PDMS 膜的处理优势对含 N_2 体系也具有很好的处理效果。文中详细介绍了用于描述气体分离的模型及模拟方法，探讨了多组分渗透、非理想热力学、浓差极化、膜组件渗透侧与截留侧压力差、支撑层膜孔传递阻力等因素对其造成的影响。同时对膜组件模型化所涉及的问题及实现手段（C、

C++、Fortran、Java 等编程语言及 Aspen Plus、Fortran subroutines、Excel spreadsheets、Cape Open standard 等模拟工具)、膜系统的布局标准进行了阐述。最后就膜技术在汽油蒸汽回收、加油站蒸汽回收、聚乙烯粉体处理、聚烯烃、乙二醇及醋酸乙烯酯生产中的应用进行了介绍。

渗透汽化

2.10 渗透汽化基础与展望

本章首先简介了渗透汽化技术的基本原理、发展历程、应用范围及膜的设计思路,并详细介绍了能用渗透汽化分离的目标溶液,尤其是含有挥发性有机物(VOCs)的溶液。随后详细探讨了渗透汽化的分离机理及实验方法,其中主要介绍了渗透物分子在膜中的传递机理,对于多孔膜(如无机膜),主要有努森扩散、表面扩散、毛细管凝结及分子筛分机理,而对于无孔膜(主要是高分子膜),主要是溶解-扩散机理;同时根据膜内浓度梯度膜可分成溶胀层(溶解系数占主要因素)和非溶胀层(扩散系数为主导)。基于溶解-扩散机理,分别综述了渗透物在膜中的渗透、溶解和扩散行为,膜对组分的渗透选择性,溶解选择性和扩散选择性及各自影响因素;料液侧及渗透侧压力和膜厚对渗透物在膜中的渗透及渗透选择性有很大影响;溶解度参数可以预测组分在膜中的溶解性能但也存在一定的局限性;组分浓度、组分在膜中的自由体积分数(FFV)及介电常数都会影响组分在膜中的扩散行为;膜的选择性是溶解选择性和扩散选择性的结合,受组分浓度的影响。同时阐述了温度对溶解及扩散过程的影响和渗透汽化及吸附-解吸实验的实验方法等;最后探讨了在不同的应用中渗透汽化膜材料结构与性质的关系,通过结合膜材料与组分的溶解选择性和扩散选择性来选择分离膜,并通过加入基团提高亲和作用和调整孔结构,改变组成和相分离结构、交联等方式提高膜的稳定性来提高膜的分离性能。

2.11 用于有机液体混合物分离与纯化的选择性分离膜

传统方法分离有机液体混合物成本昂贵,而膜分离技术耗能低、效率高,因此可以广泛应用。膜分离技术应用于有机液体混合物的纯化和分离,应着重考虑膜化学结构的设计和物理结构的构造,而且膜制备的方法影响膜的结构。以全蒸发、渗透汽化、温控渗透汽化和高温高压下的渗透汽化为代表的有机液体混合物分离膜技术的基础知识包括:渗透方程、溶解扩散模型和表面扩散,有机液体混合物分离膜的主要应用于分离异构体、水/酒精、酒精/水、水/有机液体、有机液体/水、VOC/水、有机液体/有机液体。分离膜的结构设计基础是其选择性、膜材料的综合以及膜的制备方法;这些也在进一步的研究中。新型分离膜的制备以及开发除基于溶解扩散机理以外的创新的膜分离技术将是未来研究的重点。

2.12 用于渗透汽化过程的支撑型液膜

本章在渗透汽化的基本概念的基础上,介绍了液膜和支撑液膜的基本概念和应用,同时也介绍了支撑离子液膜的特点以及液膜目前在工业上的应用。渗透汽化是一种利用膜两侧化学势推动力,将原料液中的优先组分渗透过膜以后变成低压蒸汽的新型膜分离技术。传统的渗透汽化膜为均质聚合物膜和无机膜。由于增加分配系数或者膜中扩散速率都可以有效的提高渗透汽化膜的渗透性,且物质在液体中的扩散速率比固体中的大3~4个数量级,所以采用支撑液体膜就成为了一个渗透汽化分离膜研究的热点。然而,

液体支撑膜有两个缺点：溶剂损失和载体损失；支撑液体膜的稳定性大大限制了其操作条件，而支撑离子液膜能够改善支撑有机液膜稳定性差的缺点。支撑液体膜的实际应用较为局限，只见于发酵产品等分离。因此它更广泛的应用还需要在稳定性研究方面做更多的工作。

渗析

2.13 用于肾脏替代的膜技术研发进展

当前，伴随着世界人口老龄化的到来，高血压、糖尿病等疾病变得越来越普遍化，大量患者需要进行肾脏代替治疗（RRT）。透析是指通过对流或者扩散的方式使人体血液中的有害物质和多余的代谢废物排除体外，达到净化血液、保持体内酸碱平衡的目的。透析仪经历了几个发展阶段后性能不断趋于成熟、完善。本章作者对 RRT 过程所涉及的关键性问题进行了全面、详细、深入地总结。首先，作者对透析仪的核心部件——透析膜的性能提出了具体要求，并概述了可用于制备透析膜的若干种聚合物。生物相容性是人工透析膜制造过程中的核心问题，因此对透析膜进行临床前试验室一个不可或缺的步骤。作者对透析治疗过程中的 3 种操作模式：血液透析（HD）、血液过滤（HF）和血液透析过滤（HDF）分别进行了介绍，对大规模制备中空纤维透析膜的流程进行了总结。与传统高通量膜相比，高截留分子质量透析膜（HCO）对分子质量在 15~50kDa 的分子具有更好的渗透性能。因此，HCO 膜可用于治疗肾多发性骨髓瘤、急性肾衰竭等肾脏疾病。最后，作者对人工生物肾进行了简介并对其进行展望。

电膜过程

2.14 电膜过程：基础与应用

电膜过程一词可用于描述一系列工作原理和应用都大不相同的过程，然而它们的共同之处是都基于通过一张离子选择性渗透膜的与电流耦合的传质过程。电膜过程的核心部件是离子交换膜，分为单极膜和双极膜两种。单极膜（阴、阳离子交换膜）上带有某种电性的电荷，对电解液中与膜电性相反的抗衡离子具有通透性，同时截留住与膜表面电性相同的伴离子。将阴、阳离子交换膜层状组合即可得到双极膜。均质的离子交换膜主要通过先聚合再后功能化的方法制备，例如先聚合后磺化引入磺酸基团、或后叔胺化引入叔胺基团，得到的膜整体网络上均带有电荷。将离子交换粒子通过共混或溶解的方式分散到另一聚合物基体中可制备非均质离子交换膜。离子在膜与电解液中的传输动力是电化学势梯度，其速率与离子浓度、迁移率和作用力大小有关。在电场或浓度梯度的驱动下利用离子交换膜可以实现物质的分离。

用于苦咸水脱盐的电渗析过程已在上世纪中叶首次实现工业化，其他电膜过程如扩散渗析、Donnan 渗析、电容去离子化等目前还处于实验室研究阶段。电膜过程的主要应用包括盐溶液的脱盐、无机或有机物质的电化学反应，以及化学能与电能的转换等。

2.15 用于燃料电池的质子传导膜基础

聚合物电解质膜燃料电池（PEMFCs）是将化学能转化为电能的装置，通常以氢气或甲醇作为燃料，它在降低石油消耗和环境污染的需要日益迫切的今天得到越来越广泛的关注。为提高电池效率，其核心部件质子传导膜要求具有高的质子传导率，优良的机械性能、热稳定性和化学稳定性，同时具有低廉的价格以及对燃料气体极小的渗透性。Nafion

膜是稳定性卓越的商业化全氟磺酸膜的代表，其类似 Teflon 的主链侧基上所带磺酸基团组成的亲水相区构成了质子传输的通道。由于全氟磺酸膜在高温低湿度下质子传导率大大降低，且价格昂贵，研究者们通过添加纳米氧化物、杂多酸、磷酸锆等提高其性能，制备出 Nafion 复合膜，甚至开发出以磺化聚醚酮、磺化聚砜、磺化聚苯并咪唑为代表的非氟化质子传导膜材料，它们主要通过稳定性极好的聚合物基体材料的后磺化得到，但此类新型膜离商业化尚有一段距离。目前为此仍需要进一步发展新型、有效和低价的质子传导膜材料。

王晓琳
清华大学化学工程系

引言

20 世纪被描绘成一个众多资源密集型工业迅猛发展的时期，尤其是在一些亚洲国家，其特征还表现在全球人口增长、寿命延长以及生活质量水准的全面提高。伴随近代史的上述正面评价指标的还有水危机、环境污染和大气中 CO_2 排放量增加等负面评价指标。描述我们最新进展的改革的这些负面评价指标很大程度上取决于改革自身或针对改革的推动力是否缺少创新和既能控制又能减小世界范围工业发展中相对明显的负面指标的新策略。废水处理策略就是一个明确的例子，如图 1 所示，自 1556 年至今，相同理念基本上出现在各种废水处理系统中。

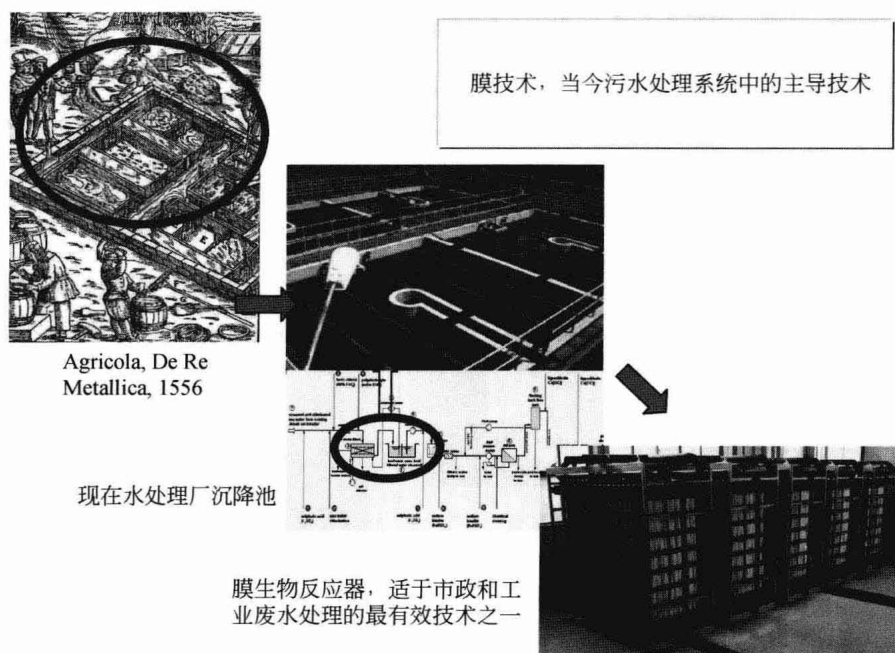


图 1 废水处理技术途径的前生今世

今天人们都意识到需要致力于知识密集型工业技术的发展，这将使得工业系统实现从基于数量基准向基于质量基准的转变成为可能。人类资本正在逐步成为这种社会经济改革的推动力，可持续发展的机遇来自于先进技术的应用。膜技术已在许多领域被认为是能致力于实现可持续发展的最有效技术之一（图 2）。

过程工程是解决当今及未来世界所面临的新问题的技术创新中最密切的学科之一。最近，从逻辑学上过程强化已被认为是上述问题的最好的过程工程答案。过程强化包括装置、设计以及过程开发方法的创新等，这些创新可望在化学和任何其他制造及加工过程中

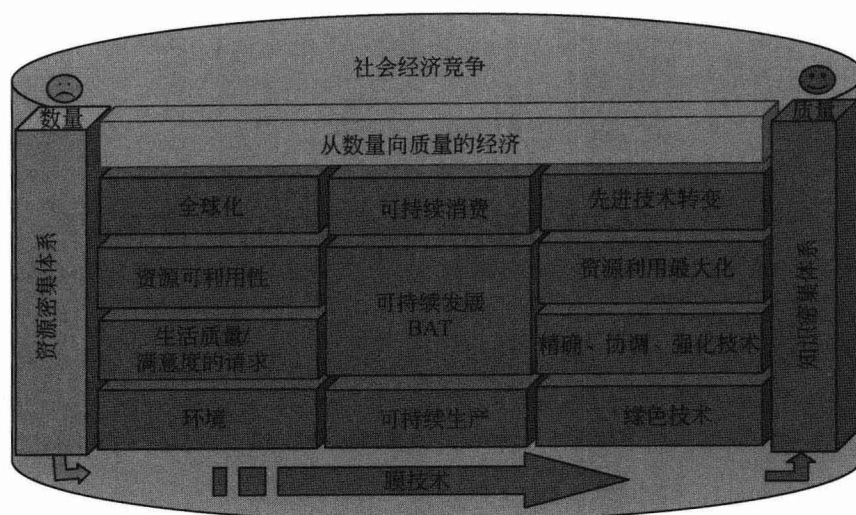


图2 现行社会经济和技术竞争正在促进向知识密集型系统的转变从而保持可持续发展

诸如生产成本、装置尺寸、能量消耗及废物产生的降低与遥控、信息流及过程灵活性的改进等方面获得实质性进展 (图3)。

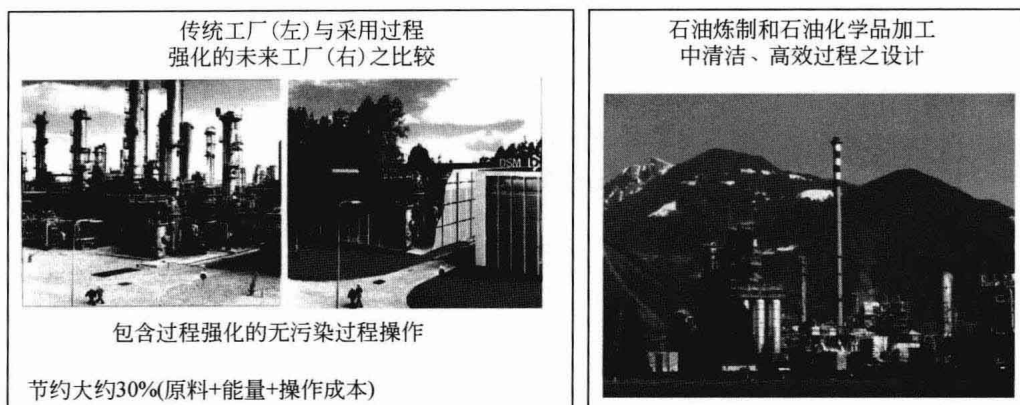


图3 过程强化策略。引自 Jean-Claude Charpentier, 全球化、可持续化与技术创新构架下的现代化学工程学, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 46, No. 11, 2007

然而如何有效实现上述策略并非显而易见。一个有趣和重要的情形是现代膜工程的持续发展,它的基本特征满足了过程强化的需要。膜操作的固有特性包括高效和操作简便、特定组分传递过程的高选择性和渗透性、集成系统中不同膜操作的相互兼容性、低能耗需求、操作过程中的良好稳定性和环境协同性、易于控制和放大以及大的操作弹性等,因此成为使得化学和其他工业生产过程合理化的令人关注的手段。许多膜操作实际上基于相同硬件(膜材料)区分于不同软件(方法)。传统的膜分离操作(反渗透(RO)、微滤(MF)、超滤(UF)、纳滤(NF)、电渗析、渗透汽化等)已经大量用于许多不同用途,并由此引导出一些诸如催化膜反应器和膜接触器等新的膜系统。由于膜所具有的协同性,

基于各种膜技术相适宜的分离和转化单元之特性，可以重新设计重要的工业生产循环从而实现高度集成的膜过程，我们正在面临这样的一个令人心旷神怡的大好时机。

膜技术已经在许多领域发挥着主导作用，列举几个引人注目的例子，如海水淡化（图 4）、废水处理与回用（图 5）、人造器官（图 6）。十分有趣的是，人们认识到今天得以工业规模运行的大多膜操作原本就存在于生命进化至今的生物系统和自然界中。实际上，大多生物系统可以看作为由具有分子分离、化学转变、分子识别、能量、质量及信息传递等性能的一系列膜组成（图 7）。

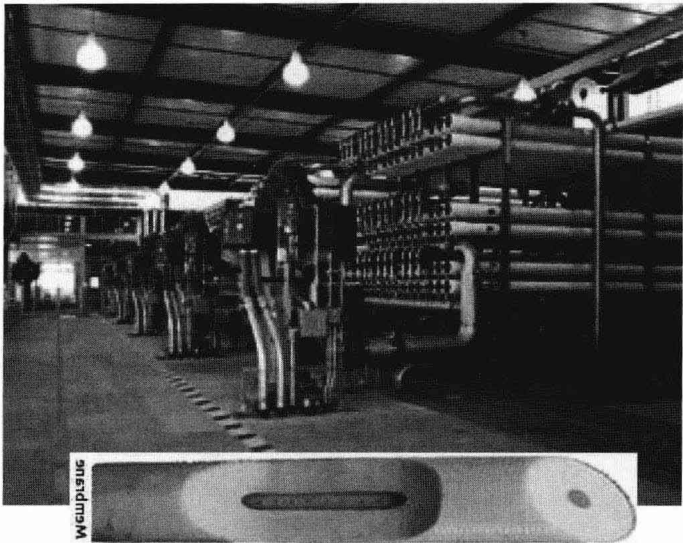


图 4 膜法海水淡化装置。美国得克萨斯州厄尔巴索市反渗透膜法淡化装置：世界最大的内陆淡水厂（ $104\,000\text{m}^3\text{d}^{-1}$ ）。制水成本小于 $0.36\text{ \$ m}^{-3}$ 。源自 <http://www.epwu.org/167080115>

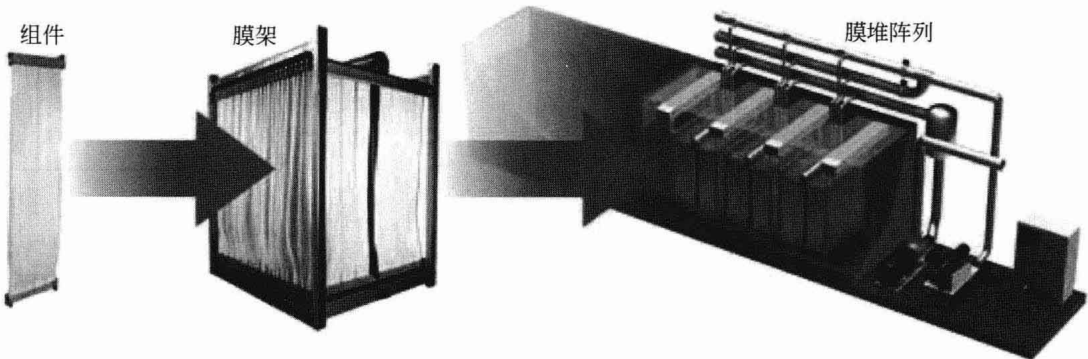


图 5 用于废水处理的浸没式膜组件。源自 ZeeWeed[®] 浸没式膜系统，<http://www.gewater.com>

如上所述的某些性能的膜操作已成功地在工业规模上得以实现。然而，我们目前还远远不能重现生物膜的复杂性和高效率，如集成各种功能、修复损伤能力、维持长期特殊作用、避免污染和各种功能衰退以及保持系统活力等。因此，新一代膜学家和工程师们必须致力于认识和重现我们十分熟悉赖以生存的神奇自然系统。

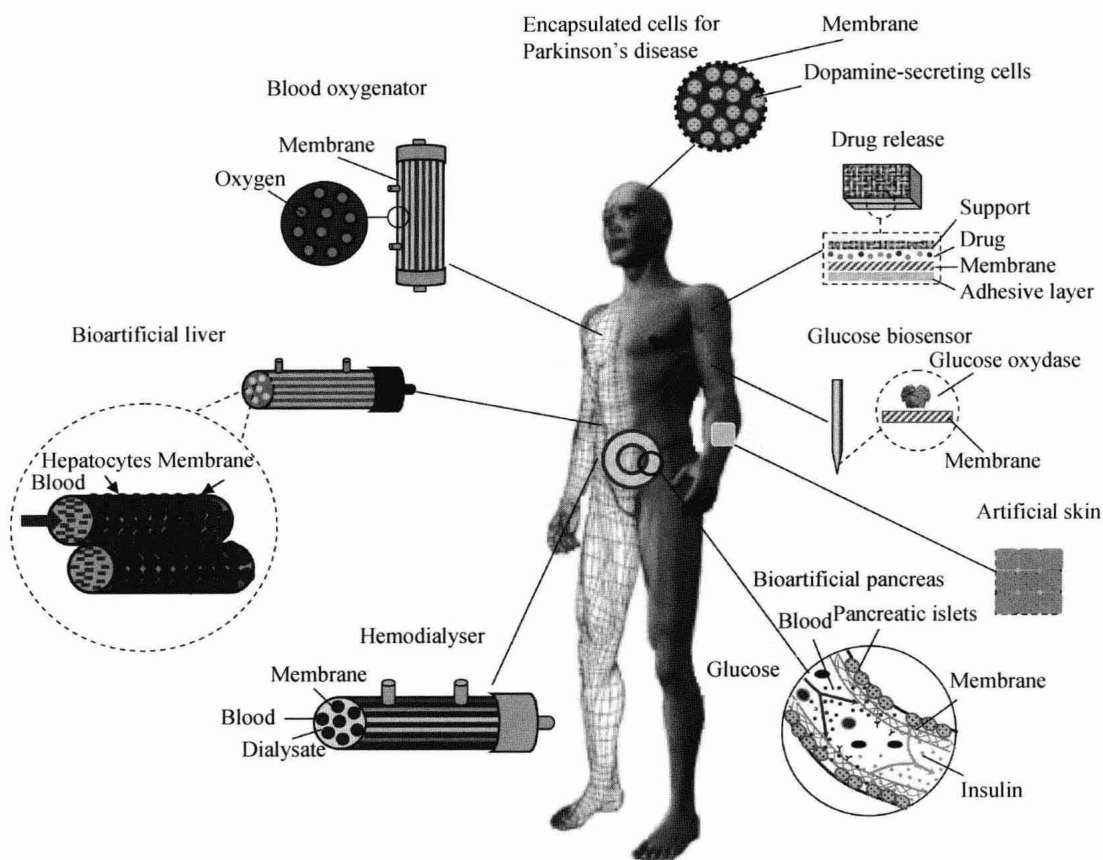


图 6 用于生物医学领域的膜与膜组件

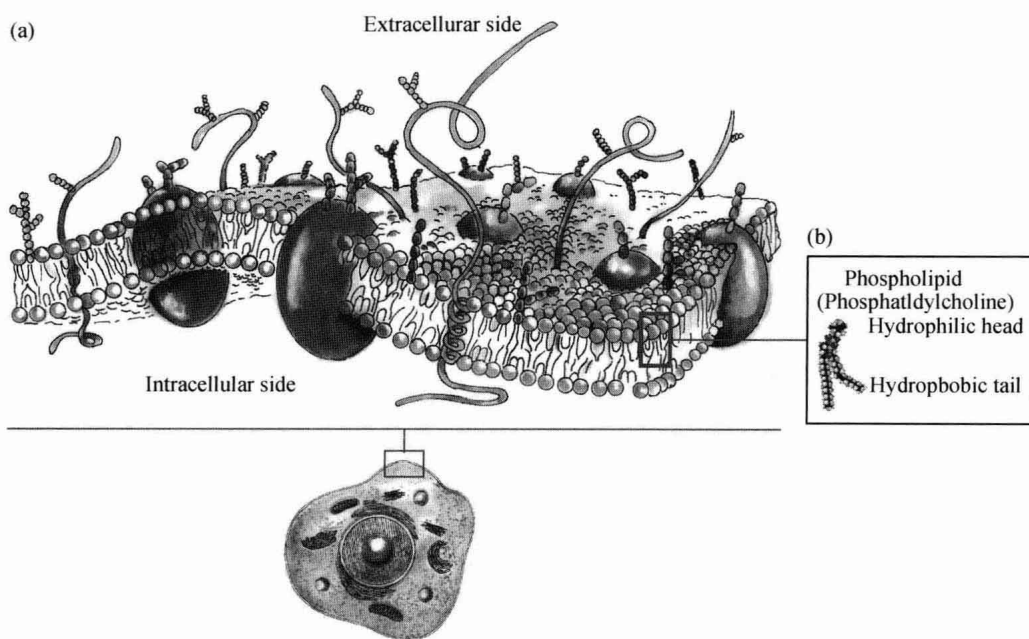


图 7 生物膜功能。源自 <http://www.mcgraw-hill.it/>

在《膜科学与工程大全》中，我们试图展示和讨论近年来膜科学与工程方面已取得的一些最具有重大作用的成果。

大全分四卷，作者是来自世界各地的资深科学家和博士生，内容覆盖了膜制备与表征的基础方面及其在各种单元操作中的应用，从分子分离到膜反应器中的化学转变和膜接触器中的物质和能量传递的优化。从战略层面划分应用，着重于膜技术在包括能源、环境、生物医学、生物技术、农副产品和化学制造等领域的应用。

今天，人们越来越关注具有重要应用前景的一些膜过程的重新设计，探究其用于工业生产的可行性。然而尚需付出强有力的努力向公众传播膜工程的有用知识，培养越来越多的年青一代熟悉这些有创造性、有活力、非常重要的学科的基础与应用。我们试图以这本大全做出我们力所能及的贡献。

第1卷，论述了膜科学与工程的传递现象基础，包括基于高分子、无机及混合基质膜材料表征分子分离过程中渗透性和选择性，以及基于这些材料制备各种可能的形态（板式、管式、微胶囊式等）的膜的基本原理，还论述了用于表征的常见的一些基本方法。

第2卷，阐述和讨论了最具重大作用的膜操作的基本原理及其应用，包括液相（MF、UF、NF 和 RO）和气相（气体分离和蒸汽渗透）压力驱动系统以及其他分离过程，如渗析、渗透汽化、电化学膜系统等。

第3卷，综述了大多发生在生物系统中的分子分离与化学转化相结合的最新进展。有一点很重要，就是切记膜反应器和催化膜系统的工业规模发展还没有达到众所周知的压力驱动膜过程的水平。然而，对膜反应器与膜生物反应器能够突飞猛进发展的期许是一件非常意味深长的事情。事实上，对浸没式膜反应器作为 BAT（最有效技术）在市政污水处理与再利用方面的认可已经被证明获得了引人关注的成功。上述系统在生物工程和生物医学方面应用的潜力同样备受关注，这里诸如人造肾脏和胰腺等人造生物器官在某种程度上已经达到临床试验水平。

第4卷，涉及一些相对较新的膜操作的描述，这些操作中并不要求膜具有选择性。就像膜接触器一样，膜的作用旨在优化不同相态之间的最佳质量与能量传递行为。膜蒸馏、膜结晶、膜乳化、膜汽提以及膜洗涤等都是现代过程工程中新的膜单元操作的典型案例。为了这些系统的进一步应用，尚需开发具有高度疏水、纳米结构及新型复合构造的新材料。

如果将书中所述的所有不同膜操作相结合并应用于某个工业生产循环，可能设计出完全创新的工业转化和集成膜操作，这里过程工程师可以根据过程强化策略逻辑学利用人造膜系统潜能实现工业可持续发展。

同样应该引起人们关注的是，不仅工业部门将从上述途径中获益，而且复合人造器官的设计和通常意义上的再生医学的发展亦有可能从上述相同策略中获益。

致谢

在过去的2年里，编著这4卷《膜科学与工程大全》实在是一件十分有趣而快乐的工作。

作。为了实现我们的目标一直与许多同仁们相互沟通和讨论，在此感谢为我们提供有效合作的所有同仁们。

我们特别感谢我们的年轻同事 Enrica Fontananova 博士，她从一开始就帮助协调我们的工作，与所有稿件作者保持联系，她在膜科学与膜工程方面的卓越知识和经验对她顺利开展上述工作是十分必要且富有成效的。

我们希望这 4 卷大全能有助于研究员、工程师以及技术人员增长膜科学知识和兴趣。

Enrico Drioli and Lidietta Giorno

(王晓琳 译)

Contributors to Volume 2

G. Alberti

Università di Perugia, Perugia, Italy

S. Bandini

Università di Bologna, Bologna, Italy

T. Böhrer

Gambro Dialysatoren GmbH, Hechingen, Germany

T. Brinkmann

GKSS Research Centre Geestacht GmbH, Geestacht, Germany

L. Bruni

Università di Bologna, Bologna, Italy

S. Casas

Water Research Center of Veolia Environnement, Maisons Laffitte, France

M. Casciola

Università di Perugia, Perugia, Italy

E. Favre

Nancy Université, Nancy, France

R. Field

University of Oxford, Oxford, UK

D. Gorri

Universidad de Cantabria, Santander, Spain

G. Jonsson

Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark

B. Krause

Gambro Dialysatoren GmbH, Hechingen, Germany

M. Kurihara

Toray Industries, Inc., Shiga, Japan

J. Leparc

Water Research Center of Veolia Environnement, Maisons Laffitte, France

A. G. Livingston

Imperial College London, London, UK

H. Lutz

Millipore Corporation, Billerica, MA, USA

F. Macedonio

University of Calabria, Arcavacata di Rende (CS), Italy

K. Nagai

Meiji University, Kawasaki, Japan

M. Neubauer

Gambro Dialysatoren GmbH, Hechingen, Germany

K. Ohlrogge

GKSS Research Centre Geestbacht GmbH, Geestbacht, Germany

I. Ortiz

Universidad de Cantabria, Santander, Spain

L. G. Peeva

Imperial College London, London, UK

S. Rapenne

Water Research Center of Veolia Environnement, Maisons Laffitte, France

P.-J. Remize

Water Research Center of Veolia Environnement, Maisons Laffitte, France

M. Sairam

Imperial College London, London, UK

J.-C. Schrotter

Water Research Center of Veolia Environnement, Maisons Laffitte, France

M. Storr

Gambro Dialysatoren GmbH, Hechingen, Germany

H. Strathmann

University of Stuttgart, Stuttgart, Germany

H. Tomioka

Toray Industries, Inc., Shiga, Japan

T. Uragami

Kansai University, Osaka, Japan

A. Urtiaga

Universidad de Cantabria, Santander, Spain

J. Wind

GKSS Research Centre Geestbacht GmbH, Geestbacht, Germany

C. Zweigart

Gambro Dialysatoren GmbH, Hechingen, Germany