



科爱传播  
KE'AI COMMUNICATIONS

·导读版·

膜科学与工程大全

Membrane Contactors and  
Integrated Membrane Operations

# 膜接触器 和集成膜操作

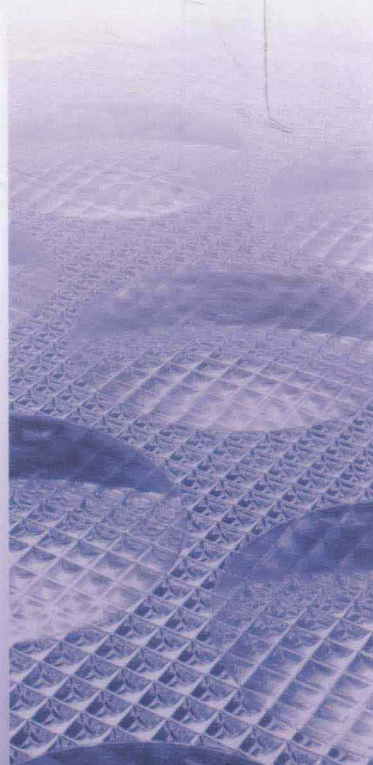
Enrico Drioli , Lidietta Giorno



原版引进



科学出版社

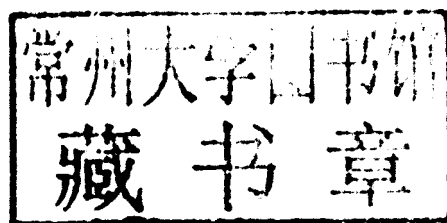


膜科学与工程大全

Membrane Contactors and Integrated Membrane Operations

# 膜接触器和集成膜操作

Enrico Drioli, Lidietta Giorno



科学出版社

北京

图字：01-2011-4501 号

**Comprehensive Membrane Science and Engineering: Book4**  
**Membrane Contactors and Integrated Membrane Operations**

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

膜接触器和集成膜操作 = Membrane Contactors and Integrated Membrane Operations: 英文/(意) 德里奥利 (Drioli, E.) 等主编. —北京: 科学出版社, 2012

(膜科学与工程大全)

ISBN 978-7-03-035280-4

I. ①膜… 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 187260 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 8 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2012 年 8 月第一次印刷 印张: 21 3/4

字数: 512 000

**定价: 135.00 元**

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 导 读

## 膜接触器基本原理

### 4.01 膜蒸馏和渗透蒸馏

膜蒸馏是一种非等温分离技术。它是将微孔膜置于膜器中，膜两侧分别为加热的水溶液及浓缩液。与通常的膜过程不同，膜蒸馏中微孔膜起到促进膜两侧溶液传质传热的作用，而非截留和过滤。这要求膜蒸馏制膜材料应具有热稳定性、高疏水性、多孔性等性质，目前常用的膜蒸馏制膜材料有聚丙烯、聚偏氟乙烯及聚四氟乙烯。大部分商业化的膜蒸馏微孔膜最初的生产目的都是用于微滤过程，目前已有学者研究通过在铸膜液中加入添加剂、使用共聚物及表面涂覆、接枝、等离子体处理等方式制备适合用于膜蒸馏的微孔膜。膜蒸馏主要分为直接接触式膜蒸馏、气体吹扫膜式蒸馏、空气间隙式膜蒸馏及真空式膜蒸馏。渗透蒸馏与膜蒸馏非常相似。渗透蒸馏中微孔膜也起到促进膜两侧溶液传质传热的作用，同时推动力都为膜两侧蒸汽压的不同。不同点在于膜蒸馏中蒸汽压的不同主要由于膜两侧的温度梯度引起。而渗透蒸馏是由于使用具有较高渗透压的渗透液引起。膜蒸馏及渗透蒸馏可应用于纯水制备、污水处理、农产品及生物溶液的分离与纯化。

### 4.02 膜结晶技术

膜结晶技术就是采用膜技术作为一种有效而创新的手段来改进工业结晶过程。最早的膜结晶研究追溯到1986年人们通过RO中空纤维膜组件中草酸钙的沉淀模拟肾小管中结石形成的初期阶段。根据膜结晶过程中的传质机理，可以分为两种情况，一是溶剂蒸发膜结晶（从结晶溶液中以气相形式移除溶剂），另一种是非溶剂膜结晶（在结晶溶液中添加非溶剂）。溶液饱和度是结晶的驱动力，成核过程和结晶速率都受到其影响。通过采用适当的膜及操作条件，可以有效控制结晶动力学过程（结晶度、结晶形貌和结构）。结晶过程通常由膜表面诱导的异相成核主导，而均相成核因自由能垒较高往往不会发生。膜结晶技术的一个重要应用是水处理过程，并逐渐成为解决饮用水需求问题的具有经济竞争力的手段。

### 4.03 膜乳化技术

乳液是两种或两种以上不相容的溶剂所形成的混合物，其中一种相（分散相）分散在另一种相（连续相）中。采用膜制备乳液的过程被称之为膜乳化过程，分散相经过膜孔进入连续相形成液滴，分散相通量、壁面剪切应力、跨膜压差、温度等参数会影响液滴的大小、均一度以及产率。膜乳化过程可分为直接膜乳化和预混膜乳化两种方式。直接膜乳化过程中，分散相通过膜孔进入连续相中形成乳液；预混膜乳化过程中，先将分散相与连续相预混，再经过膜孔作用形成乳液。膜乳化的操作过程可分为动态和静态两种方式。膜乳化技术在膜材料、模型、以及满足乳化应用要求的设备等方面还需要更多的改进。目前膜乳化过程可以制备油/水体系、水/油体系以及多相体系的乳液，通过微胶囊技术进一步制备颗粒，这种技术可应用于制备诸如墨粉、光记录、除草剂、动物驱虫剂/杀虫剂、口服/

注射药品、化妆品、食品添加剂、粘合剂、固化剂、活细胞封装等。

#### 4.04 液膜

液膜过程于1968年首次用于碳氢化合物的分离，主要分为乳状液膜、支撑液膜与反萃支撑液膜等三种。当两个互不相溶的液相组成的稳定乳液分散于连续的外部相中时，即形成了乳状液膜。外部相中的目标物质穿过液膜进入内部相，遵循两种传质机理：一是物质在膜中的扩散，以及依靠载体转运的载体促进运输。支撑液膜是将液膜相嵌入到固体多孔支撑体中作为分离的介质，其过程遵循载体促进运输的机理。有机液膜溶液用量少是支撑液膜的重要优点，然而有机溶液的逐渐渗漏会导致液膜的不稳定。反萃支撑液膜是对支撑液膜的进一步改进，其分离过程中有机溶液从膜孔中延伸出来，对支撑体孔中的溶液提供恒定速度的供给，从而解决了支撑液膜中溶液渗漏的问题，极大地提高了支撑液膜的稳定性。乳状液膜的应用包括废水中锌、苯酚、氰化物等物质的去除处理等，支撑液膜主要用于金属离子的去除、抗生素及一些生化药剂的回收以及核工业废水处理等，反萃支撑液膜的应用领域与支撑液膜近似，同时在生化过程中有很大的应用潜力。

各种工业部门中的集成膜技术：实例

#### 4.05 各种工业部门中的集成膜技术

膜过程主要包括微滤 MF、超滤 UF、纳滤 NF、反渗透 RO、电渗析 ED、渗透汽化 PV、膜蒸馏 MD、膜接触器等。基于膜过程的集成操作，主要包括膜过程结合传统单元操作作用于一个分离单元，膜过程结合传统单元操作集成在一个膜组件中，膜过程集合反应作用于一个单元操作以及膜过程集合反应集成在一个膜组件中。各类集成膜操作过程在不同工业中的应用主要包括纺织业、制革业、造纸业、金属加工业、电子工业、制药业、饮料业、果浆业、制酒业、啤酒业、芳香业、制糖业、蜂蜜业、蔬菜加工、可食用油生产、奶业、肉类产业和海产品产业。其中压力驱动膜分离过程（微滤、超滤、纳滤和反渗透）凭着其相对于传统分离操作在选择性和能耗方面的明显优势应用最为广泛，渗透汽化因其适合于有机物的分离广泛应用在与食品相关的行业。不得不说的是，虽然膜过程有着传统分离操作不能比拟的优势，但是由于膜的高成本和易受污染使其应用存在一定限制，因此如何降低膜过程的成本成为了未来研究与开发的重点。

#### 4.06 食品和发酵工业中的膜技术基础及应用

膜技术因其高选择性、低能耗、环境友好、易于放大等优势在水处理领域有着广泛的应用，除此之外，其在农产品及生物技术领域也显示出了广阔的应用前景。例如，基于不同原理的微超滤、反渗透、渗透汽化、电渗析等膜单元技术在乳品、发酵饮品、食品添加剂、糖、谷物等食品加工业以及抗生素、维生素等生物产品的浓缩净化中都有着良好的应用。今后，膜技术在食品与生物领域应用中的分离机制及经济效益等将成为主要的研究方向。

#### 4.07 水处理过程中的膜生物反应器

膜生物反应器技术是一种新型的废水处理技术。膜生物反应器可分为外置式膜生物反应器和浸没式膜生物反应器，其工艺设计主要从生物反应器，膜组件和曝气系统等方面进行。膜生物反应器被广泛的应用于市政污水，工业废水以及饮用水的处理，在有机物的去除、脱氮除磷等方面都有较好的性能。膜污染的机理和控制手段是膜生物反应器技术的一

个主要难题，废水预处理、改善生物特性、优化操作条件和开发新型膜材料是控制膜污染的一些主要手段。为了加强膜生物反应系统的理论研究，人们也建立了许多数学模型，包括有机物去除模型、生物动力学模型、膜污染模型和综合模型等。

#### 4.08 膜技术：石油炼制和石油化学工业中的最新应用

石油化工行业中，过程集约化（包括创新设计、过程优化等）可以缩小规模、提高原材料和能量利用效率，从而满足不断提高的环境标准要求。能实现这一过程的有效方法就是现代膜工程。由于膜过程相比于传统的分离技术先进：不需要能量密集型的相变、潜在的昂贵的吸附剂以及很难处理的溶剂等，因此膜工程是一新型绿色工程，在分子分离、化学传递（膜反应器）和质量与能量传递的最优化中都引起广泛关注。目前在石油工业中，膜应用的重点是炼油和化工厂中氢气回收；在聚烯烃生产中，膜应用也可以进行烯烃的回收；在润滑油制造中，膜可以实现溶剂的回收。在炼油厂中膜应用比较成功的将是去除汽油中的芳烃。对于炼油与石化领域中气体分离过程，膜法气体分离（包括膜接触器、膜反应器）成功应用于氮气分离与生产、天然气脱硫、CO<sub>2</sub> 的分离以及聚烯烃生产过程中单体的回收等；对于液态不同有机溶剂混合物的成功分离采用全蒸发（PV）、纳滤。水处理采用的压力驱动膜通常用来分离液体流中不同尺寸的物质，该过程包括微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）以及膜生物反应器。为了使水处理更有成效，集成或杂化系统可以将不同物理、化学和生物的方法相结合，例如 UF/RO 集成膜系统成功应用于炼油厂的水处理。

#### 4.09 用于海水和苦咸水淡化的膜系统

地球表面大部分区域为水体覆盖，但其中可被人类有效利用的淡水资源却十分紧缺，淡水资源问题也日益严重。对海水和苦咸水脱盐是解决淡水资源危机的一个有效的途径。传统的脱盐方法如蒸馏等耗能较大，因此清洁节能的膜技术在海水和苦咸水脱盐领域逐渐得到重视。目前在海水和苦咸水脱盐领域，实用较为广泛的是电渗析和反渗透膜技术，而针对一些特殊的水质，微滤、超滤和纳滤技术也被用于脱盐分离；同时，纳滤技术还多被用于反渗透脱盐的预处理过程。除此之外，一些多种膜技术的集成系统逐渐用于脱盐过程。从长远意义上看，集成的膜系统具有方便灵活，实用性强等优点，是高效脱盐和制备高质量淡水的技术发展方向之一。

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  $\text{CO}_2$  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。

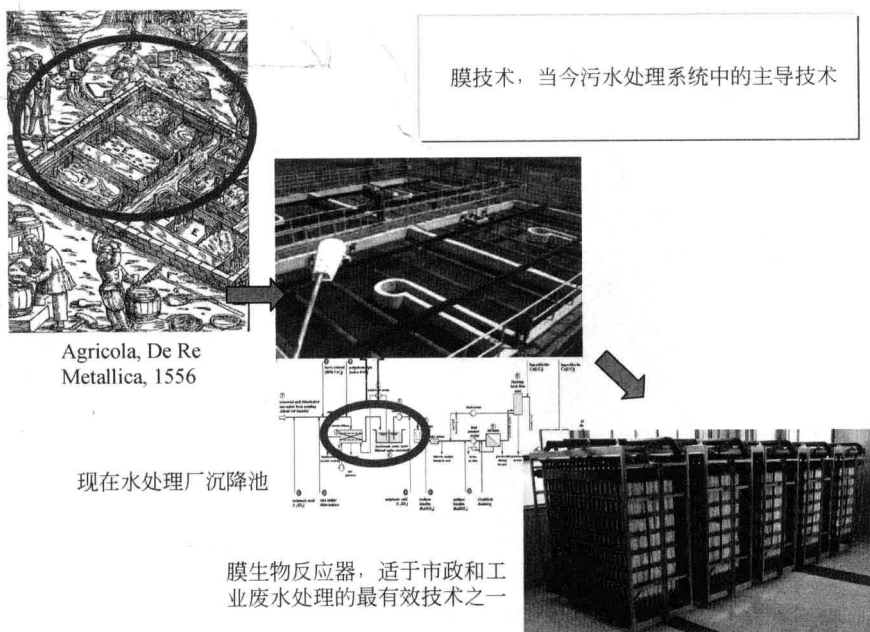


图 1 废水处理技术途径的前生今世

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

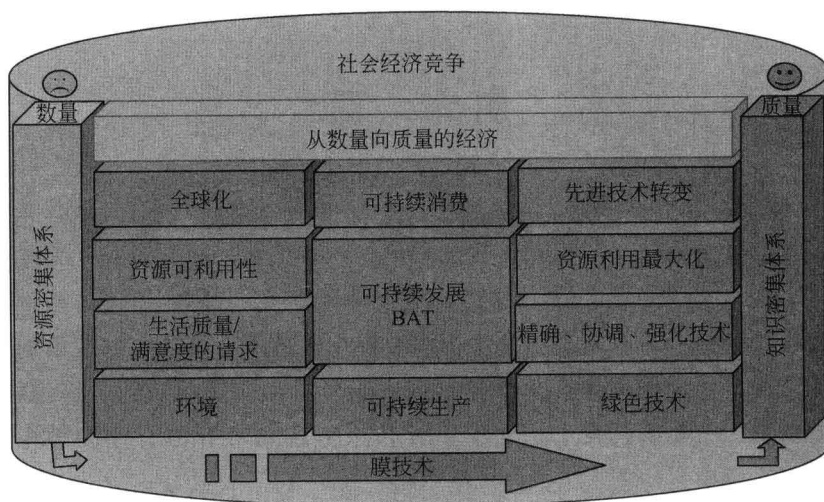


图2 现行社会经济和技术竞争正在促进向知识密集型系统的转变从而保持可持续发展

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）。

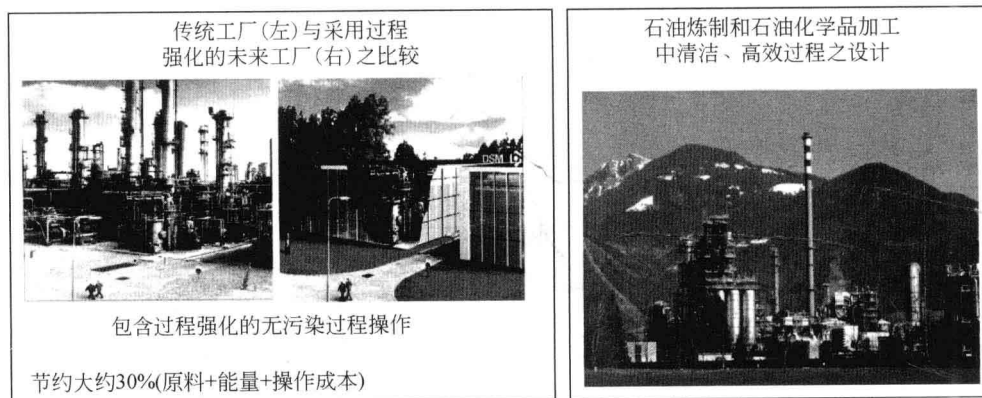


图3 过程强化策略。引自 Jean-Claude Charpentier, 全球化、可持续化与技术创新构架下的现代化学工程学, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 46, No. 11, 2007

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）。

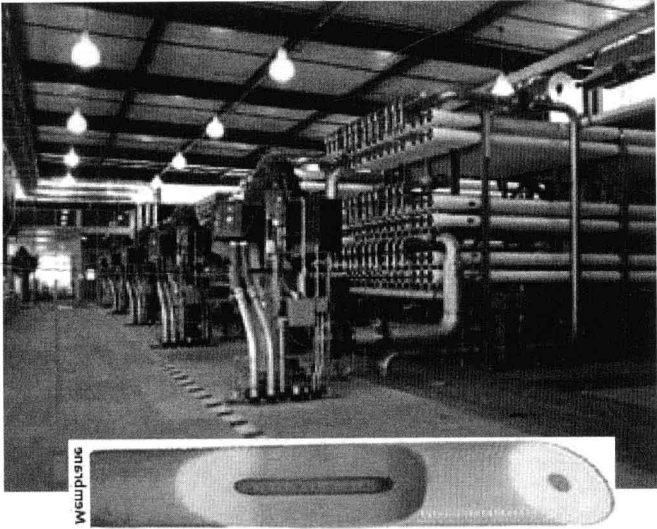


图 4 膜法海水淡化装置。美国得克萨斯州厄尔巴索市反渗透膜法淡化装置：世界最大的内陆淡化水厂（ $104\ 000\text{m}^3\text{d}^{-1}$ ）。制水成本小于  $0.36\ \$\text{m}^{-3}$ 。源自 <http://www.epwu.org/167080115>

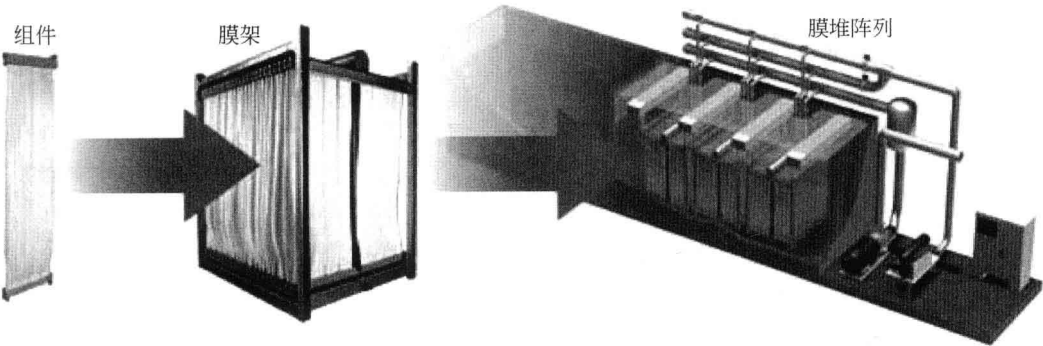


图 5 用于废水处理的浸没式膜组件。源自 ZeeWeed<sup>®</sup> 浸没式膜系统，<http://www.gewater.com>

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。

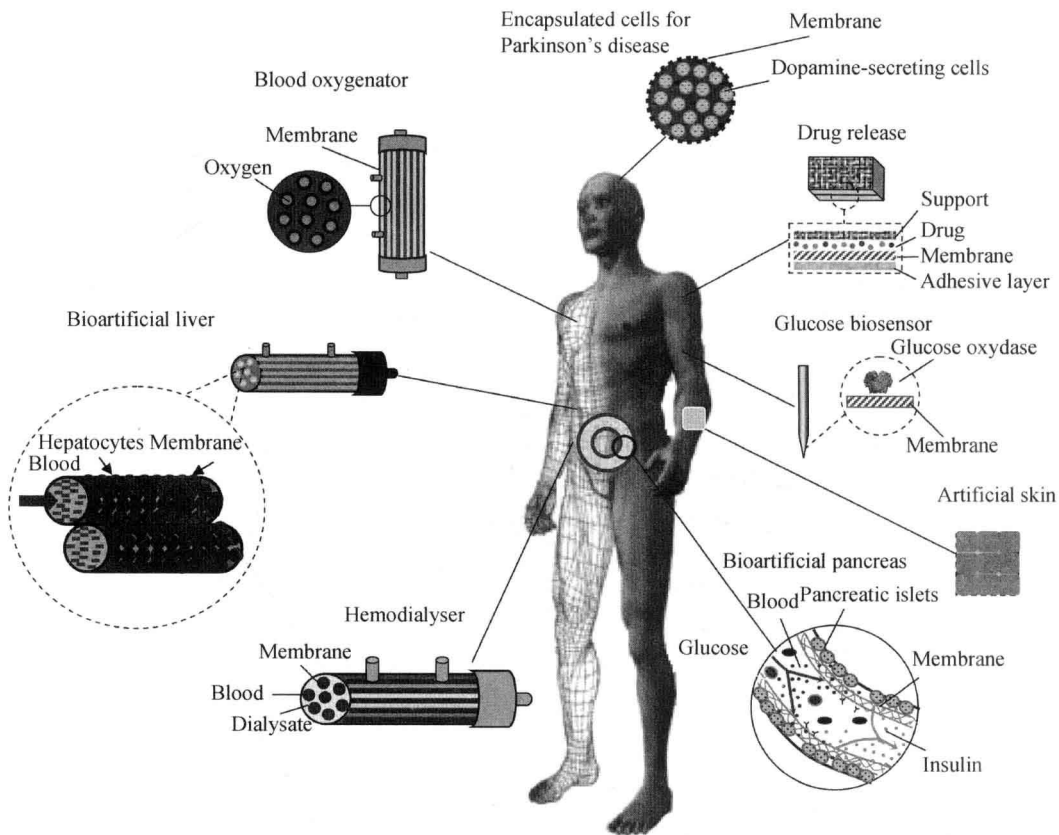


图 6 用于生物医学领域的膜与膜组件

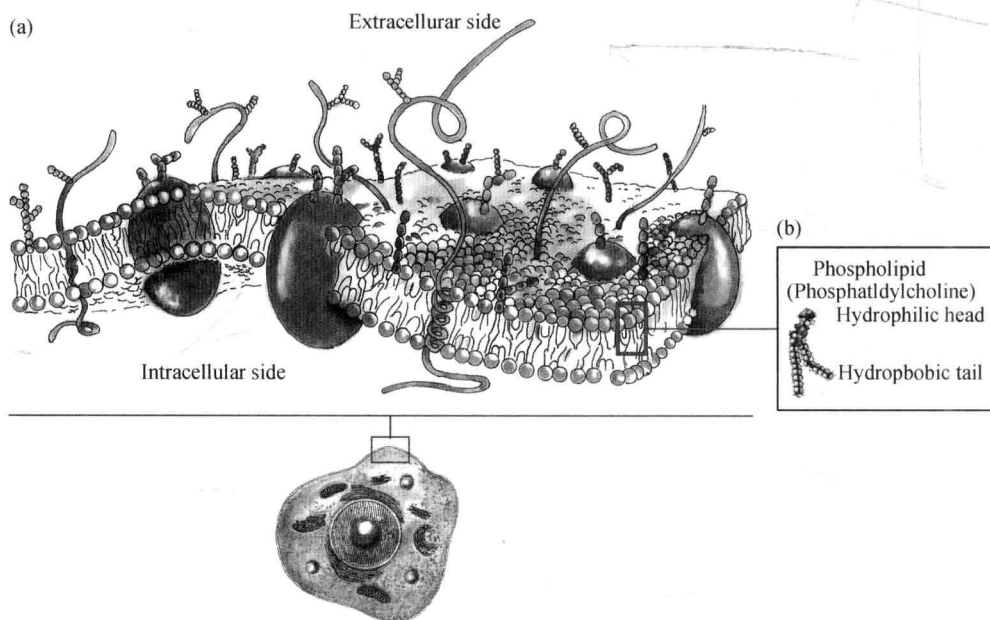


图 7 生物膜功能。源自 <http://www.mcgraw-hill.it/>

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 Lidieta Giorno

(王晓琳 译)

# Contents of Volume 4

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| Contributors to Volume 4 | vii |
| Contents of All Volumes  | ix  |
| Introduction             | xi  |

## Volume 4 Membrane Contactors and Integrated Membrane Operations

### Basic Principles of Membrane Contactors

|      |                                                                                                                                 |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.01 | Membrane Distillation and Osmotic Distillation                                                                                  | 1  |
|      | E. Curcio, <i>University of Calabria, Arcavacata di Rende (CS), Italy</i>                                                       |    |
|      | G. Di Profio, <i>Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at University of Calabria, Rende (CS), Italy</i>                    |    |
|      | E. Drioli, <i>Institute of Membrane Technology, ITM-CNR, University of Calabria, Rende (CS), Italy</i>                          |    |
| 4.02 | Membrane Crystallization Technology                                                                                             | 21 |
|      | G. Di Profio, <i>Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at University of Calabria, Rende (CS), Italy</i>                    |    |
|      | E. Curcio, <i>University of Calabria, Arcavacata di Rende (CS), Italy</i>                                                       |    |
|      | E. Drioli, <i>Institute of Membrane Technology, ITM-CNR, University of Calabria, Rende (CS), Italy</i>                          |    |
| 4.03 | Membrane Emulsification                                                                                                         | 47 |
|      | E. Piacentini and A. Figoli, <i>Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at the University of Calabria, Rende (CS), Italy</i> |    |
|      | L. Giorno and E. Drioli, <i>Institute of Membrane Technology, ITM-CNR, University of Calabria, Rende (CS), Italy</i>            |    |
| 4.04 | Liquid Membranes                                                                                                                | 79 |
|      | M. E. Vilt and W. S. W. Ho, <i>The Ohio State University, Columbus, OH, USA</i>                                                 |    |
|      | N. N. Li, <i>NL Chemical Technology, Inc., Mount Prospect, IL, USA</i>                                                          |    |

### Integrated Membrane Operations in Various Industrial Sectors: Case Studies

|      |                                                                                                                        |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.05 | Integrated Membrane Operations in Various Industrial Sectors                                                           | 109 |
|      | A. Koltuniewicz, <i>Warsaw University of Technology, Warszawa, Poland</i>                                              |     |
| 4.06 | Membranes in Agro-Food and Bulk Biotech Industries                                                                     | 165 |
|      | F. Lipnizki, <i>Alfa Laval Copenhagen A/S, Soborg, Denmark</i>                                                         |     |
| 4.07 | Membrane Bioreactor in Water Treatment                                                                                 | 195 |
|      | G. Wen, J. Ma, L. Zhang, and G. Yu, <i>State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin, China</i> |     |
| 4.08 | Membrane Technology: Latest Applications in the Refinery and Petrochemical Field                                       | 211 |
|      | P. Bernardo, <i>Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at University of Calabria, Rende (CS), Italy</i>            |     |
|      | E. Drioli, <i>Institute of Membrane Technology, ITM-CNR, University of Calabria, Rende (CS), Italy</i>                 |     |

|      |                                                                                                        |            |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.09 | Membrane Systems for Seawater and Brackish Water Desalination                                          | 241        |
|      | F. Macedonio, <i>University of Calabria, Arcavacata di Rende (CS), Italy</i>                           |            |
|      | E. Drioli, <i>Institute of Membrane Technology, ITM-CNR, University of Calabria, Rende (CS), Italy</i> |            |
|      | <b>Cumulative Index</b>                                                                                | <b>259</b> |

# Contributors to Volume 4

P. Bernardo

*Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at University of Calabria, Rende (CS), Italy*

E. Curcio

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

G. Di Profio

*Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at University of Calabria, Rende (CS), Italy*

E. Drioli

*Institute of Membrane Technology, ITM-CNR, University of Calabria, Rende (CS), Italy*

A. Figoli

*Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at the University of Calabria, Rende (CS), Italy*

L. Giorno

*Institute of Membrane Technology, ITM-CNR, University of Calabria, Rende (CS), Italy*

W. S. W. Ho

*The Ohio State University, Columbus, OH, USA*

G. Jonsson

*Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark*

A. Koltuniewicz

*Warsaw University of Technology, Warszawa, Poland*

N. N. Li

*NL Chemical Technology, Inc., Mount Prospect, IL, USA*

F. Lipnizki

*Alfa Laval Copenhagen A/S, Soborg, Denmark*

F. Macedonio

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

J. Ma

*State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin, China*

E. Piacentini

*Institute on Membrane Technology, ITM-CNR, at the University of Calabria, Rende (CS), Italy*

M. E. Vilt

*The Ohio State University, Columbus, OH, USA*

G. Wen

*State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin, China*

G. Yu

*State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin, China*

L. Zhang

*State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin, China*

# Contents of All Volumes

## Volume 1 Basic Aspects of Membrane Science and Engineering

### Role and Function of Biological and Artificial Membranes

- 1.01 Biological Membranes and Biomimetic Artificial Membranes
- 1.02 Functionalized Membranes for Sorption, Separation, and Reaction: An Overview

### Fundamentals of Transport Phenomena in Membranes

- 1.03 Modeling and Simulation of Membrane Structure and Transport Properties
- 1.04 Fundamentals of Transport Phenomena in Polymer Membranes

### Basic Aspects of Polymeric and Inorganic Membrane Preparation

- 1.05 Basic Aspects in Polymeric Membrane Preparation
- 1.06 Advanced Polymeric and Organic-Inorganic Membranes for Pressure-Driven Processes
- 1.07 Norbornene Polymers as Materials for Membrane Gas Separation
- 1.08 Amorphous Perfluoropolymer Membranes
- 1.09 Plasma Membranes
- 1.10 Preparation of Membranes Using Supercritical Fluids
- 1.11 Basic Aspects in Inorganic Membrane Preparation
- 1.12 Ceramic Hollow Fiber Membranes and Their Applications
- 1.13 Preparation of Carbon Membranes for Gas Separation
- 1.14 Carbon Nanotube Membranes: A New Frontier in Membrane Science

### Membrane Characterization

- 1.15 Characterization of Filtration Membranes
- 1.16 The Use of Atomic Force Microscopy in Membrane Characterization

### Index to Volume 1

## Volume 2 Membrane Operations in Molecular Separations

### Reverse Osmosis and Nanofiltration

- 2.01 Fundamentals in Reverse Osmosis
- 2.02 Preparation of Industrial RO, NF Membranes, and Their Membrane Modules and Applications
- 2.03 Current and Emerging Developments in Desalination with Reverse Osmosis Membrane Systems
- 2.04 Transport Phenomena in Nanofiltration Membranes
- 2.05 Nanofiltration Operations in Nonaqueous Systems

### Ultrafiltration and Microfiltration

- 2.06 Ultrafiltration: Fundamentals and Engineering
- 2.07 Fundamentals of Cross-Flow Microfiltration