



中国材料研究学会
CHINESE MATERIALS RESEARCH SOCIETY

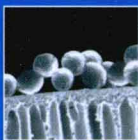
组织编写



新材料丛书

功能膜 及其应用

孙本惠 孙 斌 编著



化学工业出版社

MRS 中国材料研究学会 组织编写
CHINESE MATERIALS RESEARCH SOCIETY

 新材料丛书

功能膜 及其应用

孙本惠 孙 斌 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书以通俗的语言,综合介绍了功能膜及其技术在各领域的广泛应用,如在水处理、农业、医药、新能源领域,以及造酒、食品工业中的应用,内容丰富,取材新颖,实例广泛,图文并茂。同时展望了功能膜的未来——确保人类经济可持续发展的“魔法师”。阅读本书可使读者对膜的功能有更加全面的认识 and 了解,扩大视野,活跃思路,从中得以启迪创新。

本书作为科普读物,可作为对膜技术和新材料感兴趣的初学者的入门读物,对从事水处理、食品加工、石油化工、制药、气体分离、生物工程等工作的科研人员和工程技术界同仁也有较大的参考价值,还可供与膜技术相关的企业专家、从业人员以及各级管理干部和相关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

功能膜及其应用/孙本惠,孙斌编著. —北京:化学工业出版社,2012.11

(新材料丛书)

ISBN 978-7-122-15493-4

I. ①功… II. ①孙…②孙… III. ①薄膜技术—普及读物 IV. ①TB43-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第236548号

责任编辑:刘丽宏
责任校对:徐贞珍

文字编辑:向东
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市万龙印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张11½ 彩插1 字数178千字 2013年3月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:48.00元

版权所有 违者必究

京化 广临字2012——32号

《新材料丛书》编委会

顾 问：师昌绪 李恒德 周 廉

主 任：黄伯云

委 员（按姓氏拼音排序）：

高瑞平 韩高荣 韩雅芳 李光宪 李元元

罗宏杰 邱 勇 屠海令 魏炳波 谢建新

徐 坚 杨 锐 姚 燕 周少雄 周 玉

新材料丛书

序

走进新材料世界

由中国材料研究学会与化学工业出版社联合编辑出版的《新材料丛书》与广大读者见面了。这是一套以介绍新材料的门类和品种、基础知识以及功能和应用为主要内容的普及性系列丛书。

材料是人类物质文明进步的阶梯。新材料是现代高新技术的基础和先导，任何一种高新技术的突破都必须以该领域的新材料技术突破为前提，而新材料的突破往往会引发人类划时代的变革，如20世纪60年代高纯硅半导体材料技术的突破，使人类进入信息化时代。

新材料量大面广，发展日新月异，不仅体现一个国家的综合国力和科技水平，还与人们的工作和生活息息相关。新材料创造美好生活。特别是在人类面临的资源、能源和环境问题日益紧迫的今天，可持续发展已成为全球共性的理念，新材料首当其冲，其地位和作用日益突出，而且是大有作为。

为了及时普及新材料技术知识，使广大读者了解新材料、走进新材料、参与新材料，特组织编撰这套《新材料丛书》。

参加撰写这套科普丛书的作者都是我国新材料领域的知名专家和学者，他们在新材料的各自领域耕耘数十春秋，有着一份和新材料难以割舍的感情，特别是出于对我国新材料发展的关心，出于对培养年轻一代的热情，欣然接受了各自的编写任务。对他们献身新材料科普事业的精神和积极贡献深表感谢。

《新材料丛书》编辑委员会

前言

当我接到中国材料研究学会与化学工业出版社的联合邀请函，邀请我承担《新材料丛书》中《功能膜及其应用》分册的编写工作时，我欣然应允，并且克服了眼疾及背痛的困扰，以极大的热情夜以继日地奋笔疾书，很快把书稿赶写出来了。是什么动力驱使我编写这本科普读物有如此高涨的热情呢？这还得从我上大学时的一件令人难忘的事情说起。我刚进大学不久，偶然看到一本科普小册子，里面有一篇科幻文章讲到渗透现象时作者提出了一个大胆的设想，如果能够做出一张足够大的半透膜，把它放在长江入海口将长江的淡水和东海的海水隔开，那么长江的淡水会自发地渗透穿过半透膜而进入海水里，同时会产生极大的渗透压。如果把产生的渗透压用来发电，这个发电量是相当惊人的。虽然具体数字我早已记不清了，但是这种膜的神奇功能却深深地印在了我的脑海之中而挥之不去，这一篇科幻文章竟然使我后来下决心选择了膜科学与技术专业作为我毕生为之献身的事业。为此我深深地体会到了科普工作是多么的重要，编写好的科普书籍是多么的有意义。所以我毫不犹豫地接受了邀请，愿意为读者奉献一本介绍功能膜的科普读物，目的是希望能够吸引更多的优秀人才，特别是广大青少年能够加入到膜科学与技术的队伍里来，成为这个领域的生力军。

近几十年来世界及国内的膜科技及膜工业的发展速度真可谓日新月异、一日千里，膜技术已成为当今最重要的高科技之一，在解决全人类所面临的资源匮乏、能源短缺、环境污染这三大问题、保障全球的经济可持续发展方面发挥了举足轻重的作用。我从事高分子科学研究已经有半个世纪，进入膜科学与技术的科研及教学队伍也有三十余年了，我为能够给这个领域添砖加瓦而倍感荣幸。希望这本书能够起到抛砖引玉的作用，引起更多的人关注、支持、参与膜科技及其产业的发展。

感谢孙斌博士（Dr. Patricia B Sun）热情参与了本书的编写工作，并为本书的选材及构思提供了宝贵的意见，做出了重要贡献。也非常感谢我家人的鼓励及全力支持我承担这项工作。

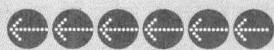
感谢著名的美籍华裔科学家、膜科技的奠基人之一、美国国家工程院

院士、中国科学院外籍院士黎念之博士 (Dr. Norman N Li) 对我编写本书的鼓励及支持 ; 感谢著名的膜科学家、美国国家工程院院士、《膜科学杂志》 (Journal of Membrane Science) 原主编、美国佐治亚理工学院教授威廉·卡洛斯博士 (Dr. William Koros) 提供了一些极其珍贵的图片资料 ; 感谢美国著名的膜科学家、美国膜技术研究公司 (Membrane Technology and Research, Inc.) 的资深科学家理查德·贝克博士 (Dr. Richard Baker) 提供了有关控制释放方面的资料。本书也参考了国内外一些文献中的部分膜技术的应用实例资料, 对文献作者深表感谢。

作为科普读物, 本书力求兼顾书稿内容的专业性、通俗性、新颖性、趣味性、实用性、广泛性, 争取对于不同层面的读者都能有所裨益。由于膜科技所涉及的学科领域非常广泛, 笔者受专业领域及学识水平所限, 书中不当及疏漏之处在所难免, 敬请广大读者及同行指正。

孙本惠

目录



第1章

认识功能膜的“魔力”

1

- 1.1 我们最熟悉而又陌生的朋友——膜 2
- 1.2 膜现象的发现及仿生物功能膜的研制 4
- 1.3 功能膜的神奇功能 7
 - 1.3.1 物质分离功能 7
 - 1.3.2 能量转换功能 10
 - 1.3.3 物质转化功能 10
 - 1.3.4 控制释放功能 11
 - 1.3.5 电荷传导功能 12
 - 1.3.6 物质识别及信息传感功能 13
- 1.4 功能膜对人类的重要性 13

第2章

功能膜在水处理领域的重大作用

17

- 2.1 常用于水处理的几种分离膜 18
- 2.2 海水淡化 20
 - 2.2.1 全球性的淡水资源危机 20
 - 2.2.2 解决淡水资源危机的根本途径 21
 - 2.2.3 膜法海水淡化的原理 22
 - 2.2.4 膜法海水淡化的优越性 26
 - 2.2.5 膜法海水淡化的实例 27

2.2.6 从“引渤济锡”海水淡化工程项目看发展 循环经济模式	31
2.3 污水资源化再生循环回用	32
2.3.1 污水资源化再生循环回用的必要性	32
2.3.2 用于污水处理的膜生物反应器特点	35
2.3.3 膜生物反应器进展	38
2.3.4 城市污水处理的发展模式	42
2.3.5 膜技术在污水资源化再生循环回用方面的 应用实例	44
2.4 饮用水净化	51
2.4.1 饮用水源的安全性	51
2.4.2 饮用水污染对人体健康的危害性	53
2.4.3 膜法净化饮用水源	55
2.4.4 膜法深度净水技术在自来水厂的应用	57
2.4.5 膜法对饮用水的终端净化	64
2.4.6 膜法对饮用水的应急净化	67
2.4.7 走出饮用水消费市场的一些误区	72

第3章

气体分离膜在工业及民用领域的应用

77

3.1 富氧膜在工业上的应用	78
3.2 富氧膜用于家庭小氧吧	81
3.3 富氮膜在果蔬粮食保鲜方面的应用	83
3.4 新颖概念多功能机	85
3.5 富氮膜在航空领域的应用	86
3.6 富氮膜在石油及天然气开采中的应用	91
3.7 安全输送天然气的保护神	93

第4章

功能膜在农业领域的应用

97

- 4.1 化肥生产 98
- 4.2 化肥农药的控制释放 100
- 4.3 在植物保鲜及养殖业中的应用 102

第5章

功能膜在医药领域的应用

103

- 5.1 人工肾 104
- 5.2 人工肺 108
- 5.3 膜传感器 111
- 5.4 控制释放药物 116

第6章

功能膜在新能源领域的应用

125

- 6.1 燃料电池 126
- 6.2 燃料乙醇 129

第7章

功能膜在造酒业中的特殊功效

135

- 7.1 纯化 136
- 7.2 脱醇 140
- 7.3 浓缩 141
- 7.4 脱水 143
- 7.5 反应-分离 144

第8章

功能膜在食品工业中的应用

145

- 8.1 功能膜在食品工业中的使用功能及其应用概况 146
- 8.2 功能膜在食品工业中的应用实例 147
 - 8.2.1 橙汁的澄清及浓缩 147

8.2.2	番茄汁的浓缩	148
8.2.3	苹果汁的精制	149
8.2.4	萝卜汁的澄清	151
8.2.5	精制蜂蜜	152
8.2.6	酱油除菌除浊	154
8.2.7	食用醋除浊	156
8.2.8	提取大豆蛋白	156
8.2.9	味精精制	159
8.2.10	在制糖业中的应用	161
8.2.11	在茶叶深加工中的应用	163
8.2.12	在食品工业中的其他应用	165

第9章

功能膜的未来展望

169

——确保人类社会经济可持续发展的“魔法师”	170
-----------------------------	-----

参考文献

174

第 1 章

认识功能膜的“魔力”





1.1 我们最熟悉而又陌生的朋友——膜

如果有人问你：“有没有看到过或者接触过膜？”也许很多人会摇头，“膜，那是什么东西？”对于绝大部分人来说，“膜”听起来仿佛离我们很遥远，是个陌生而玄奥的概念。其实膜是我们最亲密、最熟悉的好朋友，只不过大家是“不识庐山真面目，只缘身在此山中”罢了。事实上，膜不仅影响着人们日常生活的方方面面，在我们的身体里也无处不在。

要了解膜的来龙去脉，让我们先从生物膜说起吧。生物膜是镶嵌脂质、蛋白质和糖类，由亲水端和憎水端构成的磷脂双分子层，含有大量酶结合位点，是细胞、细胞器和其环境接界的所有膜结构的总称。生物中除某些病毒外，都具有生物膜。众所周知，构成动物及植物体的最小基本单元是细胞，而真核细胞的外壁被称为细胞膜（或质膜），它就是生物膜家族中重要的一员。此外分隔各种细胞器的内膜系统，如核膜、线粒体膜、溶酶体膜、内质网膜、叶绿体膜、高尔基体膜、过氧化酶体膜等，也都属于生物膜的范畴。人的身体是由无数细胞构成的，所以说我们的全身都有膜。同时生命的成长离不开食物，在我们的一日三餐当中，无论米面、肉食还是蔬菜、水果，无一不是由细胞构成的。换句话说，我们每个人每天都在吃进大量的“膜”呢。

生物膜的作用举足轻重，它是保障人类及所有的动物、植物维持生命正常运转的最为重要的基本单元。两位美国科学家经过多年的研究发现，细胞膜有两种专门的通道：一种为水通道，另一种为离子通道（图1-1）。它们就好像我们在机场看到的“专用通道”一样，对进出分子的类型严格把关：水通道只允许水分子通过，而离子通道只允许离子通过。正是由于这两种通道的存在，细胞膜才具有了自动调控生物体内水与电解质平衡的神奇功能，以使体内的水分及电解质（离子）始终保持在正常范围内。一旦这个通道失调失控，例如人体内水分过多而排不出去时，人就会得浮肿病；而当人体内钠离子过多时，就会患高血压病。由此可见，细胞膜对于生命健康是多么的重要。解开生物膜通道秘密的两位科学家分别是彼德·阿格瑞（Peter Agre）博士和罗德里克·麦金农（Roderick MacKinnon）博士（图1-2），他们因此而荣获了2003年度的诺贝尔化学奖。

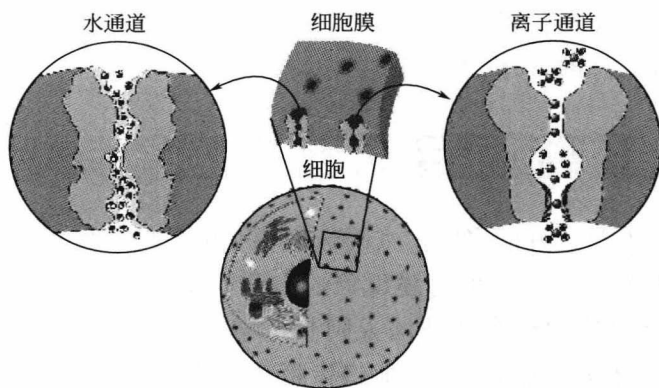
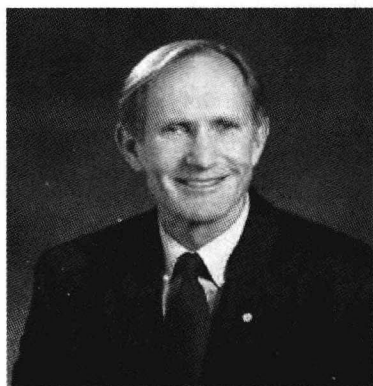


图1-1 细胞膜的分子、离子通道



彼得·阿格瑞博士



罗德里克·麦金农博士

图1-2 解开生物膜通道秘密的两位美国科学家

膜 (Membrane) 的家族极为庞大，我们前面介绍的生物膜仅仅是其中的一个分支。从膜材料来分类，膜大致可以分为两大类。

① 天然膜

- 生物膜
- 无机物膜 (陶瓷膜、金属膜、沸石膜……)
- 天然有机高分子膜 (纤维素膜、甲壳素膜……)

② 人工合成膜

- 合成有机高分子膜 (聚砜膜、聚偏氟乙烯膜、聚醚砜膜、聚丙烯腈膜、聚氯乙烯膜、聚乙烯膜、聚丙烯膜、聚酰胺膜、高分子合金膜……)
- 合成无机高分子膜 (聚硅氧烷膜、聚碳膜……)
- 合成生物膜 (Langmuir-Blodgett膜……)



当前,膜科学与技术在人类生产、生活的实际应用中,被使用最多的要属人工合成的有机高分子膜了。

1.2 膜现象的发现及仿生物功能膜的研制

大自然是人类最好的老师,人类无数伟大的发明和发现都始于对自然现象的观察和领悟,而人们对膜现象的启蒙认识,也正是源自于生物膜。1748年,一个偶然的机会让法国人阿贝·诺莱特(Abbe Nollet)(图1-3)发现了生物膜的渗透现象。当时他将猪膀胱当做一个容器,把酒精溶液灌入猪膀胱里,系上口子之后再把猪膀胱浸入到水缸里。过了一段时间,他发现装有酒精的猪膀胱逐渐涨大起来,也就是说,水缸里的水会自发地透过猪膀胱而进入到酒精溶液中去。猪膀胱是一种生物膜,也是一种半透膜,水分子在浓差作用的推动下,会自发地从稀溶液(水)的一侧通过半透膜而迁移到浓溶液(酒精)一侧的现象,这就是“渗透”现象。这次偶然的发现成就了迄今为止史料中最早有文字记载的膜分离现象,此后人类开始了对膜现象的认识、模拟,以及对膜技术开发、利用的漫长而曲折的过程。1855年费克(Fick)发表了关于扩散(diffusion)的理论,至今仍被人们奉为解释膜扩散现象的金科玉律;他还用硝化纤维素制成了人类历史上最早的人工合成半透膜。1861年格拉姆(Graham)首次观察到膜的透析现象,他还观察到橡胶对不同的气体有不同的渗透性,从而被称为气体分离膜之父。1864年特劳布(Traube)制成了人类历史上第一张人造膜——亚铁氰化铜膜;1950年朱达(Juda)等试制成功第一张具有实用价值的离子交换膜。在20世纪20年代曼讷戈耳德(Manegold)等人率先发现了反渗透现象,他们观察到含盐或非电解质的水溶液在外压作用下可由浓溶液向稀溶液方向渗透过半透膜,可惜这一发现当时并未引起人们足够的重视,直至1950年才被瑞德(Reid)及其学生重新发现。1960年洛布(Lobe)和索里拉金(Sourirajan)研制成功具有非对称结构的醋酸纤维素反渗透膜;70年代卡道特(Cadotte)和彼得森(Petersen)研发成功超薄复合型芳香聚酰胺反渗透膜。1968年黎念之(Norman Li)发明了液膜,被称为“液膜之父”。在刚刚过去的半个世纪里,膜科学与技术的研究取得了突破性进展,功能膜已逐步开始在世界舞台上大显身手,并展现出其与日俱增的魔力。

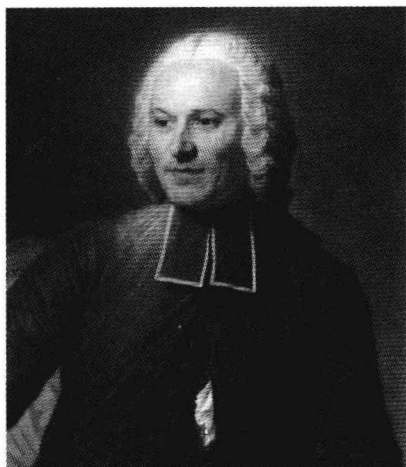


图1-3 1748年阿贝·诺莱特首次发现了生物膜的渗透现象

生物膜惊人的功能和效率，为聪明的人类带来了无限的灵感，于是科学家们从仿生物膜功能的角度出发，研制出了一系列的人造功能膜。以海带为例，众所周知，它是一种富含碘质的海产品，它具有富集碘的功能，能够将海水中的碘浓缩1000多倍。科学家们根据海带的这一特性研制成功了一种液膜，可以用于富集海水里的碘，以及从洗海带的废水里浓缩提取碘。另一个例子是同位素的分离。铀是一种天然的放射性元素， $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{238}_{92}\text{U}$ 是天然的同位素，其中 $^{235}_{92}\text{U}$ 是重要的核燃料，也是制造原子弹的原料； $^{238}_{92}\text{U}$ 也可以用做核反应堆的燃料。这两者有相同的原子序数，质量数仅仅相差3，仿佛一对形影不离的“双胞胎”，用传统分离方法很难把它们分开。自然界中存在一种叫石毛的藻类，具有很强的浓缩铀的功能，浓缩率高达750倍。于是科学家们模拟石毛的原理研制出一种陶瓷膜，不但可以浓缩铀，并且还可以分离 $^{235}_{92}\text{U}$ 和 $^{238}_{92}\text{U}$ 。早期制造原子弹时，人们就采用了这种技术。还有前面提到过的猪膀胱的渗透作用，科学家们根据这个现象发明了一种有相似功能的人造半透膜，叫做反渗透膜，既可以用于分离酒精里的水，也可以把海水变成淡水（海水淡化）。肾脏具有排除血液里毒素的作用，科学家们就由此研制出了透析膜，在20世纪40年代由荷兰医生考尔夫（Kolff）首次研制成功了“人工肾”，用以取代有病变的肾脏，具有排除血液里毒素的功能，因此拯救了许多患者的生命。光合作用是绿色植物和藻类利用叶绿素等光合色素，和某些细菌（如带紫膜的嗜盐古菌）利用其细胞本身，在可见光的照射下将二氧化碳



和水（或硫化氢和水）转化为碳水化合物，同时完成能量的转化和储存的过程。通常人们所说的绿色植物的光合作用是一种产氧光合作用，是一个将太阳光能转化为化学能（合成葡萄糖）的氧化还原反应过程。而某些细菌进行的厌氧型光合作用则可通过氧化还原反应释放出氢气。利用这个反应原理，科学家们研制出了燃料电池膜，让氧气与氢气进行氧化还原反应生成水，同时产生电流。通过这种方式，化学能被转化成了电能。鱼之所以能够在水里存活，是因为鱼能通过鳃把溶解在水里的氧（叫溶氧）分离出来供鱼呼吸。在此基础上，科学家们开发出了一种能够从水里分离出溶氧的膜，称为“人工鳃”。此外他们还成功研制出了一种氧合膜，用于制造“人工肺”，摄取氧气、排出二氧化碳；它还可以应用于心脏手术的体外循环，代替人体肺脏，具有气体交换的功能。人及动物的视网膜具有视觉功能，科学家又由此发明了具有视觉功能的信息传感膜，日本夏普公司曾为失明的鸡眼睛里装上了这种膜，鸡马上就恢复了正常视觉功能。

还记得我们前面提到的细胞膜具有水通道及离子通道吗？如今科学家们已经分别发明了具有水通道和具有离子通道的人工合成膜。具有水通道的人工合成膜被称为反渗透膜（图1-4）。常见的反渗透膜皮层为芳香聚酰胺超薄膜层，厚度只有 $0.2\mu\text{m}$ ，是用一种“界面聚合”的特殊方法制成的。它只允许水分子通过，而有机物、无机物、离子等都不能通过，已经被大规模应用于海水淡化过程中。海水的主要成分是水及盐（氯化钠为主），这种盐在水里是以离子态（即 Na^+ 和 Cl^- ）存在的，反渗透膜把这些

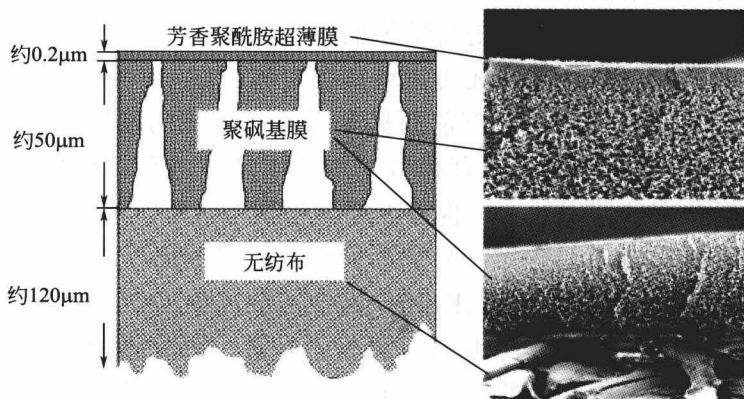


图1-4 具有水通道的反渗透复合膜