



# 环境工程新技术丛书

HUANJING GONGCHENG XINJISHU CONGSHU

# 膜生物反应器

——在污水处理中的研究和应用

顾国维 何义亮 编著



化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

环境工程新技术丛书

# 膜生物反应器

——在污水处理中的研究和应用

顾国维 何义亮 编著

化学工业出版社

环境科学与工程出版中心

·北京·

# (京)新登字 039 号

## 图书在版编目 (CIP) 数据

膜生物反应器——在污水处理中的研究和应用/顾国维, 何义亮编著. —北京: 化学工业出版社, 2002.5  
(环境工程新技术丛书)  
ISBN 7-5025-3697-3

I. 膜… II. ①顾… ②何… III. 生物膜(污水处理)-反应器 IV. X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 015503 号

---

环境工程新技术丛书

### 膜生物反应器

——在污水处理中的研究和应用

顾国维 何义亮 编著

责任编辑: 陈 丽

责任校对: 李 林

封面设计: 于 兵

\*

化学工业出版社 出版发行  
环境科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

\*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

开本 850×1168 毫米 1/32 印张 13 字数 355 千字

2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-3697-3/X·139

定 价: 30.00 元

---

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 序

随着我国社会经济的高速发展，城乡面貌发生了深刻的变化。人们对改善环境污染状况、提高生活质量、建设生态城市的要求与呼声与日俱增。我国的环境污染经过长期治理，虽然部分地区已经有所改善，但总体上还是比较严重的。在有些地区要寻找一个合格的饮用水源也不容易。工业“三废”的治理依然存在很多技术、工艺及经济可行性方面的难点。针对这种状况，近几年来，国家和地方政府加大了环境项目的投资力度，同时允许社会力量参与投资和建设，用市场经济的方式运作，形成了多元投资的格局。投资的多元化，排污收费的市场化，大大推动了环境项目的建设。缺少投资、缺少运行费用的状况得到了很大的改善。

环境问题很复杂，涉及众多学科，需要很多技术。它的科学研究和开发已远远超出了传统的学科范畴和科研单位范围。多学科交叉，多单位合作已经成为环境工程学科发展的重要方向。社会对环境的需求为环保事业的发展提供了动力，使环境工程成为目前发展最快的学科之一，近几年来取得了不少新的成果。化学工业出版社为了大力宣传环保知识，推动环保的科技进步，及时组织了一套环境工程新技术丛书。这套书能在一定程度上反映国内外环境技术的进展状况，供有关人员参考。应该说化工出版社是一个很有活力的出版社，及时出版了不少有参考价值的新书，深受读者的欢迎，是一座沟通作者与读者的很好的桥梁。在科学技术日新月异，人类进入数字化、信息化的时代，我们希望这座桥梁更为宽广通畅，共同为推动我国环保技术的发展做出贡献。

顾国维

2002年3月

EAA72162

## 前 言

膜生物反应器的研究和开发只有近 30 年的历史，真正应用只有十多年。它是废水生物处理技术和膜分离技术有机结合的一项新技术。以膜技术的高效分离作用取代活性污泥法中的二次沉淀池，达到了原来二次沉淀池无法比拟的泥水分离和污泥浓缩效果。从而可以大幅度提高生物反应器中的混合液浓度，使泥龄增长、剩余污泥量减少、出水水质显著提高，特别是对悬浮固体、病原细菌和病毒的去 除尤为显著。合格的膜生物反应器出水无须消毒，即可达相关的卫生标准。该技术处理生活污水，出水可达杂用水标准，为缺水地区的水资源重复利用提供了可靠的新方法。随着水价的上升，很有应用前景。对含油和生物难降解等工业废水处理也取得了很好的效果。总之，膜生物反应器具有一定的特色，并在国内外逐步推广使用。

目前膜材料的价格还偏高，因而投资较大，运行费用也较高。这些问题要结合膜材料的研制、膜生物反应器的深化研究和开发，逐步完善，不断创新，使该技术更具竞争力。

本书以大量的国内外文献为基础，并结合我们的研究成果，由同济大学和上海交通大学合作编写而成。由顾国维、张树国编写第 1 章，何义亮、齐唯编写第 2、5 章，李春杰、顾国维、何义亮编写第 3、4、6 章，李咏梅、张树国编写第 7 章。顾国维、何义亮主编。

限于水平和时间，错误在所难免，敬请读者指正。

顾国维 何义亮

2002 年 2 月 2 日

# 目 录

<b>第 1 章 膜生物反应器的基本概念及其发展</b> .....	1
1.1 膜技术基础 .....	2
1.1.1 膜的定义 .....	2
1.1.2 膜的结构与分类 .....	2
1.1.3 膜的性能 .....	4
1.1.4 膜组件和膜工艺 .....	14
1.1.5 压力驱动膜分离过程 .....	20
1.2 污水的生物处理技术 .....	25
1.2.1 水处理微生物简述 .....	26
1.2.2 污水处理工艺类型 .....	27
1.3 膜生物反应器技术 .....	30
1.3.1 膜生物反应器的历史 .....	30
1.3.2 膜生物反应器的组成和特点 .....	32
1.4 膜生物反应器的现状与发展 .....	40
1.4.1 膜生物反应器在国外废水处理工程中的应用现状 .....	40
1.4.2 国外几家 MBR 大公司产品应用状况 .....	45
1.4.3 国外 MBR 污水处理厂造价与费用分析 .....	51
1.4.4 膜生物反应器在国内的应用现状 .....	53
1.4.5 膜生物反应器的发展趋势 .....	56
<b>第 2 章 膜生物反应器对生活污水中污染物的去除特性</b> .....	59
2.1 MBR 对有机物的去除特性 .....	59
2.1.1 MBR 对有机物的去除效果及其特点 .....	59
2.1.2 MBR 中膜对有机物去除的强化机理 .....	63
2.2 MBR 对含氮化合物的去除特性 .....	75
2.2.1 建立在传统硝化反硝化之上的两级脱氮膜生物反应器 的工艺 .....	78

2.2.2	建立在传统硝化反硝化之上的单级（即 SBR）脱氮膜生物反应器的工艺 .....	80
2.2.3	间歇曝气单级 MBR 脱氮工艺 .....	85
2.2.4	MBR 同时硝化反硝化脱氮 .....	100
2.2.5	MBR 短程硝化反硝化脱氮 .....	104
2.3	MBR 对磷的去除特性 .....	106
2.3.1	生物法除磷 .....	106
2.3.2	膜生物反应器中的化学除磷及其效果 .....	113
2.4	MBR 对细菌和病毒的去除特性 .....	114
<b>第 3 章</b>	<b>MBR 对工业废水的处理 .....</b>	<b>124</b>
3.1	好氧膜生物反应器对工业废水的处理 .....	124
3.1.1	好氧 MBR 处理高分子有机废水的研究 .....	124
3.1.2	好氧膜生物反应器对含油废水的处理 .....	132
3.1.3	好氧 MBR 处理高浓度食品工业废水 .....	142
3.1.4	好氧 MBR 对金属加工车间含油废水的处理 .....	146
3.1.5	SMSBR 对焦化废水的处理 .....	151
3.2	厌氧膜生物反应器对工业废水的处理 .....	170
3.2.1	厌氧 MBR 对易降解有机废水的处理 .....	172
3.2.2	厌氧 MBR 对难降解有机废水的处理 .....	187
<b>第 4 章</b>	<b>膜生物反应器中污泥混合液特性 .....</b>	<b>193</b>
4.1	物理特性 .....	193
4.1.1	污泥浓度、产泥率和沉降性 .....	193
4.1.2	污泥混合液的粘度 .....	203
4.1.3	污泥颗粒分布 .....	206
4.2	生物特性 .....	217
4.2.1	污泥活性 .....	217
4.2.2	生物相 .....	241
<b>第 5 章</b>	<b>MBR 动力学 .....</b>	<b>248</b>
5.1	MBR 中污泥形成的动力学模型 .....	248
5.1.1	MBR 的相关动力学 .....	248
5.1.2	MBR 动力学常数 $Y$ , $K_d$ , $K_s$ , $V_{max}$ 的确定 .....	250
5.2	MBR 中有机物去除动力学研究 .....	254
5.2.1	模型的建立 .....	254

5.2.2	模型的验证	256
5.2.3	利用模型控制 MBR 的运行	261
5.3	建立在 SMP 形成和降解平衡基础上的 MBR 动力学模型	266
5.3.1	建立在 SMP 形成和降解平衡基础上的 MBR 动力学 基本模型	269
5.3.2	模型模拟值与试验值的比较	273
5.3.3	利用模型对 MBR 系统性能影响因素的评价	281
5.3.4	对 MBR 中 SMP 影响作用的解释	286
<b>第 6 章</b>	<b>膜生物反应器膜的污染防治研究</b>	<b>291</b>
6.1	膜污染现象及其过程的表达	291
6.1.1	膜生物反应器膜污染现象及其表征	291
6.1.2	膜污染过程的数学表达	294
6.1.3	膜污染过程的研究方法	297
6.1.4	试验结果与分析	298
6.2	膜污染防治	302
6.2.1	膜的性质对膜污染的影响	302
6.2.2	改变污泥混合液特性对膜污染的防治	307
6.2.3	优化膜分离操作（水力）条件防止膜污染	328
6.2.4	膜污染的水力清洗和化学清洗	344
<b>第 7 章</b>	<b>膜生物反应器的应用</b>	<b>352</b>
7.1	膜生物反应器在生活污水及其回用处理中的应用	352
7.1.1	Kubota 膜生物反应器工艺及其城市污水处理实例	352
7.1.2	Zenon 公司的 ZenoGem 工艺及工程实例	356
7.1.3	Orelis 公司的 Pleiade 膜生物反应器及其工程实例	360
7.1.4	一体式膜生物反应器处理洗浴污水的中试研究	365
7.1.5	天津清华德人环境工程有限公司的生活污水处理及 回用实例	367
7.1.6	膜生物反应器在城市污水处理厂改造升级中的应用	369
7.2	膜生物反应器处理工业废水的应用	373
7.2.1	一体式好氧膜生物反应器处理医院污水	373
7.2.2	Biomembrat 工艺处理牛奶场废水的实例	376
7.2.3	上海荏原成套工程有限公司 PW-W 的应用	378
7.2.4	MBR 对生活污水和工业废水混合废水进行处理的应用	382



7.2.5 南非 AUDF 厌氧膜生物反应器处理玉米加工废水 .....	386
7.2.6 日本水再生 '90 项目 .....	389
<b>参考文献</b> .....	392

## 第 1 章 膜生物反应器的基本概念及其发展

随着社会经济的发展和人口的增长，水资源短缺已经成为一个全球化的问题，而我国的缺水形势尤其严峻。根据 2000 年《中国环境状况公报》公布，我国人均水资源量为  $2238.6\text{m}^3$ ，仅相当于世界人均占有量的  $1/4$ ，是世界人均水资源极少的 13 个贫水国之一。在全国 600 多座建制市中，有近 400 座城市缺水，其中缺水严重的城市达 130 多个。缺水每年给城市工业产值造成的损失在 1200 亿元以上。与此同时，水环境污染日趋严重。全国 7 大重点流域地表水有机污染普遍，特别是流经城市的河段有机污染较重，主要湖泊富营养化问题突出。多数城市地下水受到了一定程度的点状或面状污染。水资源短缺和水环境污染已成为制约我国经济和社会发展的重要因素。

水环境质量的严重恶化和经济的高速发展，迫切要求适合时代发展的污水资源化技术，以缓解水资源的短缺状况。因此，近年来各种新型、改良型的高效废水处理技术应运而生，其中的膜分离技术，特别是膜生物反应器（Membrane Bioreactor，简称 MBR）组合工艺在废水处理中的应用格外引人注目。该工艺与传统废水生物处理工艺相比，具有出水水质好、出水可直接回用、设备占地面积小、活性污泥浓度高、剩余污泥产量低和便于自动控制等优点。虽然目前能耗较高、成本较高仍是阻碍膜生物反应器工艺发展的两大瓶颈，但是该技术已经在污水回用和难降解有机废水处理领域崭露头角，并在实际工程中得到了成功的应用。相信随着膜技术的发展，膜的制造成本的下降和新型膜组件及膜生物反应器工艺的不断开发，膜生物反应器技术在废水处理中会得到更多的应用。

膜生物反应器是膜技术和污水生物处理技术有机结合产生的废水处理新工艺，其产生和发展是这两类知识应用和发展的必然结

果。膜技术和生物处理技术的学科交叉、结合，开辟了污水处理技术研究和应用的新领域。

## 1.1 膜技术基础

### 1.1.1 膜的定义

膜广泛存在于自然界和人类活动中，其种类繁多，作用也千差万别，但是它们具有一个共同的特性——选择透过性。膜从广义上可以定义为两相之间的一个具有选择透过性的薄层屏障。膜分离是指在某种推动力的作用下，利用膜的透过性能，达到分离混合物（如溶液）中离子、分子以及某些微粒的过程。与传统过滤器的最大不同是，膜可以在离子或分子范围内进行分离，并且该过程是一种物理过程，不需发生相的变化和添加助剂。膜的厚度一般为微米级，膜的分离与截留性能一般以膜的孔径和截留分子量来加以区别。

### 1.1.2 膜的结构与分类

膜可以用许多不同的材料制备。膜可以是液相、固相甚至是气相的。目前使用的分离膜绝大多数是固相膜。依据其孔径的不同，可将膜分为微滤膜、超滤膜、纳滤膜和反渗透膜；依据材料的不同，可分为无机膜和有机膜，无机膜主要是微滤级别的膜。膜可以是均质或非均质的，也可以是荷电的或电中性的。膜传递过程可以是主动运输，也可以是被动传递。根据不同的目的可以将膜按不同的标准进行分类。广泛用于废水处理的膜主要是由有机高分子材料做成的，如聚烯烃类、聚乙烯类、芳香族聚酰胺、聚醚砜、聚氟聚合物等等。本书主要讨论用于污水处理的固相非对称膜。

膜从形态上可以分为均质膜和非对称膜两种类型。均质膜是指各向性质相同的致密膜或多孔膜。这类膜的通量一般较小，主要用于电渗析和气体分离。非对称膜一般由两层组成（见图 1-9）。表面一层非常薄，从几十纳米到几十微米，下面一层较厚，约  $100\mu\text{m}$ 。表面一层起分离作用，可以是致密的，也可以是多孔的。下面一层起支撑作用，是多孔的。非对称膜是使用最广泛的一种分

离膜，其皮层对分离膜的性能起决定性的影响。

纤维素是自然界广泛存在的天然资源，纤维素及其衍生物作为膜材料已有相当长的历史，在膜工业中起着举足轻重的作用。由于一般的疏水聚合物制成的膜在应用过程中吸附溶质而容易被污染，因此稳定的亲水聚合物就日益引起重视。近几年，各种高性能、功能化纤维素膜是纤维素科学研究开发中的一个热点。最常见的就是纤维素及其衍生物如纤维素酯，包括醋酸纤维素、三醋酸纤维素、三丙酸纤维素、乙基纤维素、硝酸纤维素以及混合酯，如醋酸-丁酸纤维素。纤维素主要用作透析膜材料，醋酸纤维素和硝酸纤维素主要用于微滤和超滤，而三醋酸纤维素则用作脱盐过程中的反渗透膜。可以说纤维素是最重要的一类膜材料。纤维素类膜对水有良好的透过性，纤维素是天然高分子材料，对人体基本上是安全的，目前其最广泛、最重要的应用是血液透析。

微滤膜常用聚合物材料有：聚碳酸酯、纤维素酯、聚偏二氟乙烯、聚砷、聚四氟乙烯、聚氯乙烯、聚醚酰亚胺、聚丙烯、聚醚醚酮、聚酰胺等。

超滤膜常用聚合物材料有：聚砷、聚醚砷、(脂肪)聚酰胺、聚丙烯腈(PAN)、聚偏氟乙烯、纤维素酯、聚醚醚酮、聚酰亚胺、聚醚酰胺等。

膜的分类可以用图 1-1 表示。

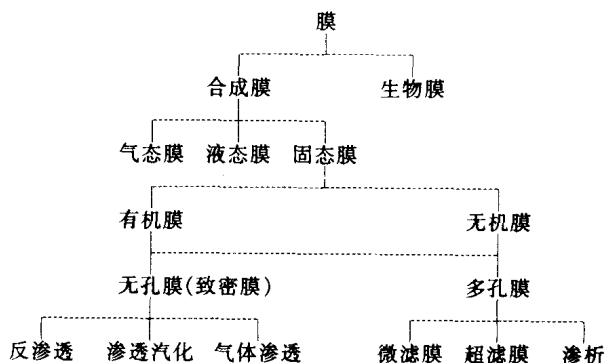


图 1-1 膜的分类

在应用上，膜技术除用于微滤（MF）、超滤（UF）、纳滤（NF）、反渗透（RO）、电渗析（ED）、膜电解（ME）、扩散渗析（DD）及透析等分离外，还可用于气体分离（GS）、蒸汽渗透（VP）、全蒸发（PV）、膜蒸馏（MD）、膜接触器（MC）和载体介导传递。

膜分离技术是近 30 年来发展起来的一项高新技术，已在众多领域发挥着其独特的重要作用。如： $1.3 \times 10^4$ t/d 的海水淡化大型工厂， $2.4 \times 10^4$ t/d 苦咸水电渗析淡化工厂，用膜近万平方米的大型超滤退浆废水处理厂，2400t/d 的地表水微孔过滤净化工厂，每年救治几十万人生命的人工肾（透析器）已成为现代的重要医疗手段，膜法制取的矿泉水、纯净水、优质饮用水等已进入千家万户，这些已充分显示了膜技术的应用规模、水平和重要作用。其应用已从早期的脱盐发展到化工、食品、医药、电子等工业领域的废水处理、产品分离和生产高纯水等，成为重要的化工操作单元。

各种膜过程具有不同的机理，适用于不同的对象和要求。与常规分离方法相比，膜过程具有能耗低、单级分离效率高、过程简单、不污染环境、经济性较好、没有相变、可在常温下连续操作、可直接放大等特点。由于膜过程特别适用于热敏性物质的处理，所以在食品加工、医药、生化技术领域有其独特的适用性。膜分离是解决当代的能源、资源和环境等问题的重要高新技术，并将对 21 世纪的工业技术改造产生深远的影响。已工业化应用的膜过程的分类及其基本特征见表 1-1。

表 1-1 中，微滤、超滤、纳滤、反渗透、气体分离等膜过程都属于以压力为驱动力的膜分离过程，即压力驱动膜过程。压力驱动的膜工艺的分类及其各自分离微粒或分子的大小范围见图 1-2。

### 1.1.3 膜的性能

#### 1.1.3.1 膜通量和膜的过滤方式

膜通量是单位时间单位膜面积上通过的物质的量。在水处理中膜通量的单位是  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  或者  $\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。在膜分离过程中，影响膜通量的主要因素有：

表 1-1 已工业化应用的膜过程的分类及其基本特征

过程	分离目的	透过的组分	截留组分	透过的组分在料液中的含量	推动力	传递机理	膜类型	进料和透过物的物态	简图
微滤 MF	溶液脱 粒子 气体脱 粒子	溶液、气 体	0.02 ~ 10 $\mu$ m 粒子	大量溶 剂及少量 小分子溶 质和大分 子溶质	压力差 约 100kPa	筛分	多孔膜	液体或 气体	
超滤 UF	溶液脱 大分子、大 分子溶液 脱小分子、 大分子分 子级	小分子 溶液	1 ~ 20 nm 大分子 子溶质	大量溶 剂、少量小 分子溶质	压力差 100 ~ 1000 kPa	筛分	非对称 膜	液体	
纳滤	溶剂脱 有机组分, 高价离子 脱, 软化, 脱色, 浓 缩, 分离	溶剂、低 价小分子 溶质	1nm 以 上溶质	大量溶 剂, 低价小 分子溶质	压力差 500 ~ 1500 kPa	溶解扩 散 Donna 效应	非对称 膜或复合 膜	液体	

过程	分离目的	透过的组分	截留组分	透过的组分在料液中的含量	推动力	传递机理	膜类型	进料和透过物的物态	简图
反渗透 RO	溶剂脱除、含小分子溶质溶液浓缩	溶剂, 可被电渗析截流组分	0.1 ~ 1nm 小分子溶质	大量溶剂	压力差 1000 ~ 10000kPa	优先吸附毛细管附流, 溶解-扩散	非对称复合膜或膜	液体	
渗析 D	大分子溶质溶液、脱小分子溶质、大分子	小分子溶质或较小的溶质	>0.02 μm 截留, 血液透析中 >0.005 μm 截留	较小组分或溶剂	浓度差	筛分、微孔膜内的受阻扩散	非对称膜或交换膜	液体	
电渗析 ED	溶液脱除小离子、小离子的浓缩、小离子的分离	小离子组分	同名离子、大离子和水	少量离子组分、少量水	电化学势电-渗透	反离子交换膜的迁移	离子交换膜	液体	

续表

过程	分离目的	透过的组分	截留组分	透过的组分在料液中的含量	推动力	传递机理	膜类型	进料和透过物的物态	简图
气体分离(GS)	气体混合物分离、富集或特殊组分脱除	气体、较小组分或膜中易溶组分	较大组分(除膜中溶解度高)	二者都有	压力差 1000~10000kPa 浓度差 (分压差)	溶解-扩散分子筛扩散	均质复合膜、非对称膜多孔膜	气体	
渗透汽化(PVAP)	挥发性液体混合物分离	膜内易溶组分或挥发组分	不易溶解组分、较大、难挥发物	少量组分	分压差 浓度差	溶解扩散	均质复合膜、非对称膜	液体为液体透过物为气态	
乳化液膜(促进传递)ELM(ET)	液体混合物分离、富集、特殊组分脱除	在液膜相中有高的溶解度的组分或能反应组分	在液膜中难溶解组分	少量有机混合物中,也是大量的组分	浓度差 pH差	促进传递和溶解扩散传递	液膜	通常为液体也可分为气体	



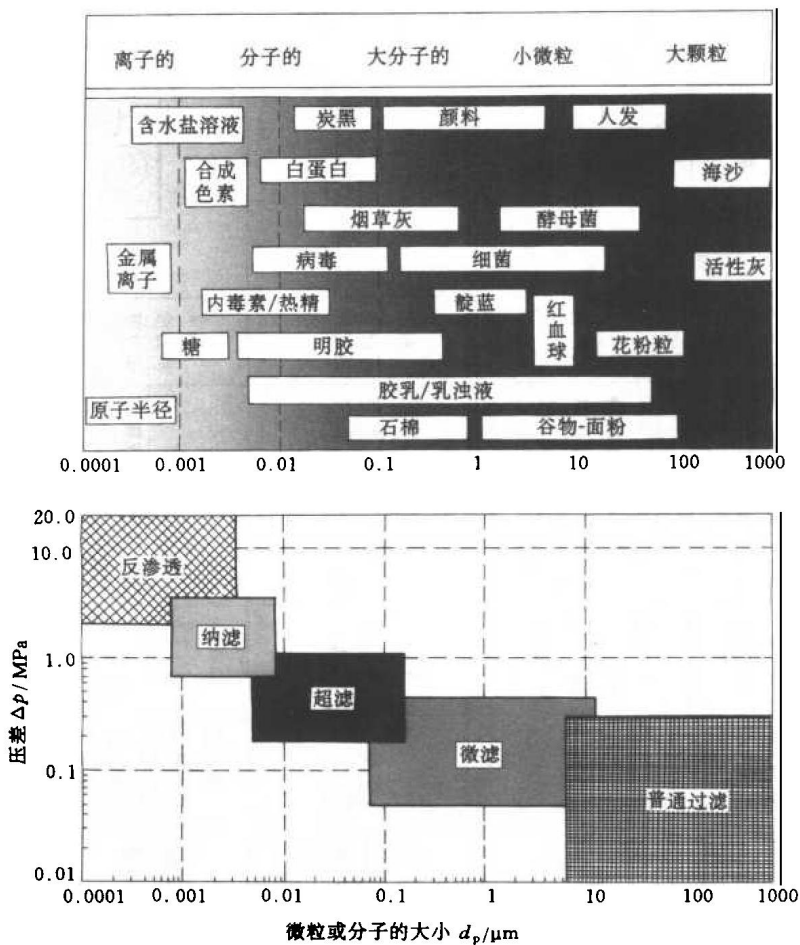


图 1-2 压力驱动膜的工艺分类及其对应分离的粒子大小

注：1.  $1\text{m} = 10^3\text{mm} = 10^6\mu\text{m} = 10^9\text{nm} = 10^{10}\text{\AA}$ 。

2. 水分子的直径为  $0.28\text{nm}$ 。

- 膜的阻力；
- 单位膜面积上的驱动压力；
- 膜表面的水动力学状况；