

译者序

据联合国公布的数据,目前全球超过 10 亿人口居住在水资源稀缺地区,而到 2025 年,这个数字将会攀升至 18 亿。海水淡化方法有海水冻结法、电渗析法、蒸馏法、反渗透法、以及碳酸铵离子交换法,反渗透膜法及蒸馏法是市场中的主流。随着高分子材料技术和制造工艺的进步,反渗透膜法淡水获取成本也在不断降低。在淡化技术先进的国家,海水淡化的成本已和传统自来水的价格相差无几,淡化水量也达到了为整座城市的供水规模。

本文译自《日本海水学会志》第 63 卷,作者谷口雅英为日本东丽(TORAY)株式会社水处理技术部专家。文章从技术层面客观阐述了 RO 膜海水淡化技术的现状和未来的发展趋势。具有一定的学术参考价值。 2017 年 1 月

RO 膜海水淡化技术的现状与展望

译者:周华东

Present State and Prospective of Seawater Desalination Technology Using Reverse Osmosis(RO) Membranes

Zhou Huadong

一、序言

地球,常被人们称为“水的行星”,地球表面 70% 的面积都被江河湖海所覆盖,地球水的总体积推算约有 14 亿立方千米,而人类可以直接利用的淡水,仅占其中的不足 1%,自 20 世纪中叶以来,随着世界人口的急剧增长,淡水资源不足,水资源环境恶化的问题在全球蔓延,并呈现明显扩大的趋势。2005 年全球淡水的需求量为 3.8 兆立方米/年,保守预计,到 2015 年将达到 4.2 兆立方米/年(图 1)。从江河取水净化的传统手段已无法满足巨大的淡水需求。中水再利用、海水淡化制造饮用水的技术日益为各国重视和推进。特别是海水淡化领域,在热源丰富的中东地区,已建成投入使用的蒸发法海水淡化工厂,每日可处理淡化 1800 万立方米的海水。近年来,国际上对低碳、节能的呼声越发提高,进入 21 世纪,新建的海水淡化工厂开始普遍采用反渗透膜(Reverse Osmosis, RO)技术。RO 膜海水淡化技术,源于 1960 年原美国总统肯尼迪的一次演说。由美国率先开始研究,此后日本等国家陆续积极投入研发,发展到如今,已成为一种实用的技术。本文主要介绍使用 RO 膜的海水淡化技术和其发展前景。

二、海水淡化 RO 膜

1、RO 膜概要

RO 膜,是一种能将溶解盐类分子分离的薄膜,用于将纯水从含有高分子、各种溶解盐类的溶液中分离。用于海水淡化时,薄膜两侧分别为高浓度海水和淡水液体,膜间会因此产生较高的渗透压(2 MPa 以上),此时若在海水一

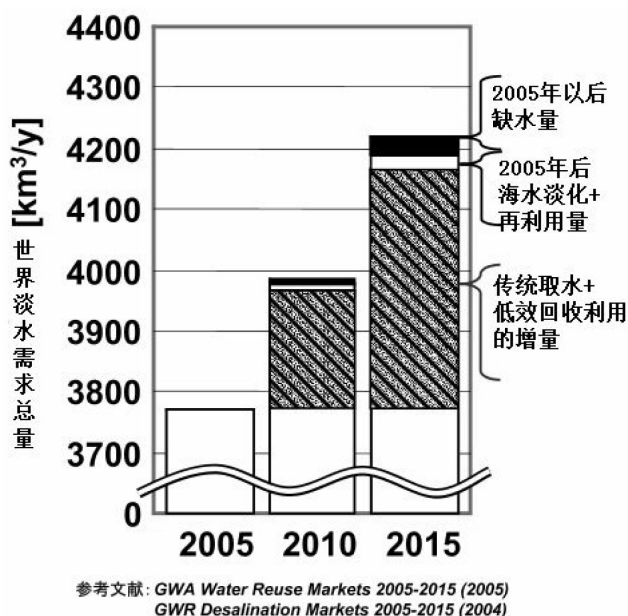


图 1 Forecast of water demand and supply in the world

侧施加高于这个渗透压的反向压力,则淡水会从海水中反向渗透出来。作为 RO 膜的材料,最开始使用的是醋酸纤维素,此后高分子材料技术的进步,演进为聚酰胺类的复合材料。聚酰胺的分离性能优于醋酸纤维素,但对水分子的透过阻力也不低。为减小阻力,就必须尽可能减小分离机能层的厚度,故而在实际的淡化设备中,都加入多孔质支持膜和无纺布作为强度支撑材料制成复合膜(图 2)。将这类复合膜与网状导水材料交错叠加,形成环状渗透膜元件,再将多个元件连接组成渗透模块(图 3),海水淡化时,一般将 6-8 个渗透元件组成模块,再将若干模块并行排列

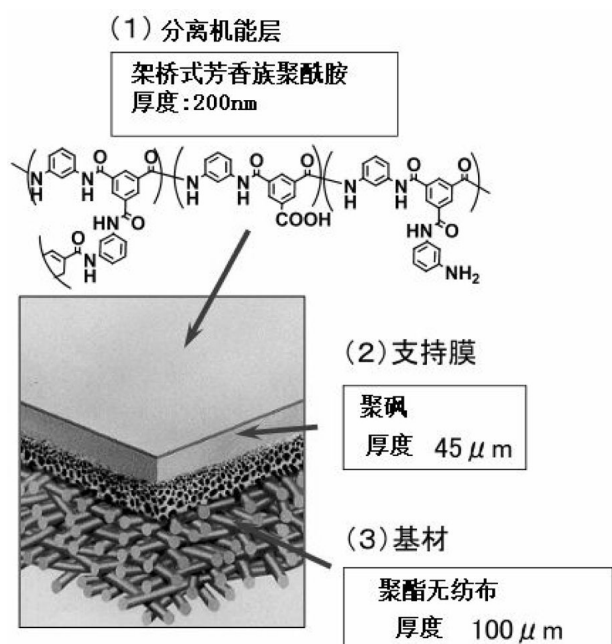


图 2 Cross-sectional image of RO composite membrane

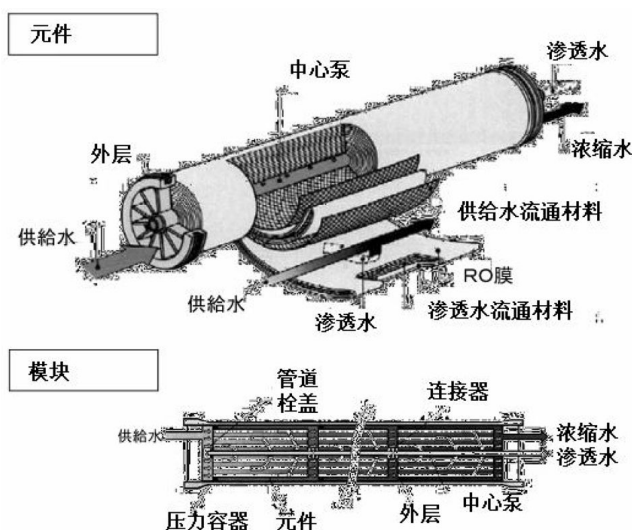


图 3 Spiral wound type RO element and module

装填入圆柱形压力容器, 由压力泵施加足够压力, 而获取渗透淡水。

2、RO膜的技术进步

(1) 透水性能

透水性能与分离性能通常都是互斥的关系, 提高分离性能必然会牺牲透水性能。在聚酰胺复合膜的研究开发领域, 将分离技能层制成褶皱结构, 得以增大膜的接触面积, 此法即能确保分离性能, 又能提升透水性能。目前, 主流的渗透元件为 8 英寸元件 (20cm 直径 × 1 m 长)。更大的 16 英寸元件 (40cm 直径) 也开始在新加坡等大型的海水淡化工厂使用, 极可能成为今后的主流元件。(图 4)



图 4 16-inch (Left) & 8-inch (Right) RO elements

(2) 分离性能

RO 膜的分离 (溶质阻塞) 性能, 取决于高分子聚合物的分子间隙和膜表面的荷电特性, 海水淡化所使用的 RO 膜, 主要分离的对象是盐分, 如图 5 所示, 目前的技术已使分离率达到 99.5% 以上。另一方面, 对于海水中存在的非电离状态的硼 (4~7mg/l), 其分子直径为 0.4nm。普通 RO 膜很难将其全部去除。1990 年时的去除率不到 90%, 此后又经过 10 余年发展, 已达到接近 95%。而在实验室, 采用分子动力学 (Molecular Dynamics, MD), 正电子寿命测定法 (Positron Annihilation Lifetime Spectroscopy, PALS) 对 RO 膜分子锁间隙进一步改进, 也开发出了去除率在 95% 以上的海水淡化 RO 膜。

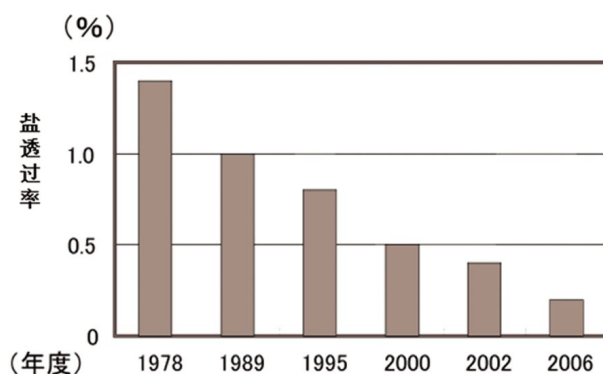


图 5 Trend of salt rejection by RO membrane

(3) 耐久性

海水淡化 RO 膜, 因工作时需要承受高压, 对其物理的耐久性就有较高要求。较早的 RO 膜和支撑膜, 会因高压使自身密度增加, 致使透水性能低下。最近几年的研制出的多款耐压 RO 膜, 已将该问题解决。在 1996 年研发并投入实用的浓缩水升压二段法超高压反渗透元件, 耐压能力已达到 10MPa。

在化学耐受性方面,迄今为止的研发,已使 RO 膜在耐酸碱方面有很好的表现。但对广泛用于水体杀菌的次氯酸类,耐受力依然欠佳。在使用反渗透膜技术进行海水淡化时,需严格避免反渗透膜与次氯酸物质有接触。

三、海水淡化 RO 系统

1、海水淡化 RO 发展动向

如前所述,蒸发法在水资源枯竭、热源丰富的中东地区有较多实际应用。主要原因是海水淡化反渗透膜技术实用化起初,RO膜性能尚不完善,加之波斯湾海域高温、高浓度、高混浊的海水,在制水成本和公众认知信任程度上,都逊于蒸发法。因此海水淡化 RO 系统,在中东以外的缺水区域(地中海、加勒比等)却有较多建设。随着 RO 膜性能、能源效率、运转技术的改进,能源消耗量已大幅降低(图 6)。淡化水成本即便是在中东地区也已优于蒸发法(图 7)。在碳排放指标上,RO 法较蒸发法更具优势(表 1),建成和在建中的 RO 法大型海水淡化工厂在全球已初具规模(表 2)。

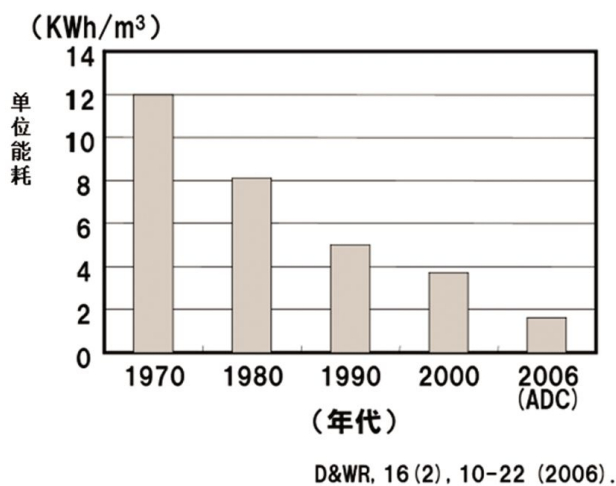


图 6 Energy consumption of RO seawater desalination process

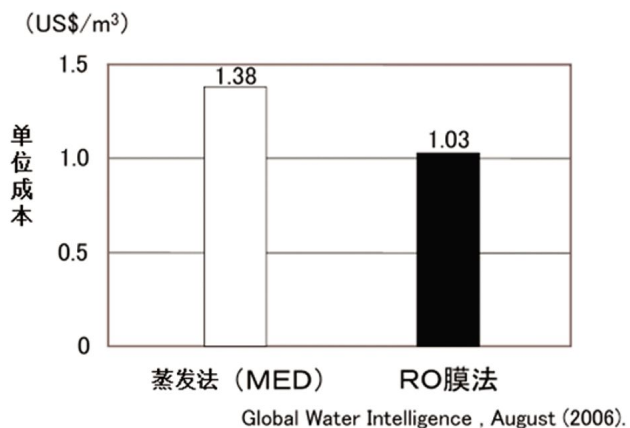


图 7 16-inch(Left) & 8-inch(Right) RO elements

表 1 Energy consumption and CO₂ emission of desalination processes

	蒸发法	RO 膜法
热能 [kWh/m ³]	50~60	无
电能 [kWh/m ³]	2~4	4~6
CO ₂ 排放量 [kg/m ³]	12~15	2.3~3.4

【东丽试算】

表 2 Large seawater desalination plants in the world

	国家	建设地	制水量*(m ³ /日)	运行时间	RO 膜厂商
1	以色列	亚实基伦	330,000	2005	Dow FilmTec
2	沙特	Shuqaiq	216,000	(2010)	东洋纺
3	阿尔及利亚	Hamma	200,000	2008	东丽
3	阿尔及利亚	Beni-Saf	200,000	2008	Hydranautics
3	西班牙	VALDELENTISCO	200,000	2008	Dow FilmTec
6	UAE	富吉拉	170,550	2003	Hydranautics
7	沙特	Rabigh	168,000	2009	东洋纺/日东电工
8	沙特	Shuaiba	150,000	(2009)	东丽
9	澳大利亚	Perth	144,000	2007	Dow FilmTec
10	特立尼达和多巴哥	POINT LISA	136,380	2002	东丽
10	新加坡	Tuas	136,380	2005	东丽
10	科威特	Shuwaykh	136,380	(2010)	东丽
13	澳大利亚	Gold Coast	132,500	2008	Hydranautics
14	沙特	Yanbu	128,000	1998	东洋纺
15	西班牙	Carbonera	120,000	2001	Hydranautics
16	沙特	jiddah	113,600	1994	东洋纺

* 制水量 1 万 m³/日,相当于 4 万人的生活用水

以下结合图 8,依次简要介绍海水淡化 RO 的基本处理流程和特征。

2、取水·前处理

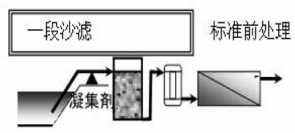
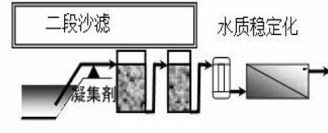
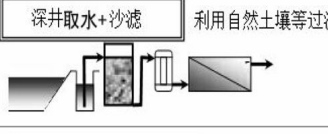
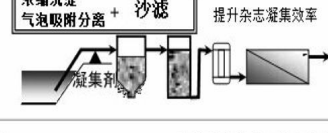
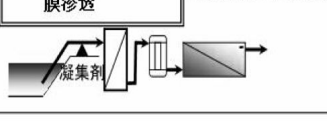
取水,分为表面海水直接获取和地下深井抽取两种,地下抽取方式的水源,经天然泥沙土壤的等过滤,水质相对较好;如福冈的海水淡化工厂,经反复勘测,将取水设施置于海底,利用海底泥沙对海水进行初步天然过滤。但这种方式受地理环境,综合建设成本等客观约束多,具体案件还需具体分析。

渗透前处理(表 3),即通过沙滤、多段冲洗、浓缩沉淀、气泡吸附分离等手段方式,提高反渗透处理前原水水质。高分子材料的成本降低,也有很多将微滤膜(MF)/超滤膜(UF)应用到 RO 前处理的案例。

3、RO 过程

RO 过程,旨在尽可能提高回收率,将经过前处理的海水转换为淡水。为实现高回收率,普遍使用浓缩水升压二段法,(具体案例,特立尼达和多巴哥共和国的海水淡化)RO 膜性能的提升,还可以使前处理的环节得到一定

表 3 Examples of pre-treatment processes for RO desalination

前处理过程	特征
 <p>一段沙滤 标准前处理</p>	易运维 受原水影响大, 处理水质不稳定 不能有效处理油脂、有机物等
 <p>二段沙滤 水质稳定化</p>	较一段沙滤, 水质稳定性得到改善 依旧不能有效处理油脂和有机物等
 <p>深井取水+沙滤 利用自然土壤等过滤</p>	深井获取水质品质较好 受地理条件限制 水量不稳定
 <p>浓缩沉淀 气泡吸附分离 + 沙滤 提升杂质凝集效率</p>	可以处理油脂及有机物 需要使用大量凝集药剂
 <p>膜渗透 膜分离技术(提高水质)</p>	水质良好稳定 设备小型化 存在膜结垢使出水量锐减的问题

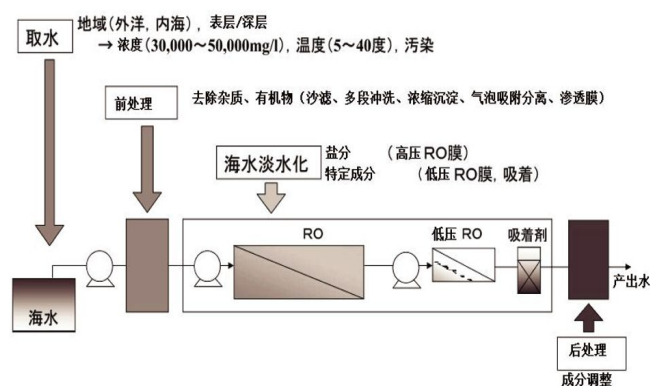


图 8 Basic flow diagram of RO seawater desalination

简化(压缩海水处理成本), 能量回收装置的技术进步, 也不再苛求 RO 过程的高回收率, 转而通过计算得出反渗透处理的最佳海水浓度和温度等。特别提一下能源回收装置, 在海水淡化领域, 从逆转泵、帕尔登水轮机, 发展到新型的压力交换式(Isobaric)能量回收装置。能量回收率已从 70~90% 提升到 95%。

4、多方式混合系统

如今, RO 膜技术在节能和成本方面, 都已优于蒸发法, 且还有不少优化的空间。在中东亦有多家 IWPP (Independent Water and Power Producer) 在推进。火力发电站的余热可用户蒸发法淡化海水, 在用电旺季, 启动蒸发法, 用电淡

季, 转为 RO 膜法。试算得出, 这种可切换的混合方式海水淡化系统, 可使该地区的石油消费量减少 40%。

四、海水淡化系统的未来

1、对关键技术要素的期待

RO 膜海水淡化技术, 经过 40 余年的持续研发, 已成为解决淡水不足问题的主要技术之一。同时如何安全处理废水, 也成为广泛关注的课题。

海水淡化会产生的废水主要是药剂废液和高浓缩海水, 因 RO 过程中的非药剂手段的除垢杀菌技术还有待研发, 药剂废液产生于前处理过程的凝集剂和杀菌剂。凝集剂, 杀菌剂的作用是在前处理阶段维持水质, 期待将来可实现仅利用微滤膜(MF)/超滤膜(UF)的膜分离特性, 在保证高透、低垢的同时, 亦能达到相同的水质维持效果。而对于后者(高浓度海水), 为防止在 RO 阶段发生结晶大量析出, 原则上都需控制反渗透海水的浓度阈值, 如果能在渗透膜表面、反渗透模块的结构上加以改进, 使其有效解决析出结晶的附着滞留问题, 海水淡化系统整体融通性将得到提升。

减少杀菌药剂使用的关键是防止 RO 膜结垢, RO 膜低垢技术, 当前已成熟运用在中水循环再利用的低压反渗透膜中, 今后定会延展到海水淡化反渗透膜。

2、系统整体的优化

海水淡化反渗透技术, 需要对海水施加 2MPa 以上的压力以对抗海水自身的渗透压, 加压需要消耗能量。对这些能量的高效利用、回收、再利用则是一个系统工程。能源形式多样, 水力、火力、风力、核能、太阳能, 也需因地制宜, 选择一种或多种混合能源。

如前文所述, 在中东地区, 蒸发法 + RO 膜的混合技术已开始实用, 更有膜蒸馏法 (Membrane Distillation) 技术, 已研究探索了 20 余年, 相信也将走出实验室开启实际运用。

除此之外, 还有利用中水处理、海水淡化处理产生的高浓度浓缩废水进行盐差能发电、深海海水淡化系统等与海水淡化相关的多种研究开发。这些技术研究成果如何转换为商用, 除了从技术角度, 还要从经济、社会、环境等角度进行综合论证和评估。2009 年, 在日本国内, 由 20 余家水处理企业共同筹划的海外水循环协会(GWRA)正式成立。期待日本的水处理技术在解决淡水缺乏问题上能为世界做出更多贡献。