

国际工程科技发展战略高端论坛

International Top-level Forum on Engineering Science
and Technology Development Strategy

中國工程院
CHINESE ACADEMY OF ENGINEERING

膜技术在水和气体 净化中的应用

MEMBRANE
TECHNOLOGY
FOR GAS AND LIQUID
SEPARATIONS AND
PURIFICATIONS

高等教育出版社

国际工程科技发展战略高端论坛

International Top - level Forum on Engineering
Science and Technology Development Strategy

中国工程院
CHINESE ACADEMY OF ENGINEERING

膜技术在水和气体净化中的应用

MO JISHU ZAI SHUI HE QITI JINGHUA ZHONG DE YINGYONG

MEMBRANE TECHNOLOGY FOR GAS AND LIQUID SEPARATIONS AND PURIFICATIONS

高等教育出版社·北京

内容提要

膜技术在水和气体净化领域的应用已成为全球环境保护的重要措施之一。根据2013年中国工程院举办的国际工程科技发展战略高端论坛——“膜技术在水和气体净化中的应用”，十余位来自美国、欧洲、新加坡及我国顶级膜技术领域的专家就膜技术在污水回用领域的应用、海水淡化采用膜技术的经济性、气体膜在石化领域的应用以及未来膜技术的发展趋势等议题进行了深入的研讨。其中，欧洲膜材料协会主席 Enrico Drioli 和新加坡膜技术中心教授 Tony Fane 针对新型膜过程如膜蒸馏、正渗透、膜乳化、膜冷凝、膜结晶等的最新研究进展进行了深入讲解；美国工程院院士 William J. Koros 针对气体分离膜材料和气体分离膜应用等进行了全面介绍。全书重点介绍了膜过程、膜材料、膜应用等研究领域的最新进展。书中既有概括性的论坛综述，也提供了各位专家的报告内容。

本书是中国工程院国际工程科技发展战略高端论坛系列丛书之一，具有较为重要的参考价值，可供国内外相关科研院所从事膜技术领域研究的人员及高校师生参阅。

图书在版编目(CIP)数据

膜技术在水和气体净化中的应用：汉英对照 / 中国工程院编著. — 北京：高等教育出版社，2014.10
(国际工程科技发展战略高端论坛)
ISBN 978-7-04-041258-1

I. ①膜… II. ①中… III. ①薄膜技术-应用-净水-汉、英 ②薄膜技术-应用-空气净化-汉、英 IV. ①TU991.2②X51

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 237746 号

总策划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖 责任编辑 沈晓晶
封面设计 顾斌 责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 北京汇林印务有限公司
开本 850 mm × 1168 mm
印张 14
字数 256千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2014年10月第1版
印 次 2014年10月第1次印刷
定 价 80.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 41258-00

编辑委员会

主 任

曹湘洪

副主任

黎念之 高从堦

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其为人将承担相应的民事责任和行政责任；构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。为了维护市场秩序，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010) 58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010) 82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第一部分 综述

膜技术在水和气体净化中的应用国际高端论坛综述	3
------------------------------	---

第二部分 参会专家名单

参会专家名单	23
--------------	----

第三部分 主题报告及报告人简介

Membrane Engineering for an Innovative Process Engineering	Enrico Drioli, et al.	27
Survey on the Development of Membrane Science and Technology in China	Wanqin Jin, et al.	48
Membranes and Water—Recent Developments	Tony Fane, et al.	58
饮用水安全问题与膜法水处理技术进展	侯立安 等	70
纳滤膜法处理和回收废水中低浓度全氟辛酸铵	万印华 等	83
Large Scale Gas and Vapor Separations Using Membranes—A Pragmatic Perspective	William J. Koros	96
Preparation and Application of Zeolite Membranes in Pervaporation	Xuehong Gu	132
Nanoparticles(and Nanotubes) in Membranes for Liquid and Gas Separations; A Brief Overview	Kamalesh K. Sirkar	139
Study and Application of CO ₂ Separation Membranes	Yiming Cao, et al.	163
Anti-protein-fouling Strategy in Microfiltration and Ultrafiltration Membranes; A Mini-review Focusing on “Grafting from” Polymerization of Zwitterions	Xiaolin Wang, et al.	183
Investigations and Applications of New Type Ion Exchange Membranes	T. W. Xu, et al.	206
后记		215

第一部分

综 述

膜技术在水和气体净化中的应用

国际高端论坛综述

一、引言

2013 年 10 月 16 - 17 日,由中国工程院主办的“膜技术在水和气体净化中的应用”国际高端论坛在中国科学院过程工程研究所举行。中国工程院院士高从堦、侯立安、曹湘洪参加论坛,来自海外以及全国相关科研院所及高校的 160 多名代表参加了这一膜技术领域的高端盛会。

本次论坛特邀了美国工程院院士 Norman Li、美国膜材料协会主席及美国工程院院士 William J. Koros、欧洲膜材料协会主席 Enrico Drioli 等在膜技术研究领域有影响力的知名专家学者到会作主旨报告,以膜技术在水和气体净化中的应用为主题,重点就膜过程、膜材料、膜应用等研究领域的最新进展进行专题报告。欧洲膜材料协会主席 Enrico Drioli 和新加坡膜技术中心教授 Tony Fane 针对新型膜过程,如膜蒸馏、正渗透、膜乳化、膜冷凝、膜结晶等的最新研究进展进行了深入讲解;美国工程院院士 William J. Koros 针对气体分离膜材料和气体分离膜应用等进行了全面介绍。

与会中外专家学者就膜技术在污水回用领域的应用、海水淡化采用膜技术的经济性、气体膜在石化领域的应用以及未来膜技术的发展趋势等问题进行了深入研讨。

膜技术在水和气体净化领域的应用是全球的发展趋势。各种耦合技术,如反渗透与正渗透耦合以降低能耗和产水成本、反渗透与膜蒸馏技术的耦合以实现零排放为目标将是未来膜技术在污水回用领域的发展趋势。未来对膜过程的研究主要是如何降低膜过程的能耗。

二、报告内容

(一) 膜过程——创新的过程工程

1. 膜技术在过程强化中的应用

目前,膜工程对各个领域的影响不断增加。海水和苦咸水脱盐、工业水的回

用、废水处理、气体分离、膜生物反应器(MBR)、人工合成有机物工业均为膜过程成功的典型案例。其他膜过程,如MBR被认为是最可行的技术。膜成功应用的动力在很大程度上源自膜的基本特性,如节能、环境影响小、无化学试剂及易于自动化等。这与过程强化战略紧密相关。

目前,全球所面临的关键问题是如何维持工业的稳定增长,过程强化是可行的解决方案,膜在过程强化中起到重要作用。它具有替代传统能量强化技术的潜力,实现特种组分的选择性和高效传递,提高反应过程性能。在膜的运行系统中,反渗透(RO)膜系统的脱盐效率是热法的10倍;MBR的紧凑程度是传统淤泥法的5倍多;燃料电池与RO单元组合的效率是热法的16倍。

海水脱盐所用膜的产能为430亿t/d,占整个脱盐市场的63%,脱盐市场不断增长,其中海水反渗透脱盐将占到反渗透脱盐技术的80%。

2. 绿色、环境友好的溶剂/稀释剂

在过去的30年中,聚偏氟乙烯(PVDF)作为制备膜的合适材料,已广泛用于制备MF/UF膜。PVDF膜的制备方法为相转化法。相转化包括非溶剂诱导相转化(NIPS)和热致相分离(TIPS)。近年来,通常采用TIPS法制备PVDF膜。

在用TIPS法制备PVDF膜的过程中,稀释剂非常重要,其影响PVDF膜的形态、结构和性能。在高温下用TIPS法制备膜的合适稀释剂,应该与聚合物有相容性、具低挥发性和良好的热稳定性。另外,稀释剂相对分子质量较低、低毒及环境友好。Enrico Drioli教授在报告中总结了1990—2012年相关文献用TIPS法制备膜的稀释剂,如邻苯二甲酸酯、邻苯二甲酸二辛酯(DOP)、人造的酞酸二丁酯、二苯(甲)酮、碳酸二苯酯等。

意大利国家研究理事会膜技术研究所的Enrico Drioli教授带领他的课题组用广泛接触食物类聚合物(聚乳酸)的增塑剂乙酰基柠檬酸三丁酯(ATBC)作为制备PVDF的稀释剂。ATBC为水性和油性聚合的增塑剂,这些聚合物包括丙烯酸、甲基丙烯酸等聚合物体系。与DOP相比,制备硝酸纤维素薄膜时,它有许多改进,如低毒、寿命长。

3. 膜技术发展的新型膜过程

膜蒸馏:膜技术与蒸馏过程相结合的膜分离过程,它以疏水微孔膜为介质,在膜两侧蒸气压差的作用下,料液中挥发性组分以蒸气形式透过膜孔,从而实现分离的目的。膜蒸馏的优势有:理论上的100%截留率;占地面积小、结构紧凑、建设费用低;操作温度低、可利用废热、操作压力低,设备投资少,过程更安全、更容易操作等。

膜结晶:由膜蒸馏发展而来。与传统结晶技术相比,膜结晶的优势主要有:传

质面积大、诱导周期短、能够优化控制过饱和程度、异相成核的表面效应、由于聚合物膜表面导致成核自由能的降低、可控制低过饱和程度下的晶体成长速率、可控制晶型、晶体尺寸均一、晶体尺寸分布窄。膜结晶过程主要用于生产催化剂晶体以及无机、有机或生物材料的结晶,用于耐溶剂结晶过程、选择性的多晶形物结晶等。

膜乳化:膜乳化技术是 1988 年由日本科学家提出的新型乳化方法,该法是在一定的压力下,将分散相通过微孔膜分散到连续相中,其显著特点是乳状液液滴大小主要由微孔膜孔径来控制而呈单分散性。与传统乳化技术相比,膜乳化的优势有:能耗低、制备条件温和、可形成单分散胶团/微粒、胶团/微粒尺寸和形状均匀、通过改变膜孔尺寸和操作条件可以调控胶团/微粒的大小等。膜乳化作为一种新型的乳状液制备技术,可以制备各种类型粒径的单分散乳状液。膜乳化过程在食品乳状液、药物控释系统、单分散微球(囊)的制备等诸多领域有着广泛的应用前景。

膜冷凝:作为一种清洁的单元操作,膜冷凝可以作为废气的一种预处理手段,如作为 CO_2 废气进入另一个膜单元之前的预处理手段。与致密膜相比,膜冷凝操作压力低;与常规冷凝相比,膜冷凝没有腐蚀现象。

目前,耦合膜过程优势明显,其中,FO-RO 耦合脱盐过程备受关注,该过程的分离原理是,待处理废水经过适当预处理后,泵入 FO 单元的进料液侧,将经过适当预处理的海水泵入 FO 单元的驱动液侧,通过 FO 膜,进料液侧待处理废水中的水通过 FO 膜进入到驱动液侧的海水中,进料液侧的废水被浓缩,而海水被不断稀释,被稀释后的海水再泵入反渗透系统进行处理,通过 RO,获得产品水和 RO 浓水。该过程的技术目标是实现电耗低于 $2.5 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,主要通过三方面实现:① 将水回收率再提高 30%;② 浓水再减少 30%;③ 产水的价格实现 0.6 美元/t。该耦合过程的研究重点主要集中在:① FO-RO 耦合过程的研究(包括原理、系统设计、系统结构等);② 新型 FO/RO 膜材料的研究;③ 污染控制技术研究;④ 预处理技术研究。

此外,MD/PRO 耦合脱盐过程也是一个研究热点,常规海水脱盐系统的回收率小于 40%~50%,通过这一耦合过程,可以处理反渗透海水淡化后的高含盐水,可将高含盐水排放量减少到 30%,能量回收 $5 \text{ W}/\text{m}^2$,实现水和能量资源的高效利用。

目前,GE 正在开展采用膜蒸馏技术浓缩高盐度废水(TDS 150~230 g/L)项目,膜蒸馏过程中没有膜性能的下降和膜结垢现象,目前 GE 正在寻找合适的试验地点,预计 2014 年膜蒸馏有可能会实现商业化模式运行。

4. 未来努力方向

为了适应主体和环境的变化,开发一系列新的、不同性能的膜。巧妙的质量/热传递规律;对危险环境(如军事、极限运动、空间站等)的自我维护及适应性;抗污染性、可冲洗性及自清洁性;对有害液体、辐射热、紫外及化学和生物试剂有更高的防护性;膜保护层的自修复;在极端环境和运行条件中具有更好的力学性能和耐化学性;膜用于长距离通信、数据存储和检测的传感器;开发预测材料的性能的模式。

(二) 中国膜科学技术发展的概况

1. 膜技术在中国的发展历史

中国膜技术始于 20 世纪 50 年代,在 90 年代后期得到迅速发展,90 年代 RO/NF 膜技术已经由实验室研究转向中试化研究,此时开始进行气体分离膜方面的研发,对于氮气、氢气的分离已取得较好的效果,还有一些专家进行了渗透蒸发、膜蒸馏、膜反应器等方面的研究,从 2000 年到目前,膜科技在中国取得了显著进步,出现了一些新的膜材料(PVDF、PES、PP 等)、制备方法(NIPS、TIPS 等)、新的膜过程(MD/MBR)等。

2. 中国膜科学技术的现状

最近几年,膜分离技术的发展得到了国家相关部门的高度重视,国家重点基础研究计划(“973”、“863”)和国家自然科学基金项目均对膜研究给予专项资金支持,从而使得我国的膜分离技术取得很好的成就。目前,中国膜研究机构及公司有 1000 多家,约有 300 多家公司可以生产膜,如膜天、赛诺等;研发成果也已经在工业处理、海水淡化等领域得到应用。

3. 典型膜技术

(1) MF/UF

主要介绍了两种材质的膜,即 PVDF 和 PVC,PVC 膜由于具有优良的化学稳定性、成本低,且具有较高的性能,被广泛应用,此膜材料主要采用 NIPS 方法进行制备。台湾高雄自来水厂采用海南立昇公司生产的 PVC 超滤膜建成亚洲最大的超滤自来水生产厂,规模达到 $30 \text{ m}^3/\text{d}$ 。结合膜天公司采用 TIPS 法生产的 PVDF 超滤膜,介绍了 TIPS 膜制备方法的发展。TIPS 膜制备方法的关键是选择合适的溶液完成 PVDF 膜的液液分离。

(2) NF/RO

由均苯三酰氯与芳香二胺通过界面聚合形成聚酰胺复合膜是目前海水淡化反渗透膜的主要制备方法。我国长春应用化学研究所自行设计制备的基于联苯

四酰氯(BTEC)、联苯三酰氯(BTRC)、芳香三胺(TAM)等新型单体的新的聚酰胺膜材料,突破了由均苯三酰氯(TMC)与芳香二胺制备反渗透复合膜的限制,研究表明基于三胺单体的反渗透复合膜,TMC膜比MPD膜水通量提高近30%,为进一步优化成膜工艺制备提供可产业化的新型反渗透复合膜奠定基础。目前我国生产的反渗透膜元件达到国外先进水平,市场的占有率也在逐步增长,初步具备与国际抗衡的水平。

(3) 气体分离膜

已应用于气体分离领域的高分子材料有PDMS,PI,PMP,PPO,PT等,中国科学院大连化学物理研究所与中海油合作,将膜分离技术用于低品位天然气中回收甲烷、轻质油及液化气,总投资近500万,年处理量为1360万Nm³,解决了单井气田气源不稳定、CO₂含量高(80%以上)等技术难点。

(4) 其他一些典型的膜材料

A. 沸石分子筛膜

沸石分子筛膜是将沸石制备成厚度为微米级的薄膜,实现分子的分离,重点介绍了NaA型和MFI型沸石膜。国内不少大学都在研究沸石膜的制备,不过目前尚未有工业应用实例,到目前为止,仅日本某企业在20世纪90年代成功建成并投产了一套NaA沸石膜的工业装置,该装置用于醇/水分离。

B. 金属膜

金属膜具有良好的塑形、韧性和强度以及对环境和物料的适应性,因此得到关注。主要是钯膜、多孔Ti-Al、Fe-Al复合膜等。

4. 在中国膜技术发展趋势及其面临的挑战

国家“十二五”计划将重点扶持膜科技发展,膜产值到2015年要达到1000亿元,所以中国膜技术发展空间很大,极具潜力。

提到膜科技发展基础研究方面的三个问题:

- 1) 如何通过环境与分离性能关系提升膜过程的工艺设计水平;
- 2) 如何通过分离性能与材料结构关系将膜过程的设计从工艺设计推进到微观结构的设计;

- 3) 在应用过程中膜的浓差极化。

(三) 膜和水的发展现状

目前新加坡获取淡水资源的途径主要有以下三方面:雨水收集、海水淡化和废水回收。其中,雨水收集系统主要处理的是地表水资源,采用微滤膜(MF)和超滤膜(UF)过滤技术;海水淡化采用的是反渗透(RO)脱盐技术,过滤成本较大;工

业和生活废水的回收采用反渗透或是纳滤技术(NF)过滤二级处理水,以节约成本。这三种水处理技术均是通过膜技术来实现。膜技术已经成为新加坡获取淡水资源的中坚力量。从 Tony Fane 教授提供的数据可以看到,2010 年新加坡通过海水淡化技术为其国内提供了 10% 的水资源,而 2060 年这一数字将提高到 30%;另外,在 2010 年新加坡通过废水回收技术为其国内提供了 30% 的水资源,而 2060 年这一数字将提高到 50%。现在,每天通过膜技术处理的水量已经达到了 1 Mt,对于新加坡如此小的国土面积,这样的处理能力可谓相当可观。

1. 新型膜和膜过程

(1) 反渗透

反渗透(RO)技术是目前海水淡化工厂最常采用的工艺。近年来建造的海水淡化工厂规模越来越大。更多的处理量要求意味着更大的膜组件,对膜通量的要求也更高,这些方向也是膜科学中心的研究热点。目前提高膜通量的一种研究方向是在膜片中添加带有孔道的纳米物质,比如碳纳米管、沸石、石墨筛等无机材料。另外一种是根据仿生学原理,在反渗透薄膜中添加水通道蛋白,这种方法对膜通量性能的提高非常明显,从而减少水处理工厂的能源浪费。但是由于浓差极化(CP)的影响,膜片通量的提高并不意味着膜组件通量的提高。为了降低浓差极化的影响,需要改进膜组件的设计,比如对导流网的重新设计、膜组件之间连接方式的改进等。

(2) 正渗透

正渗透(FO)的低能耗和能量回收优势,使其成为一个热点问题,它是一种依靠渗透压驱动的膜分离过程,即水通过选择性半透膜从较高水化学势区域(低渗透压侧)自发地扩散到较低水化学势区域(高渗透压侧)的过程。正渗透过程的驱动力是驱动液与原料液的渗透压差,不需要外加压力作为驱动力。与反渗透过程相比,正渗透具有如下优点:膜污染较轻、无需外加压力、能耗低、回收率高、浓水排放量少、污染小、环境友好。在 FO 过程中,膜是一个关键因素。近来,SMTC 已经制备出用于 FO 过程的平板膜和中空纤维膜。

(3) 膜蒸馏

膜蒸馏(MD)凭借其高水回收率、高脱盐率而备受关注,它能处理反渗透不能处理的高盐水,并且可利用工业废热。膜蒸馏是采用微孔疏水膜,以膜两侧蒸汽压差为驱动力的一种新型膜分离过程。它可以算是迄今为止脱盐效率最高的膜技术。膜蒸馏所用的膜为不被待处理溶液润湿的疏水微孔膜,即只有蒸汽能够进入膜孔,液体不能透过膜孔。用于膜蒸馏过程的膜需要有强疏水性和高孔隙率,目前 SMTC 已开发了超疏水膜蒸馏膜的制备技术。

(4) 延迟渗透

将正渗透膜稍微改进,就可用于延迟渗透(PRO)膜过程。PRO过程可以根据盐梯度产生能量,如根据海水/河水的含盐量梯度,用于海水/河水处理。近来,SMTC已经制备出用于PRO过程的平板膜和中空纤维膜。

(5) 膜蒸馏结晶

膜蒸馏结晶(MDC)是由膜蒸馏演变而来,对于经过反渗透海水淡化后的浓水以及其他的浓缩盐类,可以通过膜蒸馏结晶处理来分别回收水分和盐类固体。膜蒸馏结晶过程的两个难点是需要将结晶过程控制在膜组件外部结晶,并且需要优化整个过程的能量利用。过程的权衡以及优化控制可以采用Aspen模拟软件模型模拟。

(6) 新型膜生物反应器(MBRS)

SMTC在常规膜生物反应器的基础上,正在致力于开发新型膜生物反应器,如膜蒸馏生物反应器(MDBR)和正渗透生物反应器(FOBR)。MDBR和FOBR均是具有高截留率的膜生物反应器(HRMBR),它们采用特种膜,都可以在 $ORT \gg HRT$ 下运行,为难降解物质的处理提供充分时间。这两种膜生物反应器的优势是都可以利用低温热、产水水质更好。HRMBR的特点是盐类可以大量累积,这样就需要适盐菌。此外,MDBR也需要最低能耐 55°C 的嗜热菌。MBR也改进为流化床厌氧膜生物反应器,流化床厌氧膜生物反应器的优势是污染少、沼气量小。另外,萃取膜生物反应器可用于进料废水里有机溶剂的萃取过程。接下来几年内,MBR+RO将成为污水处理回用的发展趋势。

2. 未来的展望

膜法污水回用是全球的发展趋势,膜法污水回用过程中,RO仍是主导,但是在反渗透膜、膜组件以及操作模式上尚需改进和提高。FO和MD凭借其能量再生优势,在水回用方面的作用越来越突出。

未来对膜过程的研究主要是如何降低膜过程的能耗。未来的主要研究方向主要集中在:①低能量消耗的预处理工艺;②高通量反渗透膜的制备;③耦合工艺,如FO-RO-PRO的发展;④新型污染控制技术的开发;⑤厌氧工艺的使用;⑥苦咸水浓缩。上述问题的解决,可有效提高膜技术在水回用领域的优势。

(四) 我国饮用水安全及膜法水处理应用现状

1. 饮用水安全概述

世界卫生组织(WHO)调查资料显示,全世界约80%的疾病和50%的癌症与饮用不洁的水有关。当今,中国工业高速发展,人民享受经济发展的成果,然而,

我国的环境日益成为最重要的问题,特别是水资源安全。没有安全的水资源社会的可持续发展无法实现。在中国,饮用水安全包括两个方面:一个是在特定时间和区域因为大雨从而导致洪水泛滥;另一个是由于污染或干旱导致水资源短缺。

在过去的 20 年里,中国的洪水灾害不断增加,如何使用雨水作为饮用水,特别是在雨期,是一个热点问题。在干旱地区,地下水是最重要的饮用水来源,但一些二价离子如砷和溴等将造成严重的健康危害,需要除去这些有害物质。在中国的东部和南部,虽然有很多河流和湖泊,但水污染很严重,污水处理和减少排放被认为是保护水资源的两个有用的方法。

2. 饮用水安全面临的挑战

1) 我国水资源总现状堪忧:① 水资源匮乏;② 水资源分布不均;③ 地下水水质恶化;④ 湖泊水质堪忧。

2) 污染物种类多元化:① 悬浮物污染;② 氮磷有机物污染;③ 重金属污染;④ 酸碱污染;⑤ 难降解有机物污染;⑥ 放射性物质污染;⑦ 热污染;⑧ 特种污染物。

3) 传统净水工艺面临新挑战:① 新污染物不断出现,污染日趋复杂,饮用水呈现污染物复合、污染过程复合以及污染效应复合的复合污染特征;② 《生活饮用水卫生标准》(GB5749—2006)全面实施,指标由 35 项增加到 106 项;③ 传统水处理工艺以去除水中悬浮物、胶体颗粒物为主,对小尺寸污染物,去除能力有限。

3. 膜法水处理技术的发展及应用现状

基于上述现状和需求,许多膜技术用于水处理以保证饮用水的安全。在中国,超滤过程被安装在超过数百个水处理厂中。例如,从 2009 年起,10 000 m³/d 的超滤膜组件装置在太湖运行,50 000 m³/d 的超滤装置在佛山市设计并建成。反渗透是另一种用于脱盐的膜技术,但水处理的成本较高,在中国很少有水厂使用。一些有机物不能被超滤脱除,反渗透可以将所有离子脱除,而纳滤可以脱除大多数有机物和二价离子,其通量高于反渗透。因此,纳滤过程被用于制备饮用水,一些小型的水厂也在北京、杭州等城市建成。将来,膜技术会更多的应用在非饮用水供应和污水处理过程中,如果一些非技术因素可以被消除,如膜技术处理的水允许进入管网系统,将缓解中国的水压力。

针对不同尺寸的污染物,可以使用不同类型的膜分离技术,特别适合于解决当前我国饮用水污染物多元化的难题。膜法处理饮用水的热点问题主要包括:① 增强膜的抗污染能力,延长使用寿命;② 膜法处理饮用水时,有益离子的保留问题;③ 基于膜过程的组合工艺设计及应用。

由于饮用水中可能含有多种污染物,单一的膜法处理饮用水可能难以完全保

证水的安全性,组合工艺处理法仍是饮用水处理的常用方式,膜组合工艺应用的实例——天津杨柳青水厂膜处理示范工程、曹妃甸 RO 海水淡化示范工程、太阳能动力膜过程系统、美国远途救援净水系统等。

4. 研究展望与建议

(1) 新型膜工艺流程设计与优化

研发先进的膜处理组合工艺,优化协同不同工艺、方法,探索联合净化方法,实现多种技术优势互补。

(2) 膜与组件及过程的研究

① 研发抗污染、抗氧化、高通量、机械强度高、寿命长、价格低廉的新型膜材料,如沸石分子筛、杂化材料、纳米材料、仿生材料、抑菌材料等;② 研发新型大单元膜组件及新型膜组件组合方式,推动膜用于水净化及深度处理过程;③ 研究水在膜内的传输机制和离子的截留机制等分离机制,反馈膜材料的设计。

(3) 非传统水源的综合利用

非传统水资源的开发利用主要包括雨水利用、污水资源化及“海水开源”三方面,传统水资源和非传统水资源的耦合互补利用,有利于解决饮用水供水矛盾。

(4) 加快推进制度建设

加快推进制度建设包括用水总量控制制度、用水效率控制制度、水功能区限制纳污制度、管理责任与考核制度等。

(5) 建设膜产业科技强国

我国膜产业虽已进入了快速增长期,但与国际水平相比尚有较大差距,高性能膜材料、膜组件等仍需进口,因此需要加大政策扶持力度、提升自主创新能力、深化国际交流合作、加强人才队伍和平台建设。

(五) 大型气体分离膜

膜技术在气体分离纯化领域中得以应用。论坛重点介绍了以膜技术作为主要手段,实现高回报、高效分离的技术实例,其中包括天然气中高浓度酸性气体的去除;膜诱导吸附法脱除烟道气中二氧化碳;丙烯和丙烷这两种难分离气体的分离;以及页岩气中脱水工艺这一极有意义的研究方向。通过几个大规模使用膜技术的实例来说明膜技术的成果,阐述气体膜应用未来的展望。

1. 膜的发展过程

20 世纪 60 年代以来,以超滤和微滤为代表的第一代膜过程。多孔结构膜如超滤和微滤的应用奠定了膜过程在工业领域应用的重要基础。

第二代膜过程催生的反渗透工艺,于 20 世纪 60 和 70 年代开始兴起。反渗