

我国中空纤维膜技术与产业发展战略研究

肖长发¹, 何本桥¹, 武春瑞¹, 龚耿浩¹, 蒋士成^{1,2}

(1. 天津工业大学分离膜与膜过程国家重点实验室, 天津 300387; 2. 中国石化仪征化纤有限责任公司, 江苏仪征 211900)

摘要: 中空纤维膜技术是解决当前全球面临的水资源与能源危机、环境污染等重大问题的共性关键技术之一, 也是节能减排、清洁生产、系统效率与产品品质提升等实现高质量发展的重要技术支撑。本文系统分析了中空纤维膜发展的战略需求、现状与趋势, 指出了我国中空纤维膜技术各个细分领域中存在的主要问题和未来创新重点, 明确了 2025 年和 2030 年的发展目标。研究提出中空纤维超/微滤膜、高品质疏水膜、新膜技术、废旧膜回收 4 个方面的重点任务与要求, 并从人才管理、创新投入、行业规范、国际合作 4 个方面给出了保障措施建议, 以期为我国中空纤维膜产业高质量发展提供参考。

关键词: 中空纤维膜; 膜材料; 膜应用; 可持续发展

中图分类号: TB332; TQ09 **文献标识码:** A

Development Strategy of Hollow Fiber Membrane Technology and Industry in China

Xiao Changfa¹, He Benqiao¹, Wu Chunrui¹, Gong Genghao¹, Jiang Shicheng^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Separation Membranes and Membrane Processes, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
2. Sinopec Yizheng Chemical Fiber Co., Ltd., Yizheng 211900, Jiangsu, China)

Abstract: Hollow fiber membrane (HFM) technology is one of the common key technologies for solving major problems including water and energy crises and environment pollution. It is also crucial for achieving high-quality development characterized by energy conservation, clean production, and improvement in system efficiency and product quality. In this article, the strategic demand, development status, and development trend of the HFM technology and industry are analyzed; the major challenges and innovation focus in its subfields in China are discussed; and the development goals by 2025 and 2030 are clarified. Moreover, four key tasks were proposed in terms of hollow fiber ultrafiltration/microfiltration membrane, high-quality hydrophobic membrane, new membrane technologies, and waste membrane recycling. Furthermore, measures and suggestions were proposed in terms of talent management, innovation investment, industry standards, and international cooperation, to provide a reference for the high-quality development of HFM technology and industry in China.

Keywords: hollow fiber membrane; membrane material; membrane application; sustainable development

收稿日期: 2020-08-07; 修回日期: 2020-10-16

通讯作者: 蒋士成, 中国石化仪征化纤股份有限公司教授级高级工程师, 中国工程院院士, 研究方向为化工、化纤工程设计及技术开发、技术管理; E-mail: jiangshc@cae.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国中空纤维膜技术产业发展战略研究”(2019-XY-27)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

中空纤维膜是功能纤维材料与分离膜技术交叉形成的新型膜技术产品，具有单位体积装填密度高、过滤面积大、占地面积小、成本相对低等优势，成为分离膜领域中发展最快、规模最大、产值最高的一类新型膜技术产品。中空纤维膜技术已成为环境保护、资源回收、新能源产业等领域共性关键技术和传统产业升级的重要共性支撑（见图1），被发达国家列入重点优先发展方向，也是我国战略新兴产业、科技创新发展规划的关键组成，如高性能分离膜技术被纳入《中国制造2025》重点工程项目。本文从膜材料、应用技术等多维度研究国内外中空纤维膜技术与产业发展现状，分析我国中空纤维膜技术与产业发展面临的关键问题、技术与政策瓶颈，明晰中空纤维膜技术与产业发展的重点任务和措施建议。通过总结和分析我国中空纤维膜技术和产业发展态势，为我国相关技术与产业实现高质量发展提供科学建议。

二、中空纤维膜技术与产业发展需求分析

（一）发展中空纤维膜技术是保障我国水安全的重要举措

水资源匮乏和水污染问题已成为制约社会进步和经济发展的瓶颈。我国主要城市中超过2/3的城市缺水，年缺水总量超过 4×10^{10} t。同时，我国每年污水排放量超过 7.5×10^{10} t [1]，而得到有效处理与回用的不足15%，造成严重的水资源浪费、水污染问题。膜分离技术被公认为是实现污水资源化、保障饮用水安全最有效的技术手段。随着近年来我国生活饮用水卫生标准的提高、城镇污水和工业废水排放标准的不断完善，自来水厂升级改造、污水/废水处理厂提标改造将进入了快速发展期，为中空纤维膜技术和产业发展带来新机遇和新要求。

（二）中空纤维膜技术是推动传统产业升级和新兴产业发展的重要支撑

近年来，中空纤维膜技术应用范围已经从水处



图1 中空纤维膜及其应用领域

理迅速拓展到石油化工、医药、生物、食品、电子、能源、大气污染控制以及航天、军工等领域，并逐渐替代蒸馏、萃取、吸附等传统分离技术，成为传统产业技术升级、新兴产业发展的重要支撑，为节能减排、清洁生产、产品品质与系统效率提升提供创新性技术支撑。因此，发展中空纤维膜技术是实现诸多行业高质量发展的战略需求。

（三）中空纤维膜高端技术和产业的创新发展日趋紧迫

历经 50 多年的发展，我国在反渗透、超滤和微滤等膜材料、组件及装置方面已经建立了较为完备的研发与产业体系，具有较强的国际影响力和竞争力；但膜科学基础及应用研究与国际顶尖水平仍有差距，高精度、高性能、特种分离膜产品与国际一流产品相比仍有较大差距，庞大的高端膜市场仍被国外企业垄断。面对发达国家对关键高新技术封锁或保护的不到局面，推动我国中空纤维膜技术和产业创新发展的需求日趋紧迫。

三、国内外中空纤维膜技术与产业发展分析

在产能和市场规模方面，我国已经成为中空纤维膜的生产和应用大国。2018 年全球中空纤维膜市场规模达 1100 亿元，并以 11% 的年复合增长率持续高速发展 [1]，2025 年将达到 2451 亿元。从市场区域分布来看，全球中空纤维膜市场集中在亚洲、北美、欧洲等地区。国外主要中空纤维膜生产厂商有苏伊士环境集团、科氏工业集团、杜邦公司、旭化成集团、三菱丽阳株式会社、东洋纺株式会社、西门子股份公司等。这些知名企业以其品牌和技术优势，占据了全球高端膜分离市场 95% 以上的份额。我国中空纤维膜市场规模稳步增长，2015 年约为 110 亿元，2020 年达到 300 亿元（占全球市场的 20.7%、亚洲市场的 50.1%） [1]，预计 2025 年达到 600 亿元。2020 年，我国从事中空纤维膜研发、设计、生产的企业有近 200 家，总产能超过 $1 \times 10^8 \text{ m}^2/\text{a}$ ，但年产值亿元以上的企业仅有十余家，产值及技术实力与国外企业相比仍有显著差距。下面从中空纤维膜材料、膜应用等细分方向对中空纤维膜的发展现状和后续研发重点进行进一步分析。

（一）中空纤维膜材料发展剖析

1. 中空纤维超 / 微滤膜

中空纤维超 / 微滤膜是我国产量最大、发展最为成熟、市场竞争力最强的膜品种。2018 年全球中空纤维超 / 微滤膜市场规模约为 935 亿元，2020 年到 1232 亿元；2018 年我国中空纤维超 / 微滤膜市场规模约为 196 亿元，2020 年达到 267.9 亿元 [1]。国际中空纤维超 / 微滤膜行业生产技术已基本成熟，形成了需求稳定、产业充分竞争的市场格局；美国、日本、欧洲等发达国家和地区在高性能中空纤维超 / 微滤膜产品和技术创新能力上处于领先地位 [2]。国内中空纤维超 / 微滤膜优势企业有北京碧水源科技股份有限公司、天津膜天膜科技股份有限公司、海南立昇净水科技实业有限公司、盐城海普润科技股份有限公司、北京赛诺膜技术有限公司、山东招金膜天股份有限公司等；通过原始创新与技术集成，推出了各具特色的新技术、新工艺、新产品，大量应用于国内外大型水处理工程。未来，我国应继续强化在中空纤维超 / 微滤膜领域的产业和技术优势，重点加强中空纤维超 / 微滤膜绿色制备技术与特种分离膜新材料研究、高性能中空纤维超 / 微滤膜组件及其集成技术研究，推动中空纤维超 / 微滤膜产业的数字化转型。

2. 中空纤维纳滤膜

由于中空纤维纳滤膜制备技术的复杂性，高性能中空纤维纳滤膜还未能实现工业化生产。国外长期从事中空纤维纳滤膜开发的膜企业有美国科氏工业集团、德国赢创工业集团、新加坡蓝海机械有限公司等。我国中空纤维纳滤膜的研发主体以高等院校、科研院所为主，如天津工业大学与天津膜天膜科技股份有限公司等合作开展了中空纤维纳滤膜产业化探索，建成了年产能为 $4 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的实验生产线，实现了界面聚合法中空纤维纳滤膜的连续稳定制备。未来，我国应继续加快中空纤维纳滤膜的产业化进程，重点开展中空纤维纳滤膜高精度一体化连续制备技术与装备的开发研究，力争在世界率先实现中空纤维纳滤膜的规模化生产。

3. 中空纤维反渗透膜

我国中空纤维反渗透膜无论是在研究深度还是应用广度方面都落后于国外同类产品。反渗透膜分离技术已成为海水和苦咸水淡化、纯水和超纯水制

备的主流技术，在全球海水与苦咸水淡化市场的比重超过 70% [3]。2019 年，全球反渗透膜产值已超过 60 亿美元。我国是全球最大的反渗透膜消费国，占全球总消费量的 26% [4]。日本东洋纺公司是当前国际上唯一的中空纤维反渗透膜（醋酸纤维素膜）供应商；天津膜天膜科技股份有限公司开发了年产能为 $4 \times 10^5 \text{ m}^2$ 的中空纤维反渗透膜实验生产线，但产品分离性能仍待提升。未来，我国应继续加强中空纤维反渗透膜专用聚合物材料合成与结构控制等基础研究，开展高性能中空纤维反渗透膜连续化制备关键技术、高效率组件填充工艺理论等研究。

4. 中空纤维疏水膜

疏水膜技术已经成为资源、环境、新能源及传统产业物料分离纯化的重要手段，在生物医药领域展现出强劲的发展势头，相应应用市场规模达 100 亿美元 [5]。国外在中空纤维疏水膜产业方面具有明显的技术优势，疏水膜生产企业主要有日本住友电气工业株式会社、三菱丽阳株式会社，美国明尼苏达矿业及机器制造公司（3M）、默克密理博公司、戈尔公司等。国外膜科技与产业界逐步形成了以疏水膜微结构调控与超疏水膜制备、新型膜接触器设计与过程强化方法、面向新应用领域的疏水膜过程工艺开发等为主的研发布局 [6]。我国中空纤维疏水膜产业起步虽晚，但已初具规模，逐步建立了从疏水膜研发、产业化到工程应用的技术与产业链，并在超疏水膜技术方向初步形成领先优势。未来，我国应继续加强高性能中空纤维疏水膜材料制备关键技术、中空纤维疏水膜组件、膜过程与强化方法、装备—集成系统和应用关键技术等研究，特别是开展中空纤维疏水膜在人工肺等生物医药领域的专项研发。

5. 无机中空纤维膜

国外无机中空纤维微滤、超滤、纳滤膜已经实现规模化生产。2016 年全球中空纤维陶瓷膜市场规模为 9900 万美元，预计 2025 年达到 2 亿美元 [7,8]。国外已产业化的无机中空纤维膜主要是 Al_2O_3 陶瓷和不锈钢中空纤维膜，生产和研发企业集中在美国、日本、欧洲。目前，我国无机膜以管式膜为主，无机中空纤维膜的核心制备技术及生产设备仍未能自主掌握。国内无机中空纤维膜还未见商业化产品，高性能无机中空纤维膜产业缺口巨大。未来，我国

应重点加强无机中空纤维膜制备技术与装备、高性能无机中空纤维膜新产品及高端应用研究以及无机中空纤维膜工程应用技术、装备系统开发等。

（二）中空纤维膜应用发展剖析

1. 水处理应用

我国具有世界最大的中空纤维膜水处理应用市场。世界水处理市场规模已超过 1 万亿美元 [9]，我国“十三五”时期的污水处理市场规模达到 1.39 万亿元。膜法水处理市场份额快速增长，以中空纤维膜为代表的膜分离技术在世界膜法水处理市场占据绝对主导地位且呈快速增长态势。随着膜材料成本的持续下降、工艺稳定性的不断提高，加拿大、新加坡、英国、澳大利亚、以色列等国家先后建成了不同规模的超滤水厂；以内衬超滤膜为核心的膜生物反应器（MBR）技术凭借出水水质好、占地面积小、运行控制方便等优势，已在市政污水和工业废水深度处理与回用方向得到广泛应用。未来，为适应环境和资源高质量发展要求，我国应加强基于界面过程的膜污染理论与控制策略研究，开发面向污水资源化与能源化的水处理新技术以及面向健康饮水的关键技术，研制高效模块化的膜装备，构建“智慧水务”系统。

2. 石油化工应用

国际上，中空纤维膜在石油化工领域已经得到广泛应用，在石油炼化、油田采出水和石化废水处理、石化制品及衍生品生产、渗透汽化分离、高纯气体制备等方向拥有广阔的市场。在我国石化行业，中空纤维膜应用集中在油田采出水和石化废水处理、有机溶剂纯化回收处理、气体分离中挥发性有机物（VOCs）回收处理等方向。国内涉及石化领域应用的中空纤维气体分离膜企业主要有大连天邦膜技术国家工程研究中心有限责任公司、大连欧科膜技术工程有限公司等，但年产值规模较小。未来，我国应加强在石化废水深度处理、气体分离方向的中空纤维特种膜材料、膜工艺及过程强化研究，开展分离膜组件、装备和产品开发，实现石化废水资源化利用、气体分离、有机气液物质的分离纯化等。

3. 生物医药应用

中空纤维膜在人工肾（血液透析）、人工肺（氧合膜）、血液成分分离、中西药药剂分离纯化等生物医药领域得到广泛应用 [10]。2019 年全球血

液透析市场规模达到 800 亿美元, 预计 2025 年达到 1015 亿美元。2018 年中国血液透析市场规模为 335 亿元, 预计到 2025 年达 1125 亿元 [11]。国际知名的中空纤维血液透析膜供应商有德国费森尤斯集团、美国百特国际有限公司、美国达维塔保健合作公司、日本旭化成株式会社、德国 MEMBRANA 公司等。我国从事中空纤维血液透析膜生产的企业有山东威高集团、广州贝恩医疗设备有限公司、广东宝莱特医用科技股份有限公司等; 国产产品约占我国血液透析膜市场份额的 40%, 但核心技术及原材料仍源于国外。新型冠状病毒肺炎疫情期期间广为人知的心肺系统重症治疗设备——体外膜肺氧合 (ECMO, 即人工肺), 全球仅有德国迈维柯公司、美国美敦力公司、英国索林公司等 10 余家厂商具有研发生产能力, 而我国在相关领域仍存在技术空白, 亟待突破。未来, 我国应加强血液相容性中空纤维血液透析膜制膜原料及膜表面处理技术研究, 支持中空纤维氧合膜技术和产业的科技创新、药物分离纯化和精密分离用中空纤维膜技术创新。

4. 食品饮料应用

在数十年间, 中空纤维膜在食品饮料领域的应用迅速发展, 涉及果汁饮料、乳品、豆制品、酒类等产品品质与生产效率提升以及食品饮料行业废水减排与资源回收等 [12,13]。我国中空纤维膜技术在食品饮料领域的应用与国外基本同步, 蒙牛乳业(集团)股份有限公司、伊利股份有限公司、光明乳业股份有限公司、北京汇源食品饮料有限公司等规模较大的饮品企业皆已使用膜技术提升产品品质。我国自主研发的中空纤维超/微滤膜与国外同类产品相比, 膜孔径分布较宽, 分离精度较差, 抗污染性能不强; 附加值较高的食品饮料等高端中空纤维超/微滤膜市场多被国外品牌占据。未来, 我国应加强食品级专用中空纤维膜材料及绿色制备技术、高精度抗污染中空纤维膜产品、膜耦合集成与分级分离技术的研究。

(三) 中空纤维膜技术整体科研态势分析

从研究论文和专利来看, 我国已是世界中空纤维膜的研究大国。2008—2019 年全球发表的中空纤维膜技术相关 SCI 论文共计 4314 篇 [14], 其中我国发文数量为 1476 篇, 占世界总量的 34.22%, 明显领先其他国家。但从总被引频次来看, 新加

坡国立大学排名第一, 新加坡南洋理工大学排名第二; 中国入榜单位有浙江大学、天津工业大学、中国科学院, 分别位列第五、第六、第七, 这说明我国中空纤维膜技术创新质量仍待提高。世界涉及中空纤维膜技术的专利申请共计 6525 项, 排名前二十的机构共申请 3093 项, 占全部专利项数的 47.4%。在中空纤维膜国际专利申请量机构排名中, 日本企业占据前五位, 且前二十名中共有 8 家日本企业; 我国仅有中国石油化工股份有限公司(第六)、天津工业大学(第七)进入排名。中空纤维膜领域的中国专利申请共 3150 项, 占全球专利申请总量的 48.28%, 但专利权人以国外企业为主, 国内机构的专利占比仍处于劣势 [14,15]。

四、我国中空纤维膜技术和产业存在的问题

经过 50 多年的发展, 我国分离膜技术和产业发展都取得了长足的进步, 建立了适合国情的膜材料设计与制备的理论框架, 形成了一系列具有自主知识产权、性能良好的膜产品, 开发了系列膜集成技术和装备。但与美国、日本、欧洲等膜产业强国和地区相比, 我国中空纤维膜技术和产业当前还存在明显不足 [15,16], 主要表现在以下 4 个方面。

(一) 制膜原材料国产化率低, 分离膜品质仍待提升

制备微/超滤膜、反渗透、气体分离膜等的主要传统膜原料, 如聚偏氟乙烯 (PVDF)、聚醚砜 (PES)、聚砜 (PSF)、三醋酸纤维素 (CTA)、聚甲基戊烯 (PMP) 等国产化率低, 国产原料在分子量、分布指数控制等方面与国外同类产品还有较大差距, 部分材料被国外禁运。剖析原因, 我国膜科技产业与上游原材料产业的协同创新不充分, 专用聚合物材料的开发、科技攻关投入不足。因此, 我国亟需针对膜材料需求, 构建聚合物材料开发、聚合反应控制、分离膜成形等多学科协同创新机制, 在重点分离膜原材料领域实施技术突破, 打破国外技术与产品垄断。

(二) 分离膜品类较单一, 关键膜技术产品存在空白

国产膜品种较少, 仅集中在中空纤维膜超/微

滤膜等单一方向，产品多应用于附加值较低的中低端领域；与国外同类产品相比，存在品质稳定性低，膜分离精度、抗污染性能有待提升等问题。我国血液氧合、特种分离等膜技术与产品市场仍被国外企业垄断，是当前亟需突破的“卡脖子”环节。剖析原因，我国在医用疏水膜、新膜技术开发等方向的投入力度不足，“产学研用”协同缺失，创新成果转化滞后。因此，我国应针对重点应用和国家战略需求，灵活组建“产学研用”技术和产业协同创新团队，集中力量开展科技攻关，尽快实现科技与产业突破。

（三）自主创新意愿不强、创新活力与能力不足、技术与产品迭代滞后

国内企业跟踪开发的产品较多，自主创新的产品较少，获得专利数量偏少；知识产权保护力度不够，企业自主创新意愿不强，导致国产膜材料的市场竞争力较低，高端市场占有率极低；“产学研用”合作机制不健全，研发与产业需求脱节严重，成果转移和转化存在障碍。剖析原因，国家对企业投入科技研发、协同创新的引导与支持政策仍显不足，对科技成果转化的推动与保护政策有待完善。

（四）市场规范管理与标准化建设有待完善

我国在中空纤维膜产业整体发展规划、产业技术标准建设方面存在明显的短板。中空纤维膜产业技术标准制定相对滞后，产业标准执行不到位，知识产权保护和维护机制不健全。这些问题导致市场上国产产品同质化现象严重，且多集中于低科技含量产品方向；产品质量参差不齐，企业创新投入动力不足，严重影响了中空纤维膜技术与产业的高质量发展进程。

五、中空纤维膜技术和产业的发展目标与主要任务

当前，中空纤维膜领域的重点工作有：解决一系列“卡脖子”问题并开发前瞻性技术，支持原创研究与产品研发，推进具有应用潜力的新膜技术产业化，利用膜技术促进传统产业升级并拓展膜技术在新兴产业的应用，推动供给侧结构性改革和高端制造战略实施。

到 2025 年，重点解决中空纤维膜领域的一系列“卡脖子”问题，在制膜原材料、高端分离膜制造与应用等方面初步形成国际竞争力；中空纤维超/微滤膜行业达到国际领先水平，在部分新膜及生物医用专用膜方向实现产业化突破；显著提高传统膜原材料的自给率，开发新型自具微孔聚合物（PIM）材料、有机框架（MOF/COF）材料、聚甲基戊烯（PMP）、分子筛膜材料，聚芳硫醚等特种分离膜原材料及相应的制膜技术与装备。

到 2030 年，重点开发一系列前瞻性中空纤维新膜技术，实现膜技术在新兴产业领域的广泛应用；中空纤维纳滤膜、中空纤维无机膜达到国际先进水平，气体分离、生物医药和食品饮料等领域专用中空纤维膜技术达到国际领先水平；实现中空纤维膜产业的数字化转型，建立完善的废膜回收与再利用技术体系。

为此，我们建议在以下 4 个方向重点开展研究工作，支持相关膜技术的开发与产业化应用。

（一）开展高性能中空纤维超/微滤膜的绿色制造与产业数字化转型

逐步改变制膜原材料长期依赖进口的不利局面，开发制膜原材料的绿色规模化稳定合成工艺；发展中空纤维超/微滤膜的智能化生产工艺，实现制造过程的自动化、智能化、标准化，支持膜结构的精准调控。推动产业数字化转型，开发万吨级模块化处理系统、节能型中空纤维膜过滤系统，建立基于全过程信息感知、智能决策、自动控制、精准管理的分离膜产品运营与智能控制平台，逐步实现“智慧水务”。

（二）开发高品质中空纤维疏水膜并进行产业化

开发新型超疏水聚合物原材料，加强中空纤维疏水膜表界面与孔结构精确调控方法研究，实现孔径均一、疏水稳定性佳、传质效率高的中空纤维疏水膜产业化，全面提升国产疏水膜品质，打破 ECMO 膜等高端中空纤维疏水膜产品的国外垄断。开展超疏水、双疏型中空纤维膜构建方法研究，实现超疏水、双疏型中空纤维膜连续可控制备。增强面向工程应用的中空纤维疏水膜组件、装备、过程强化方法、集成技术体系开发，促进中空纤维疏水膜在资源提取、新能源、生物医药

科技等领域的创新应用。

(三) 研发中空纤维新膜技术并进行工程示范

准确把握分离膜国际前沿研究方向, 加快推进中空纤维纳滤、反渗透膜、无机中空纤维膜等产业化技术开发, 加强正渗透、智能响应、催化分离、亲和与动态传输、储能及色谱膜技术等创新研究。探索构建绿色高效的新膜过程、过程强化及多过程耦合增效方法, 实现关键新膜产品的规模化制备与工程示范。

(四) 研究废旧膜产品回收与再利用技术

研究膜材料失效机理, 建立膜材料成分、理化性能、微结构演化模型与评估方法, 开发膜材料延寿与再制造新工艺, 最大化利用废旧膜材料。研究再制造膜材料与应用过程匹配技术, 形成废旧复合膜材料高效回收与高值再利用成套技术。研究膜材料标识与识别技术, 开发膜材分拣技术, 建立专业技术服务平台, 实现废旧膜产品的资源化再利用, 解决每年数千万平方米膜组件退役产生的大量固体废物与资源浪费问题。

六、对策建议

(一) 创新人才管理模式, 激发产业科技创新动力

中空纤维膜技术涉及纺织、材料、化工、环境、机械、控制等多个学科领域, 然而具有多学科交叉知识背景的专业人员极为短缺。建议探索更加灵活开放的人才培养机制, 促进以多学科为基础的分离膜专业高端人才培养; 建立以行业龙头企业、膜相关的国家重点实验室和国家工程中心为主体的高性能膜材料创新中心, 促进科技队伍的多学科交流合作与创新, 加强膜领域贯通式人才队伍培养。整合制膜原材料(上游)、制膜装备和膜制备技术(中游)、膜应用(下游)技术和产业的全链条资源, 垂直建立产业联盟, 激发产业科技创新动力, 不断提升我国膜产业技术水平。

(二) 加大资源投入, 促进膜材料创新研究

综合性运用财政投资政策、税收优惠政策、融资优惠政策、人才政策; 充分运用市场机制, 鼓励和引导社会资金进入膜产业市场; 探索产业投资基

金、风险投资基金等投资形式, 通过国家投入带动社会投资, 引导各类金融机构资金支持膜产业快速发展。加大国家基础领域研究项目对制膜原材料基础与应用研究的支持力度, 鼓励社会资本介入创新链并向创新链前端延伸, 借助社会资本的市场敏感性和企业家精神, 提升技术开发的有效性、时效性和转化效率。

(三) 强化行业规范, 增强知识产权保护和标准化工作

建议实行严格的知识产权保护制度, 健全知识产权维权援助体系; 研究制定降低中小企业知识产权保护及维权成本的政策措施; 强化知识产权运用, 鼓励和支持运用知识产权参与市场竞争, 引导有序竞争。加强能效标准、水效标准建设以及不同应用领域膜技术的标准规范建设, 推进废旧膜丝回收和再利用的规范工作; 加大与主要贸易国的标准互认力度, 以国外膜工程示范应用为基础, 共同开展国际标准研究和国际标准制定。

(四) 加强国际合作, 开拓国际市场

结合“一带一路”倡议的顶层布局, 以膜技术为纽带, 加强科技人文交流, 建立国家间联合实验室, 搭建中空纤维膜产业国际化发展合作与服务平台; 加强品牌国际化建设, 为中空纤维膜企业“走出去”提供技术、信息、政策需求支撑; 推动水处理等技术的跨国应用与转移, 服务“一带一路”沿线国家的环境保护需求。

致谢

衷心感谢项目组全体同志的辛勤劳动和贡献及相关单位给予的大力支持!

参考文献

- [1] 德中环保咨询. 中空纤维膜行业发展报告 [R]. 北京: 德中环保咨询, 2019.
GEP Research. Development report of hollow fiber membrane industry [R]. Beijing: GEP Research, 2019.
- [2] 国家新材料产业发展战略咨询委员会. 中国新材料技术发展蓝皮书(2018) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
National Advisory Committee on New Materials Industry Development Strategy. 2018 annual report on China new materials technology development [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.

- [3] Saadat A H M, Islam M S, Parvin F, et al. Desalination technologies for developing countries: A review [J]. *Journal of Scientific Research*, 2018, 10 (1): 77–97.
- [4] Ismail A F, Khulbe K C, Matsuura T. Recent progress in reverse osmosis (RO) science and technology [J]. *Journal of Applied Membrane Science & Technology*, 2017, 21: 1–10.
- [5] Xu Y, Goh K, Wang R, et al. A review on polymer-based membranes for gas-liquid membrane contacting processes: Current challenges and future direction [J]. *Separation and Purification Technology*, 2019: 115791.
- [6] Zhao S, Feron P H M, Deng L, et al. Status and progress of membrane contactors in post-combustion carbon capture: A state-of-the-art review of new developments [J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, 511: 180–206.
- [7] Athayde D D, Souza D F, Silva A M A, et al. Review of perovskite ceramic synthesis and membrane preparation methods [J]. *Ceramics International*, 2016, 42(6): 6555–6571.
- [8] Transparency Market Research. Hollow fiber ceramic membrane market (ultrafiltration, microfiltration, nanofiltration)—Global industry analysis, size, share, growth, trends, and forecast 2016—2025 [R]. Albany NY: Transparency Market Research, 2018.
- [9] Markets and Markets Research. Membrane bioreactor market by membrane type (hollow fiber, flat sheet, multi-tubular), system configuration (submerged, external), application (municipal wastewater treatment and industrial wastewater treatment), Region—Global Forecast to 2024 [R]. Illinois: Markets and Markets Research Private Ltd., 2019.
- [10] 赵长生, 赵伟锋, 张翔, 等. 新型血液净化材料及佩戴式人工肾的研究构想和预期成果展望 [J]. *工程科学与技术*, 2018, 50(1): 1–8.
- Zhao C S, Zhao W F, Zhang X, et al. Research framework and anticipated results of novel blood purification materials and wearable artificial kidney [J]. *Advanced Engineering Science*, 2018, 50(1): 1–8.
- [11] 前瞻产业研究院. 2021—2026年中国血液透析行业发展前景预测与投资战略规划分析报告 [R]. 深圳: 前瞻产业研究院, 2020.
- Qianzhan Industry Research Institute. China hemodialysis industry development prospect forecast and investment strategic planning analysis report from 2021 to 2026 [R]. Shenzhen: Qianzhan Industry Research Institute, 2020.
- [12] Castro-Muñoz R, Conidi C, Cassano A. Membrane-based technologies for meeting the recovery of biologically active compounds from foods and their by-products [J]. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2019, 59(18): 2927–2948.
- [13] Castro-Muñoz R, Boczkaj G, Gontarek E, et al. Membrane technologies assisting plant-based and agro-food by-products processing: A comprehensive review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 95: 219–232.
- [14] 徐慧芳. 中空纤维膜技术研发态势分析报告 [R]. 北京: 中国科学院文献情报中心, 2019.
- Xu H F. Research and development situation analysis report of hollow fiber membrane technology [R]. Beijing: National Science Library, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [15] 郑祥, 魏源送, 王志伟. 中国水处理行业可持续发展战略研究报告 (膜工业卷III) [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2019.
- Zheng X, Wei Y S, Wang Z W. Report for sustainable development strategy of China water treatment industry: Membrane industry III [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2019.
- [16] 中国膜工业协会. 中国膜产业“十三五”发展规划纲要 [R]. 北京: 中国膜工业协会, 2015.
- Membrane Industry Association of China. Outline of the 13th Five-Year Plan for the development of China's membrane industry [R]. Beijing: Membrane Industry Association of China, 2015.