

# 教育部工程研究中心年度报告

(2023年1月——2023年12月)

工程中心名称：膜与水处理技术

所属技术领域：化工、冶金与材料

工程中心主任：朱利平

工程中心联系人/联系电话：郭毅/18257164669

依托单位名称：浙江大学

2025 年 3 月 17 日填报

## 一、技术攻关与创新情况

膜中心总体定位为面向饮用水安全、环境保护、节能减排、海洋资源利用、医疗健康、能源、工业分离等国计民生行业重大需求，围绕“膜与水处理”共性科学、技术、工程问题，以解决行业实际问题为导向，开展了反渗透、纳滤、超滤、微滤、渗透汽化、空气过滤、太阳能光热蒸发等膜过程中涉及的制膜原料、膜材料、膜装备、膜法水处理技术及膜过程应用等全链条的研发工作。膜中心成立以来主要围绕三大方向展开研发工作：净水及环境膜材料与应用技术；医用及制药膜材料及应用技术；脱盐及工业分离膜材料及应用技术三大方向。2023年度在此基础上面向国家环保、健康、工业技术升级、“双碳”愿景、生态文明建设和国防能力提升等战略目标和新增需求，根据膜科学技术和水处理学科的关键共性科学、技术和工程内涵，围绕反渗透膜材料及水处理应用、纳滤膜材料及水处理应用、超微滤膜材料与水处理应用、专用功能膜材料与应用四个方向，开展一系列科学、技术和工程化的研究。通过多学科交叉、产学研融合，利用依托单位内外基地条件以及与企业的深度合作，取得了如下代表性成果。

### 1. 高性能反渗透/纳滤脱盐膜研究

针对水处理反渗透/纳滤膜材料渗透性/选择性相互制约、膜污染等关键问题，张林教授团队从典型的反渗透应用场景中（包括锅炉给水、中水回用、地表水处理和海水淡化），剖析了膜材料与膜组件的膜污染成因与机制，提出反渗透膜的普适性与不同应用场景针对性的延寿策略，为不同应用场景中反渗透膜污染的控制提供了参考。通过机器学习方法提取聚酰胺纳滤膜水盐选择性关键特征，建立了膜结构-性能关系的基本框架；通过协同调节支撑层孔径和表面化学成分的策略实现了膜分离层聚酰胺内渗的抑制，实现纳滤膜渗透性能和盐选择性的大幅度提升；徐志康教授团队发展了一种集成策略，将甘油调节的自由界面聚合与转移印花复合技术耦合，实现了厚度小于5 nm聚酰胺薄膜的宏量制备和完整转移。厚度为5 nm的聚酰胺纳米薄膜可通过转移印花技术完整地复合到多种多孔基底表面制得薄层复合膜；开发一种高水通量的纤维素纳滤膜，建立了一条制备纤维素纳滤膜的绿色路线 (Desalination, 2023, 561, 116702; Environ. Sci. Technol., 2023, 57, 10860–10869, Ind. Eng. Chem. Res., 2023, 62, 14588–14600; Desalination, 2023, 548, 116293; Desalination, 2023, 564, 116748; J. Membr. Sci., 2023, 683, 121858) 等)。

### 2. 特种分离膜微结构调控及其性能研究

新型分离膜的制备是高性能膜材料研究的热点之一。徐志康、万灵书教授团队研究采用静电纺丝等方法制备得到一系列性能优异的分离膜，为空气过滤提供了新思路。采用静电纺丝和自由界面聚合等技术，实现了一系列性能优异的分离膜的可控调节和制备，为不同需求的分离膜材料提供了新思路 (ACS Appl. Polym. Mater., 2023, 5: 5544; J. Membr.

Sci., 2023, 685: 121956; Sep. Purif. Technol., 2023, 324: 124543; J. Membr. Sci., 2023, 683, 121858; Desalination 2023, 566, 116946等, 专利 ZL202310285215.1; ZL202310285238.2)。朱利平教授团队针对化工、制药等行业对高效低能耗分离技术的重大需求, 发展了表面热重构、表面涂覆、分子层沉积等制膜方法, 靶向调控了分离层的多尺度结构, 制备出分离层超薄且与支撑层一体稳定复合的高性能耐溶剂纳滤膜, 溶剂渗透性能和抗溶胀稳定性能的显著提升, 为实现工业物料绿色分离提供了重要技术支撑 (Mater. Horiz., 2023, 10, 5133-5142, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2023, 15, 8730-8741; J. Mater. Chem. A, 2023, 11, 19374-19383)。

### 3. 特殊功能膜材料/器件的研究

王正宝教授团队研发了制备混合基质膜用沸石分子筛纳米材料的新方法, 进行了蒸汽相转化法制备多级孔LTA沸石分子筛膜和一种简易的湿凝胶层二次生长法制备高通量NaA沸石膜。所开发的多孔载体上的种子组装技术突出了在多孔载体上容易制备定向种子层的巨大潜力 (Chem Asian J. 2023, 18, e202300218, Chinese Journal of Chemical Engineering 55 (2023) 101 - 110)。杨皓程研究员等基于太阳能环保、清洁、可再生无污染等优点, 太阳能光热海水

## 二、成果转化与行业贡献

### 1. 总体情况

2023年度中心在重大项目承担、纳滤膜材料、电厂膜法水处理技术、抗菌空气净化膜及产品、PTFE膜的亲水化等方面取得显著的成果, 形成了良好的经济和社会效益。各项成果, 都是与企业合作、以中心教授技术为主体、合作企业为载体实施的, 充分体现了“产学研用”相结合, 充分发挥中心优势的特点。

张林教授团队参与污水减污降碳协同处理及再生利用关键技术、装备研发及示范-市政污水低碳深度处理与再生利用关键技术、装备研发及工程示范研究, 协助相关城市建立市政污水处理与再生利用方案。同时该团队在本年度将专利《一种超薄高网络结构纳滤复合膜的制备方法》(201110385955.X)与专利《一种交联改性聚酰胺复合膜及其制备方法》(201510845889.8)作价20万元, 转让至浙江奥氏环境科技有限公司, 为该公司在相关高性能聚酰胺复合纳滤膜的生产与应用提供技术支持。

徐志康教授团队受万华化学股份有限公司委托进行界面聚合合成聚酰胺膜的分子模拟研究及模拟程序开发项目。以计算化学为基础, 解决企业研发过程中的难题, 加深企业研究人员对界面聚合过程的理解, 指导反渗透膜的工业生产。

朱利平教授团队与多家知名企业合作, 面向国家重大需求和经济主战场, 历经15年产学研联合攻关, 开发出性能优异的膜产品。产品被广泛应用于水处理、空气过滤及资源回收等领域, 实现从“依赖进口”到“国产主导”的重大跨越, 取得了显著的经济和社会效益。

该团队采用以全氟己基磺酰胺基丙基三乙氧基硅烷（PFSS）作为桥联分子，通过两步液相沉积方法，成功在PTFE等多孔膜表面和内部孔道原位复合TiO<sub>2</sub>、SiO<sub>2</sub>及Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>超薄无机纳米涂层，赋予膜材料高亲水性。桥联中间层与基材的适配性赋予这些无机涂层优异的机械稳定性，可在高温、酸碱等条件下长期使用，为极端工况下的膜法水处理应用提供了合适的高分子膜材料，在浙江东大环境工程有限公司实现PTFE中空纤维膜的亲水化改性技术应用。

## 2. 工程化案例

（1）参与浙江省“领雁”项目“污废水减污降碳协同处理及再生利用关键技术、装备研发及示范-市政污水低碳深度处理与再生利用关键技术、装备研发及工程示范”

张林教授团队参与了由浙江生态文明研究院牵头，与浙江大学、杭州上拓环境科技股份有限公司、金山环保集团有限公司共同申报的浙江省“领雁”项目“污废水减污降碳协同处理及再生利用关键技术、装备研发及示范-市政污水低碳深度处理与再生利用关键技术、装备研发及工程示范”，总经费1000万元。该项目针对市政污水处理达标难、资源化利用不充分等问题，以多膜分离-串联三维电化学技术模式为主线，研发基于多膜级配耦合智能控制的节能低碳深度处理装备，并针对难降解膜浓缩液，开发吸附-强化电催化耦合的三维电化学浓水处理装备，在此基础上进行低碳高效的市政污水深度处理与再生利用工程示范。

（2）搭建高产率中空纤维膜光生物反应器系统2023

黄小军教授团队与合作企业唐山马贝生物科技发展有限公司签订了《中空纤维膜光生物反应器系统高效碳捕集及其微藻养殖技术》，共同构建中空纤维膜光生物反应器系统，开发高效、环保的微生产技术，利用中空纤维膜光生物反应器系统提高微藻产率，降低生产成本，最优养殖环境下，实现每立方水体微藻负荷达到 400 g/m·d以上干粉。

（3）进行界面聚合合成聚酰胺膜的分子模拟研究及模拟程序开发

徐志康教授团队受万华化学股份有限公司委托进行界面聚合合成聚酰胺膜的分子模拟研究及模拟程序开发项目。该项目总经费80万元，旨在以界面聚合过程中的热力学和动力学为基础，以量子化学计算、分子动力学模拟、蒙特卡洛模拟、数值模拟的多尺度计算机研究为手段，对界面聚合过程中单体溶解、扩散、缩聚、相分离乃至聚酰胺膜的分子结构和孔道特征进行细致研究，加深企业研究人员对界面聚合过程的理解，指导反渗透膜的工业生产。目前该项目已顺利结题。

（4）牵头完成的“中空纤维纳米复合过滤膜规模化制备关键技术及工业化应用”获得2022年度浙江省科技进步一等奖

朱利平教授团队牵头完成的“中空纤维纳米复合过滤膜规模化制备关键技术及工业化应用”获得2022年度浙江省科技进步一等奖。项目负责人依托浙江大学，联合宁波方太集团、

北京碧水源膜科技有限公司、浙江开创环保科技股份有限公司、浙江东大环境工程有限公司、杭州高通膜技术有限公司等知名企业，面向国家重大需求和经济主战场，历经15年产学研联合攻关，建立了“表面复合、本体复合和中间层复合”为核心内涵的聚合物纳米复合膜结构调控理论与方法，攻克了高性能中空纤维过滤膜规模化制备关键技术，开发出长效抗污、高选择性、高强度及耐腐蚀等特征的系列中空纤维膜材料与产品，并实现规模化生产，综合性能达到国际先进水平。产品被广泛应用于水处理、空气过滤及资源回收等领域，实现从“依赖进口”到“国产主导”的重大跨越，取得了显著的经济和社会效益。

（5）承担重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目“长效纳滤与选择性分离材料研发”

朱利平教授团队与合作企业宁波方太厨具有限公司、宁波大学、中国科学院宁波材料技术与工程研究所、宁波工程学院共同申报了宁波市重点研发计划暨“揭榜挂帅”项目《长效纳滤与选择性分离材料研发》，总经费2500万元。本项目研发大通量、抗结垢的纳滤膜材料，突破膜结构精细控制技术和加工稳定性控制技术；开发高效脱除水中微污染物的选择性分离材料，实现批量稳定生产；研究纳滤膜材料和选择性分离材料的封装耦合技术，开发科技化集成过滤系统。最终形成新一代智能净水设备的大规模产业化，在国内外取得竞争优势。

### 3. 行业服务情况

（1）徐志康教授团队与万华化学合作，开展“界面聚合合成聚酰胺膜的分子模拟研究及模拟程序开发”研究项目，旨在通过分子模拟指导界面聚合过程，实现反渗透膜制备条件的优化，为企业解决相关技术难题。

（2）张林教授团队与浙江浙能技术研究院有限公司合作，为缓解浙能集团下属电厂电渗析水处理过程中阴离子交换膜的膜污染提供技术服务。

（3）张林教授团队与浙江奥氏环境科技有限公司合作研发高性能聚酰胺脱盐膜材料。

（4）张林教授团队与巴斯夫（中国）有限公司合作，针对其聚砜材料在高性能反渗透膜中的应用开展合作技术开发工作。

（5）朱利平教授团队研发的高强度长效抗污染 PVDF 膜制备技术在北京碧水源膜科技有限公司实现规模化生产与水处理工程应用；采用分子桥联策略突破了 PTFE 膜亲水化改性的长效稳定性关键瓶颈，在浙江东大环境工程有限公司实现批量生产与工程应用；研制出兼具过滤与吸附功能的聚醚砜中空纤维膜在宁波方太集团成功实现产业化和商业应用，所开发的膜材料被应用于高端净水产品。

## 三、学科发展与人才培养

### 1. 支撑学科发展情况

本年度中心的工作显著推动了依托学科承接国家重大研究任务和重大项目的能力。在开展科学研究的基础上，促进了膜科学技术与健康、能源等学科的交叉和融合，取得了系列研究成果，充分发挥科研项目经费对学科建设的支撑作用。中心的固定成员，积极承担相应学科的教学任务，主讲《分离功能高分子》、《高分子化学》、《聚合物结构表征原理》、《高分子膜材料》等课程。在内部各学科、各研究方向之间、与境外著名机构（埃及国家研究院、香港大学、丹麦理工，神户大学等）等开展交叉合作，同时注重大学科之间的交叉合作，通过开展科学研究、共同培养学生、共同发表研究论文、共同申报科学技术成果奖励，取得了丰硕的科研成果，促进膜材料与其他学科相结合和共同发展。在依托单位的指导和固定人员的共同努力下，实验室的科研工作遵循依托单位部署，紧密结合国际前沿和国家科技发展趋势，科研规模持续稳定发展，国际交流与影响力不断扩大。

## 2. 人才培养情况

本年度中心培养在读研究生63名，其中硕士研究生35名，博士研究生28名，毕业硕士生6名，博士生2名，共发表学术论文22篇。

## 3. 研究队伍建设情况

2023年度，膜中心青年人才梁洪卿老师入选国家级青年引才计划；方传杰博士获得国家自然科学基金面上项目资助。

# 四、开放与运行管理

## 1. 主管部门、依托单位支持情况

膜中心为依托浙江大学建设的跨院系、跨学科省部级科研基地（国内首批，该领域唯一），开展面向国家重大需求的膜材料、膜过程及水处理技术创新研究，拥有膜制备与测试仪器及其工程化设备 200 余台套（总价值 5000 余万元）。浙江大学高分子科学与工程学系、化学工程与生物工程学院、材料科学与工程学院、环境与资源学院等二级机构，为中心提供相对集中的科研场所5500M<sup>2</sup>（实验室、办公室、中试基地），新增2500 M<sup>2</sup>，学校为中心专项费用50万元，，提供研发骨干和技术支撑人员、博士后、工程博士、专业硕士等招收编制和名额，并搭建共享公用仪器平台。

## 2. 仪器设备开放共享情况

中心现有大型仪器设备总产总值5700 万，30 万以上大型仪器设备15台。对仪器设备实行专人负责制，进行科学管理，严格按操作规程进行，保证设备的高效、正常运行，为科研和教学提供便利条件。为每台仪器聘请了责任教授，参与仪器的管理、维护和功能开发

，提高了大型仪器的使用效率，更好地为科研服务。仪器面向全社会开放，使用开放机时数达5000小时/年，测试样数6000个/年，培训人数约150人次/年。其中约80%面向中心内部，约20%面向校内外。

### 3. 学风建设情况

本中心的师生按照国家各级部门政策、学校制度等加强师风、学风建设，通过学习、讲座、以老带新等方式进行强化学风，中心所有成员没有出现弄虚作假、剽窃等违规行为。

### 4. 技术委员会工作情况

本年度中心管理班子和技术委员会进行了换届，由朱利平教授出任膜中心主任、张林教授、万灵书教授担任副主任，聘用膜技术领域著名专家、中国工程院院士担任第四届技术委员会主任，江苏大学校长邢卫红教授、浙江大学徐志康教授担任技术委员会副主任，另聘请12位校外知名高校、行业协会和知名企业的科学和技术专家担任技术委员会委员。本年度通过多种形式召开年度会议或远程咨询，为中心的现状、问题及发展规划提出了合理和切实的建议。

本年度邀请清华大学王保国教授做题为“碱性膜电解水制氢关键材料与装备”的学术讲座；北京碧水源膜科技股份有限公司孙广东副总经理做了“基于超薄基材的反渗透、纳滤膜材料开发及产业化”的学术讲座；天津工业大学李建新教授做题为“面向难降解工业废水处理的电催化膜反应器构建”的学术讲座；青海盐湖工业股份有限公司副总裁马黎春做题为“世界深度变革:盐湖的科技和产业变革”的学术讲座。

## 五、下一年度工作计划

#### （1） 技术开发

耐溶剂纳滤膜是膜法物料分离的核心材料，在食品饮料纯化、药物浓缩与精制、溶剂和催化剂回收等过程中具有广阔的应用前景，是下一代膜技术研究的热点方向之一。另一方面，纳滤技术被证实在青海、西藏等地的盐湖提锂中具有显著的比较优势和发展潜力，但我国尚未掌握高性能镁锂分离用纳滤膜制备技术。针对现有纳滤膜所存在的孔径分布宽、分离精度低、服役稳定性不足等问题，拟着力解决这两类特种膜材料及其组器件制备中的关键技术瓶颈，实现高稳定、高选择性膜材料的批量制备与工程应用，提升我国在高端膜材料制备上的技术水平，推动我国膜产业的进一步发展。提升膜中心在膜科学与技术领域的国际影响力，获得高水平科技奖项1项。

#### （2）团队建设及制度优化

在团队建设方面，开展团队内外的多学科交叉和融合，加强对青年学者的培养，同时联合企业、行业，引进校外团队加入中心，促进中心材料及工程应用的发展。在制度方面

，根据国家新形势对科研的要求、国家及学校新政策，建立适合于新时代的中心管理与运行制度。计划引进和培养高层次青年人才2~3名、博士后4~5名，硕/博士研究生10人，搭建一支高水平科研团队，形成从基础研究-技术开发-工程应用的全链条研发队伍，为解决我国在高端膜材料与技术方面的“卡脖子”问题做出贡献。同时积极邀请国内外相关领域的著名学者和高级人才讲学、合作和工作，并前往国外相关著名研究机构进行访问、交流和合作研究，与国外高水平大学和知名学者开展研究生联合培养，为培养国际化高层次人才做出贡献。

六、问题与建议

项目研究需要进行膜材料与膜组件的批量制备技术研究和中试放大，在中试场地、设备购置、研发资金等方面的需求较大，期待在研发场地、资金、专业硕士/工程博士招收名额等方面得到大力支持。期待在青年人才引进方面得到依托单位和主管单位的大力支持。

七、审核意见

（工程中心负责人、依托单位、主管单位审核并签章）

工程中心负责人审核意见：	
填报内容属实	工程研究中心主任：
	年      月      日
依托单位审核意见：	
情况属实，同意上报。	依托单位：
	（单位公章）
	年      月      日



## 八、年度运行情况统计表

研究方向	研究方向1	反渗透膜材料及应用		学术带头人		张林
	研究方向2	纳滤膜材料及应用		学术带头人		徐志康
	研究方向3	超滤膜材料及应用		学术带头人		朱宝库
	研究方向4	专用功能膜材料及应用		学术带头人		王正宝
工程中心面积	5500.0 m <sup>2</sup>			当年新增面积		0.0 m <sup>2</sup>
固定人员	51 人			流动人员		21 人
获奖情况	国家级科技奖励	一等奖	0项	二等奖	0项	
	省、部级科技奖励	一等奖	1项	二等奖	1项	
当年项目到账总经费	475.0万元	纵向经费	415.0万元	横向经费	60.0万元	
当年知识产权与成果转化	专利等知识产权持有情况	有效专利	120项	其他知识产权	0项	
	参与标准与规范制定情况	国际/国家标准	0项	行业/地方标准	0项	
	以转让方式转化科技成果	合同项数	0项	其中专利转让	0项	
		合同金额	0.0万元	其中专利转让	0万元	
		当年到账金额	0.0万元	其中专利转让	0.0万元	
	以许可方式转化科技成果	合同项数	0项	其中专利许可	0项	
		合同金额	0.0万元	其中专利许可	0.0万元	
		当年到账金额	0.0万元	其中专利许可	0.0万元	

		以作价投资方式 转化科技成果		合同项数	1项	其中专利作价	1项
				作价金额	20.0万元	其中专利作价	20.0万元
		产学研合作情况		技术开发、咨询 、服务项目合同 数	10项	技术开发、咨询 、服务项目合同 金额	800.0万 元
当年服务情况		技术咨询		180次		培训服务	100人次
学科发 展与人才 培养	依托学科 (据实增删)	学科1	功能高分子材 料	学科2	膜分离	学科3	环境保护工 程
	研究生 培养	在读博士		28人	在读硕士		35人
		当年毕业博士		2人	当年毕业硕士		6人
	学科建设 (当年情况)	承担本 科课程	144学时	承担研究生 课程	64学时	大专院校 教材	0部
研究队 伍建设	科技人才	教授	13人	副教授	7人	讲师	0人
	访问学者	国内		0人	国外	0人	
	博士后	本年度进站博士后		3人	本年度出站博士后		2人