

# 我国膜分离技术的发展现状

张云飞, 田蒙奎\*, 许奎

(贵州大学化学与化工学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:**近些年来,我国膜分离技术得到了很大的发展,并且渗透到各个应用领域。从膜的相关标准、产值的增长情况、专利申请情况和有关分离膜的文献发表情况,对我国当前分离膜的发展进行了简要的综述,并结合产业政策对膜的发展方向 and 前景进行了分析。

**关键词:**膜分离;膜技术;膜产业;专利;文献

**中图分类号:**TQ028.8

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2017)04-0006-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2017.04.002

## Current development of membrane separation technology

ZHANG Yun-fei, TIAN Meng-kui\*, XU Kui

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** As a new type of separation technology, membrane separation has many advantages, such as high efficiency, energy saving, simplified process, easy to control, and so on. In recent years, China's membrane separation technology has been greatly developed and penetrated to various applications. In this paper, the development of separation membranes in China is briefly reviewed from the aspects of relevant patents, the growth of output value, the patent application and the relevant publications of separation membranes. The development directions and prospects were also presented based on the industrial policy.

**Key words:** membrane separation; membrane technology; membrane industry; patent; literature

膜分离技术是一门新兴的多学科交叉的高新技术,具有高效、节能、过程简单、易于自动化控制等特性<sup>[1]</sup>,其核心部分就是膜元件。国际理论与应用化学联合会(IUPAC)将膜定义为一种单位结构,三维中的一度(如厚度方向)尺寸要比其余两度小得多,并可通过多种推动力进行质量传递<sup>[2]</sup>。按照这个定义,膜可分为固相、液相和气相,其中固态膜最为常见。膜分离过程以选择性透过膜为分离介质。当膜两侧存在某种推动力(如压力差、浓度差、电位差等)时,原料侧组分选择性地透过膜,从而达到分离、提纯、浓缩等目的<sup>[3]</sup>。

分离膜的概念在18世纪就已经被提出,但是当时并没有应用在过滤方面<sup>[4]</sup>。我国膜技术研究始于20世纪50年代,中国化学研究所研发出我国第一张膜——聚乙烯醇离子交换膜,之后我国的膜产业得到了长足的发展。全国从事分离膜研究的院所、大学超过120家,其中大约30个研究团队活跃在国际学术前沿。膜制品生产企业400余家,工程公司近2000家,在几乎所有的分离膜领域都开展了工作。目前,国内已有江苏久吾高科技股份有限

公司、贵阳时代沃顿科技有限公司、海南立昇净水科技实业有限公司、山东招金膜天有限责任公司等多家从事膜产业研发生产的企业。其中,碧水源、南方汇通、津膜科技和东岳集团等为上市公司<sup>[1]</sup>。

当前,我国分离膜的研究紧密围绕膜的功能与膜及膜材料微结构的关系、膜及膜材料的微结构形成机理与控制方法、应用过程中的膜及膜材料微结构的演变规律三个关键科学问题展开<sup>[5]</sup>。着力开发新型分离膜膜材料和膜功能性质与制备过程关系的研究,为我国的节能减排与传统产业改造作出了突出贡献。本文从膜的相关标准、产值的增长情况、专利申请情况和有关分离膜的文献发表情况对我国当前分离膜的发展进行了简要的综述,并结合产业政策对膜的发展方向 and 前景进行了分析。

## 1 膜分离过程

随着科学技术的进步,膜的种类得到很大的发展,按材料性质,可以分为高分子膜、金属膜、无机膜<sup>[6]</sup>。常用的膜分离方法主要有微滤(micro-filtration, MF)、纳滤(nano-filtration, NF)、超滤

收稿日期:2016-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(21663009);贵州省科技创新人才团队(黔科合人才团队(2015)4004号);人社部归国留学人员项目(黔人项目资助合同(2013)06号)

作者简介:张云飞(1992-),男,在读硕士生,从事高等分离技术研究,18690748353,1139864530@qq.com;田蒙奎(1978-),男,博士,教授,从事光催化、膜分离、磷煤化工节能减排、清洁生产方面的研究,通讯联系人,0851-3635032,tianmk78@126.com。

(ultra-filtration, UF)、反渗透(reverse-osmosis, RO)<sup>[7]</sup>。

### 1.1 微滤过程

微滤分离技术是以微滤膜为核心部件,依据筛分原理以压力差作为推动力的膜分离过程。微孔滤膜孔径一般在0.01~10 μm之间,微滤分离技术对大小为0.1~1 μm颗粒有拦截的作用,主要应用于截留颗粒物、液体澄清<sup>[8]</sup>、除菌<sup>[9]</sup>以及工业中产生的PM<sub>2.5</sub>的捕集<sup>[10]</sup>。

### 1.2 超滤过程

超滤是在压力差作用下进行的筛孔分离过程,超滤膜孔径一般在2~100 nm,能截留分子直径为5~10 μm、分子量在 $5 \times 10^2 \sim 1 \times 10^6$ 间的分子,操作的压差为0.1~1.0 MPa,其主要应用于含大分子和胶状物质等溶液的提纯、分离,也用于气体的分离<sup>[11]</sup>。

### 1.3 纳滤过程

纳滤是介于反渗透和超滤之间的一种膜分离技术,与超滤分离过程一样,纳滤也是以压力差为驱动力的膜分离过程<sup>[12]</sup>。纳滤膜的孔径大约为1 nm,分子截流量为300~500道尔顿,纳滤过程主要用于无机盐和有机小分子的过滤。它具有对单价离子截流量小、高价离子有较大截流量的特性,而且相比于反渗透技术,它的流量较大<sup>[13]</sup>。

### 1.4 反渗透技术

反渗透是以压力差为推动力的膜分离过程,渗

透与反渗透都是通过半透膜来完成。在溶液侧上方施加一定压力 $P$ 大于溶液的渗透压 $\pi$ 时( $P > \pi$ ),使得溶剂分子从溶质浓度高的溶液侧透过膜流向溶剂侧的数量大于溶剂分子向溶液侧透过的数量,该过程称为反渗透。反渗透技术是目前最重要的、被广泛认可的从盐水制备淡水的一项技术<sup>[14]</sup>。

## 2 国内外有关分离膜的标准

膜产品的相关性能指标繁多,主要有分离透过性能、物理性能和化学性能三大类。其中分离透过性能包括:产水量、水通量、纯水透过率、截留分子量(切割分子量)、截留率、脱盐率、回收率、最大孔径、平均孔径、孔径分布、孔隙率、气密性及完整性等;膜物理性能有:结构性能(外观、膜面积、膜厚、膜内外径)、机械性能(拉伸强度、爆破强度、弯曲强度、柔润指数<sup>[15]</sup>、断裂伸长率)、电性能(荷电性、Zeta电位)、亲水性(接触角)及耐热性(最高操作温度)等;膜化学性能有化学稳定性(化学相容性)、抗氧化性(短时余氯耐受限度、过氧化氢耐受限度)、耐酸碱性(运行及清洗pH范围)及耐污染性能等<sup>[16]</sup>。

### 2.1 国际和国外先进标准

截至目前,根据王学军<sup>[1]</sup>在膜分离领域相关标准现状与发展需求一文中的数据,分析了分离膜相关的国际和国外相关标准:ISO标准3项,均为与水水质测定相关的方法;欧洲标准4项,为基础标准1项

(上接第5页)

- [8] 魏嘉,吕阳,付柏淋.我国雾霾成因及防控策略研究[J].环境保护科学,2014,(5):51-56.
- [9] 王平利,戴春雷,张成江.城市大气中颗粒物的研究现状及健康效应[J].中国环境监测,2005,21(1):83-87.
- [10] 王琴,张大伟,刘保献,等.基于PMF模型的北京市PM<sub>2.5</sub>来源的时空分布特征[J].中国环境科学,2015,(10):2917-2924.
- [11] 张霖琳,王超,朱红霞,等.北京混合功能区夏冬季细颗粒物组分特征及来源比较[J].中国环境科学,2016,(1):36-41.
- [12] 杨妍妍,李金香,梁云平,等.应用受体模型(CMB)对北京市大气PM<sub>2.5</sub>来源的解析研究[J].环境科学学报,2015,(9):2693-2700.
- [13] 李伟芳,王志鹏,史建武,等.天津市环境空气中细粒子的污染特征与来源[J].环境科学研究,2010,(4):394-400.
- [14] 魏欣,毕晓辉,董海燕,等.天津市夏季灰霾与非灰霾天气下颗粒物污染特征与来源解析[J].环境科学研究,2012,25(11):1193-1200.
- [15] 严向宏.上海宝山区大气细颗粒物气溶胶PM<sub>2.5</sub>特征研究与源解析[D].上海:华东理工大学,2011.

- [16] 马剑丽.上海宝山区PM<sub>2.5</sub>特征研究与源解析研究[J].环境科学与管理,2014,(4):120-123.
- [17] 王晓浩,赵倩彪,崔虎雄.基于在线监测的上海郊区冬季PM<sub>2.5</sub>来源解析[J].南京大学学报(自然科学),2015,(3):517-523.
- [18] 王苏蓉,喻义勇,王勤耕,等.基于PMF模式的南京市大气细颗粒物源解析[J].中国环境科学,2015,(12):3535-3542.
- [19] 包贞,冯银厂,焦荔,等.杭州市大气PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>污染特征及来源解析[J].中国环境监测,2010,(2):44-48.
- [20] 肖致美,毕晓辉,冯银厂,等.宁波市环境空气中PM<sub>10</sub>和PM<sub>2.5</sub>来源解析[J].环境科学研究,2012,(5):549-555.
- [21] 俞杰,汪伟峰,周军,等.宁波市冬季PM<sub>2.5</sub>污染特征与来源解析[J].环境科学与技术,2015,(8):150-155.
- [22] 黄晓锋,云慧,宫照恒,等.深圳大气PM<sub>2.5</sub>来源解析与二次有机气溶胶估算[J].中国科学:地球科学,2014,(4):723-734.
- [23] 黄深,潘要武,刘国盛,等.茂名市大气PM<sub>2.5</sub>在线源解析[J].环境监控与预警,2015,(4):37-42.
- [24] 郑玫,张延君,闫才青,等.中国PM<sub>2.5</sub>来源解析方法综述[J].北京大学学报(自然科学版),2014,50(6):1141-1154. ■

(定义)、滤膜过滤法水质 1 项、血液透析 1 项、产品标准 1 项;德国标准化学会标准中,《膜式过滤器及元件》共 11 项,均为测试方法标准;美国国家标准 11 项,其中反渗透 10 项《反渗透饮用水处理系统》,另有 1 项 ANSI/AWWA B110—2009《膜系统》;日本工业规格(JIS)标准 5 项。

## 2.2 中国分离膜相关标准

由于我国分离膜行业发展较晚,出台的国家标准和行业标准较少,王薇曾统计分析了 2010 年前我国分离膜相关的现行标准,具体有基础标准、产品标准、方法标准和相关管理标准共 4 项国家标准<sup>[17]</sup>。到 2013 年 12 月,我国膜的标准得到了很大的发展,共有 60 项膜相关标准,其中国家标准 10 项,行业标准 50 项<sup>[18]</sup>。截至目前,根据中国标准网数据,我国与膜相关的标准共 68 项,其中国家标准 17 项,行业标准 51 项。从行业分布来看,海洋(HY)行业标准最多,有 34 项,占总行业标准的 66%,这是因为我国十分重视膜法海水淡化,截止到 2015 年,反渗透技术处理海水达  $5.7 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{d}$ <sup>[16]</sup>。化工(HG)行业标准 4 项,环境保护(HJ)行业标准 4 项,海洋(HY)行业标准 34 项,城市建设(CJ)行业标准 3 项,电力(DL)行业标准 1 项,船舶(CB)行业标准 2 项,商业(SB)行业标准 1 项,煤炭(NT)行业标准 1 项。

## 3 我国分离膜产业发展

我国膜技术研究始于 20 世纪 50 年代。经过 50 多年的发展,中国膜产业逐渐走向成熟。通过陈晓芬<sup>[19]</sup>等人和中国产业信息网总结近几年来中国膜产业产值的增长情况,如表 1 所示。由表可见,最近 10 年是中国膜产业的高度增长期,膜产业总产值从 2007 年的 175 亿元到 2015 年已达到 790 亿元。在“十二五”期间,产值以年均 20% 以上的速度增长,预计到“十三五”末期膜工业产值规模将再翻番。

表 1 中国分离膜行业总产值增长状况

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
产值/亿元	175	210	235	300	380	425	580	735	790

## 4 我国有关膜的专利申请情况调查

通过在 SooPAT 数据库以名称为限定条件,检索膜分离,分析了 2007 年至 2015 年上半年有关分离膜专利获得情况,如表 2 所示。由表 2 可见,我国

膜的专利申请数量不断增加,专利总数达 6 907 项,到 2013 年后专利年申请数已超过 1 000 项。从专利的种类来看,专利申请的类型以“发明型”专利为主,占据专利总数的 60% 左右;同时“实用新型”专利的比例在逐渐增大;“外观型”专利最少,每年仅几项。这表明我国的分离膜技术正在朝着解决行业关键核心技术和原创性方向发展。

表 2 我国分离膜的专利申请情况

类型	年份									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
发明型	255	374	398	542	591	712	944	940	693	
实用新型	53	65	102	134	152	215	218	165	342	
外观型	0	1	2	3	0	6	0	0	2	

## 5 有关分离膜文献发表情况

### 5.1 中文期刊分离膜文献发表情况

#### 5.1.1 期刊类型分析

在中国知网上以主题为限制条件,文献来源为“期刊”,搜索关键字“分离膜”或含“膜分离”,总结了 2007 年至今中文期刊有关膜的文献发表情况,详见表 3。如表 3 所示,自 2007 年后,与分离膜有关的文献发表数目共 4 888 篇,每年文献发表数目变化情况不大,但是中文核心期刊和普刊上发表的数目在 90% 以上,且 2013 年后在普刊上发表的篇数约占 50%。在中文 EI 和 SCI 期刊上发表数目较少,说明我国有关分离膜方面的中文文献的质量有待提高。

表 3 有关我国分离膜文献发表情况

期刊	年份									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
中文核心期刊	232	231	254	259	268	236	231	254	210	
EI	55	45	26	21	29	26	30	32	24	
SCI	25	7	9	11	11	10	13	5	13	
中文普刊	150	186	226	211	212	233	233	256	240	

#### 5.1.2 相关膜技术类型分析

在中国知网上以主题为限制条件,文献来源为“期刊”,分别搜索关键字“微滤膜”、“超滤膜”、“纳滤膜”、“反渗透膜”用以分析文献发表的相关膜技术的类型,其结果如表 4 所示。从表中可看出,文献中分离膜技术发表类型所占比重大小依次是:超滤膜技术,约占 40%;反渗透膜技术,约 33%;纳滤膜

技术,约17%;微滤膜最少,约10%。另外从表中可知,反渗透膜技术的比重逐渐增大,这源于我国越来越重视反渗透技术,目前国内已建成海水淡化工程中RO技术产能占总产能的63.67%<sup>[20]</sup>

表4 分离膜技术类型 篇

膜类型	年份									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
微滤	190	181	200	190	160	177	158	178	167	
超滤	504	599	684	759	715	721	695	718	689	
纳滤	354	232	245	226	238	234	260	245	263	
反渗透	259	333	347	370	390	444	380	467	474	

## 5.2 EI上有关分离膜文献发表情况

通过在EI上搜索主题、题目或摘要(theme/title/abstract)中含“膜分离(membrane separation)”的文献,总结2007年至今EI上有关分离膜文献发表数量,详见表5。从表5可知,EI数据库中有关分离膜的文献发表数目为2000篇,总体呈曲折上升的趋势,在2009年全年发表数目就已超过2000篇。

表5 EI数据库中有关分离膜的文献发表数目 篇

年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
数量	1600	1700	2200	2100	2350	2150	2600	2800	2700

## 5.3 EI数据库中不同国家有关分离膜文献发表情况

通过在EI上搜索主题、题目或摘要(theme/title/abstract)中含“膜分离(membrane separation)”的文献,分析中国、美国和日本3个国家在EI数据库中发表的有关膜分离的文献数目,详见表6。由表6可知,中国有关膜分离的文献发表数目不断增加,在2012年后超过了美国,近10年来一直领先日本。美国和日本有关膜分离的文献年发表数目趋于平缓,表明我国的膜技术已挤入世界第一梯队,在国际上具有一定的话语权。

表6 不同国家有关膜分离文献发表情况 篇

国家	年份									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	
中国	295	320	409	377	449	477	633	741	802	
美国	276	353	435	428	276	411	497	480	425	
日本	133	139	180	142	162	135	167	140	128	

## 6 结语

膜分离是一种新型、高效的分离技术,是对传统分离技术的一次革命。经过50多年的发展,特别是近10年,我国的膜分离技术已经得到了很大的突破,膜产业总产值从2005年的100亿元到2015年已达到790亿元,预计2020年可达到1000亿元。在水处理膜、渗透汽化膜、气体分离膜、离子交换膜、无机膜、膜反应器、新型膜的理论和应用研究方面取得了重要的创新进展,为我国的节能减排与传统产业改造做出了突出贡献。特别在水处理方面,我国反渗透技术已初具规模,相关技术已达到或接近国际水平。全国应用反渗透技术的工程达90多个,产水规模573540 t/d,占全国总产水规模的63.67%。

膜领域的这些发展离不开国家的支持,我国在2010年《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》中,膜技术产业于同时占据了节能环保、新材料两大战略性新兴产业而广受关注。“十二五”期间,在《新材料产业“十二五”发展规划》中把功能性膜材料列入高性能膜材料专项工程;《“十二五”节能环保产业发展规划》则明确提出要重点示范膜生物反应器(MBR),重点研发和产业化示范膜材料;2012年9月,国家科技部《高性能膜材料科技发展“十二五”专项规划》提出膜产值到2020年要达到1000亿元<sup>[21]</sup>;2013年5月,国务院印发《“十二五”国家自主创新能力建设规划》,明确了“分离膜材料”作为战略性新兴产业创新能力建设重点的地位<sup>[22]</sup>;2014年10月,国家发改委、工信部、科技部、财政部和环保部等五部委发布了《重大环保技术装备与产品产业化工程实施方案》,明确了高性能分离膜材料作为关键战略材料的发展重点,具体有把“膜法重金属脱除设备”和“膜萃取分离技术”作为国家重大环保技术装备与产品应用示范领域和方向、“把低成本陶瓷膜及成套设备”和“管式膜及组件”作为重大环保技术装备与产品产业化应用方向;2015年5月国务院印发《中国制造2025》,把脱盐率大于99.8%的海水淡化反渗透膜产品,低成本的、装填密度超过300 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>陶瓷膜产品、应用于膜氯碱工业的离子交换膜及突破全膜法氯碱生产新技术和成套装置的渗透通量提高20%,膜面积达到10万m<sup>2</sup>的渗透汽化膜产品作为关键材料的发展重点。“十三五”期间,中国膜工业协会提出的目标是,年平均增长率达到或超过20%,到“十三五”末

产值规模再翻番,达到 2 500 亿 ~ 3 000 亿元,膜产品出口值每年要超过 100 亿元;另外膜技术创新应有新突破,反渗透膜国产率达到 40% ~ 60%,纳滤膜、超滤膜和微滤膜(含 MBR)国内市场占有率达 60% ~ 80%。

在此背景下,未来我国膜的发展方向主要是,围绕国家重大需求,加强基础理论与原创技术的研究。开发新型膜材料,提升膜的性能,制定一套完整的有关膜的标准体系,规范膜市场的结构导向。针对市场需求开发出应用于特殊工业的新型膜,如反渗透用作水深度处理的核心技术,反渗透膜应用多元化;膜生物反应器技术(MBR)成为废水资源化的重要手段<sup>[23]</sup>;低成本应用高温烟气除尘的陶瓷膜<sup>[24-25]</sup>;高选择性的气体分离<sup>[26]</sup>;新型 MOF 膜<sup>[27-29]</sup>和用于高酸性、碱性等苛刻性环境下的分离膜<sup>[30-31]</sup>等。

### 参考文献

- [1] 王学军,张恒,郭玉国.膜分离领域相关标准现状与发展需求[J].膜科学与技术,2015,35(2):121-127.
- [2] Krenar Shqan, Mottern M L, Yu D, et al. Preparation and properties of porous  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> membrane supports[J]. Am Ceramic Soc, 2006, 89(6):1790-1794.
- [3] 董应超,刘杏芹.新型低成本多孔陶瓷分离膜的制备与性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2008.
- [4] 黄虎彪,彭新生.氧化石墨烯超滤分离膜[D].杭州:浙江大学,2014.
- [5] 徐南平,高从堦,金万勤.中国膜科学技术的创新进展[J].中国工程科学,2014,16(12):5-9.
- [6] 王华,刘艳飞,彭东明,等.膜分离技术的研究进展及应用展望[J].应用化工,2013,42(3):533-534.
- [7] 杨方威,冯叙桥,曹雪慧,等.膜分离技术在食品工业中的应用及研究进展[J].食品科学,2014,35(11):331-338.
- [8] 李军庆,李历,王文奇,等.膜分离技术在食醋澄清中的应用[J].中国酿造,2012,31(11):142-146.
- [9] 李文,陆海勤,刘桂云,等.陶瓷膜在果蔬汁澄清与除菌中的应用[J].食品工业,2015,36(6):259-262.
- [10] 邹妹妹,王军,田蒙奎,等.PM<sub>2.5</sub>细颗粒物捕集设备研究应用现状[J].环境保护与循环经济,2014,35:42.
- [11] 姜绍通.食品工程原理[M].北京:化学工业出版社,2010.
- [12] 韩虎子,杨红.膜分离技术现状及其在食品行业的应用[J].食品与发酵科技,2012,48(5):24-26.
- [13] Mohammad A W, Teow Y H, Ang W L, et al. Nanofiltration membranes review: Recent advances and future prospects[J]. Desalination, 2015, 356(1):226-254.
- [14] Seema S Shenvi, Arun M Isloor, Ismail A F, et al. A review on RO membrane technology: Developments and challenges[J]. Desalination, 2015, 368:10-26.
- [15] 吕晓龙,张艳萍,王晓楠,等.中空纤维多孔膜性能评价方法探讨[J].膜科学与技术,2011,31(2):1-6.
- [16] 潘献辉,张艳萍,王晓楠,等.我国膜技术标准现状及重点内容分析[J].中国给水排水,2014,30(8):25-29.
- [17] 王薇.分离膜标准现状与发展[J].中国标准化,2010,(1):17-20.
- [18] 潘献辉.膜产品质量检测——标准和发展[A].见:2015年亚太脱盐技术国际论坛论文集[C].北京:亚太脱盐协会,中国膜工业协会,国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所,2015:53-56.
- [19] 陈晓芬,于森,况彩菱,等.中国膜产业竞争力分析[A].见:海峡两岸膜法水处理院士高峰论坛暨第六届全国医药行业膜分离技术应用研讨会论文集[C].北京:中国工程院环境与轻纺工程学部,中国膜工业协会,2015:27-31.
- [20] 高从堦,周勇,刘立芬.反渗透海水淡化技术现状和展望[J].海洋技术学报,2016,35(1):2-14.
- [21] 宋瀚文,刘静,曾兴宇,等.我国海水淡化产能分布特征和出水水质[J].膜科学与技术,2015,35(6):122-125.
- [22] 《“十二五”国家自主创新能力建设规划》发布[J].电子系统自动化,2013,(13):126.
- [23] 郑祥.中国水处理行业可持续发展战略研究报告[M].北京:中国人民大学出版社,2013.
- [24] 仲兆祥,李鑫,邢卫红,等.多孔陶瓷膜气体除尘性能研究[J].环境科学与技术,2013,36(6):155-158.
- [25] 李铁枝,林丽华,林雄水.陶瓷膜除尘技术及在有色冶金烟气除尘中的应用[C].第四届全国膜分离技术在冶金工业中应用研讨会论文集.北京:膜科学与技术编辑部,2014:62-64.
- [26] Yi Li, Tai-Shung Chung. Exploratory development of dual-layer carbon-zeolite nanocomposite hollow fiber membranes with high performance for oxygen enrichment and natural gas separation[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2008, 113(3):315-324.
- [27] <http://dx.doi.org/10.1039/c5cs00597c>.
- [28] Nikolay Kosinov, Jorge Gascon, Freek Kapteijn, et al. Recent developments in zeolite membranes for gas separation[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 499:65-79.
- [29] Elda Adatoz, Ahmet K Avci, Seda Keskin. Opportunities and challenges of MOF-based membranes in gas separations[J]. Separation and Purification Technology, 2015, 152:207-237.
- [30] Shouyong Zhou, Ailian Xue, Yijiang Zhao, et al. Grafting polyacrylic acid brushes onto zirconia membranes: Fouling reduction and easy-cleaning properties[J]. Separation and Purification Technology, 2013, 113(9):53-63.
- [31] Jianqiu Hou, Xinyu Wang, Yazhi Liu, et al. Wittig reaction constructed an alkaline stable anion exchange membrane[J]. Journal of Membrane Science, 2016, 518:282-288. ■