

面向石油化工难分离体系的分离技术研究进展

陈毓秋¹, 潘婉莹², 闫佳淇², 周嘉萍², 雷杨², 张香平^{1,3}

(¹ 中国石油大学(北京)重质油全国重点实验室, 北京 102249; ² 武汉科技大学化学与化工学院/煤转化与新型炭材料湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430081; ³ 中国科学院过程工程研究所, 离子液体清洁过程北京市重点实验室, 北京 100190)

摘要: 在石油化工中, 分离过程是关键过程环节, 且能耗占比大, 其技术复杂度与效率直接决定了产品质量、能耗水平及环保性能。诸多难分离体系如芳烃与非芳烃、烯烃与烷烃等, 因组分性质相近、易形成共沸物、近沸物等特性, 给传统分离技术带来严峻挑战。首先系统梳理和分析了石油化工难分离体系类型及特征, 并详细介绍了精馏、萃取、结晶等传统分离技术的应用及其局限性, 探讨了离子液体萃取精馏、膜分离及吸附等新型分离技术带来的分离流程创新和过程瓶颈。并提出了面向过程低碳化、绿色化要求的分离技术未来发展方向, 以实现石油化工难分离体系的高效、节能、环保分离, 推动石油化工行业低碳绿色可持续发展。

关键词: 传质; 分离; 优化设计; 过程系统

中图分类号: TQ 54 **文献标志码:** A

文章编号: 0438-1157 (2026) 01-0016-18

Advances in separation technologies for difficult-to-separate systems in petrochemical industry

CHEN Yuqiu¹, PAN Wanying², YAN Jiaqi², ZHOU Jiaping², LEI Yang², ZHANG Xiangping^{1,3}

(¹ State Key Laboratory of Heavy Oil Processing, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; ² School of Chemistry and Chemical Engineering, Hubei Key Laboratory of Coal Conversion and New Carbon Materials, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; ³ Beijing Key Laboratory of Ionic Liquids Clean Process, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In the petrochemical industry, separation is a crucial process stage that accounts for a large share of energy consumption. The complexity and efficiency of separation technologies directly determine product quality, energy use, and environmental performance. Many difficult-to-separate systems, such as aromatics and non-aromatics, olefins and alkanes, pose serious challenges to traditional separation technologies due to their similar component properties and the tendency to form azeotropes and near-boiling substances. This paper first systematically reviews and analyzes the types and characteristics of difficult-to-separate petrochemical systems and then discusses the applications and limitations of conventional separation technologies such as distillation, extraction, and crystallization. It further examines the process innovations and bottlenecks associated with emerging techniques, including ionic liquid-based extractive distillation, membrane separation, and adsorption. Finally, future development directions are proposed to meet the requirements of low-carbon and green processes, aiming to

收稿日期: 2025-09-02 修回日期: 2025-10-06

通信作者: 张香平(1969—), 女, 博士, 教授, xpzhang@ipe.ac.cn; 雷杨(1988—), 男, 博士, 副教授, leiyang@wust.edu.cn

第一作者: 陈毓秋(1989—), 男, 博士, 特聘教授, yuqch@cup.edu.cn

基金项目: 中国石油大学(北京)校优秀青年项目(2462025QNXZ005); 国家自然科学基金项目(22578340, 22578483)

引用本文: 陈毓秋, 潘婉莹, 闫佳淇, 周嘉萍, 雷杨, 张香平. 面向石油化工难分离体系的分离技术研究进展[J]. 化工学报, 2026, 77(1): 16–33

Citation: CHEN Yuqiu, PAN Wanying, YAN Jiaqi, ZHOU Jiaping, LEI Yang, ZHANG Xiangping. Advances in separation technologies for difficult-to-separate systems in petrochemical industry[J]. CIESC Journal, 2026, 77(1): 16–33

achieve efficient, energy-saving, and environmentally friendly separation of difficult-to-separate petrochemical systems and promote the low-carbon, green, and sustainable development of the petrochemical industry.

Keywords: mass transfer; separation; optimized design; process system

引言

石油化工是现代工业体系的“血液”，支撑着国民经济的运转和产业链的完整^[1-3]。作为最重要的化石能源，以石油为原料衍生出了复杂而完整的产业链，其产品涵盖汽油、柴油等能源产品，烯烃、芳烃等基础化工原料，以及塑料、橡胶、化纤等终端化工产品，是众多工业领域基础原料的来源。石油化工产业规模庞大、产值高，对国内生产总值(GDP)贡献显著，2024年，中国石油化工行业总产值达16.28万亿元^[4]，同比增长2.1%，连续三年稳定在16万亿元规模以上。推动石化过程绿色低碳高值化发展尤为重要。

分离过程是石油化工生产过程中能耗最高、成本最大、技术最复杂的关键环节之一。近年来，传统分离技术的研究与应用主要聚焦于分离效率、处理能力、工程放大等问题，同时新型分离技术的开发、研究和应用也已成为分离工程研究的前沿课题。难分离体系由于其各组分之间的物理化学性质相近、相互作用复杂，分离难度较大，为达到目标分离效果，往往需要消耗大量的能量、投资和成本。考虑到实际工业过程对分离效率、能耗、环保等方面的严苛要求，分离技术的改进和开发显得尤为重要。

当前石化难分离体系的分离技术研究主要聚焦于溶剂萃取、精馏和膜分离，而对吸附、结晶等分离技术的研究报道相对较少。本文系统梳理了难分离体系的分离技术研究现状，对各种分离技术的原理、特点、适用范围及局限性进行分析，并提出未来具有可行性的分离技术及发展方向，旨在助力石油化工行业绿色低碳化转型和可持续发展。

1 难分离体系

1.1 基本概念

难分离体系是指混合物中各组分的物理化学性质(如沸点、溶解度等)差异小，或因体系存在特殊相互作用关系，导致传统分离技术难以高效、经济地实现分离的体系。这类体系的分离往往需要

复杂工艺、高能耗或特殊工艺处理，是工业分离领域的主要挑战之一。

在石油化工领域，由于原料组成复杂、产品结构相似，存在大量的难分离体系，如芳烃与非芳烃(如苯/环己烷、苯系物/脂肪烃)、烯烃与烷烃(如乙烯/乙烷)等。这些体系的分离因能耗高、设备投资高等原因，是过程低碳绿色化的关键瓶颈。

1.2 难分离体系主要类型及特征

基于体系组成特征，石油化工难分离体系主要分为轻质烃类体系、芳烃与非芳烃体系、芳烃异构体体系、含硫/氮化合物体系和重质油组分分离体系，其常见分离技术如图1所示。

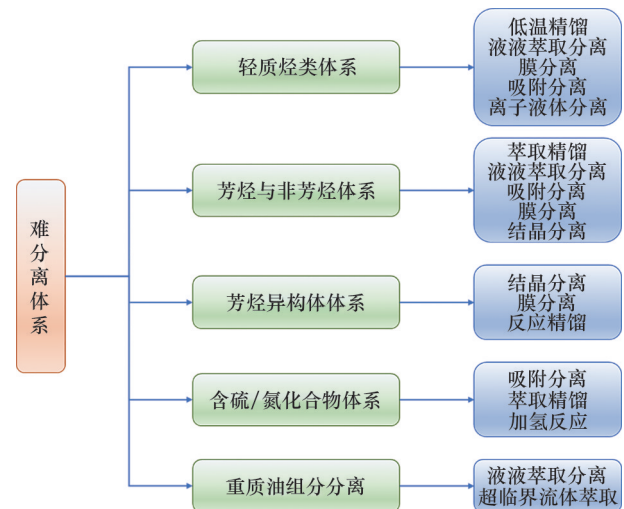


图1 难分离体系及常见分离技术分类

Fig.1 Classification of difficult-to-separate systems and common separation techniques

1.2.1 轻质烃类体系 轻质烃($C_1 \sim C_5$)是石油炼制过程中的核心馏分，主要可分为烷烃/烯烃分离、烯烃/炔烃分离、不同碳数的烷烃分离、正异构烷烃分离^[5]。

烷烃和烯烃结构相似，且沸点相近，因此分离难度较大。以丙烯/丙烷为例，丙烯和丙烷沸点相近，相对挥发度约1.1~1.2。文献统计了近五年关于丙烯/丙烷分离方法的研究报道，如图2所示，当前丙烯/丙烷的分离方法主要包括低温精馏、膜分离、吸收分离、吸附分离、离子液体分离等^[6-7]。低温精馏是一种传统的烷烃/烯烃分离技术^[8]，其需要将设

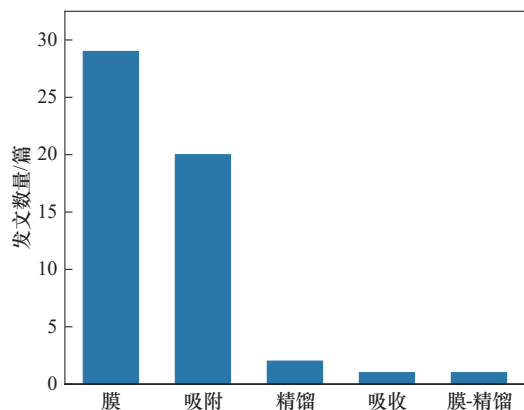


图2 基于Web of Science(WOS)数据库的丙烯/丙烷分离方法近五年发文数量统计(数据检索范围为“last five years”,检索关键词为:“propylene/propane” and “separation technology”,文献类型限定为“article”)

Fig.2 Statistical data of the number of published papers on separation methods of propylene/propane in the Web of Science (WOS) database in the past five years (The data retrieval range is “last five years”, the search keywords are “propylene/propane” and “separation technology”, and the document type is limited to “article”)

备温度降低到约 -40°C ,且将精馏塔内部压力提高到约 7000 kPa ^[9],存在高能耗、高成本、产品纯度难以控制等问题^[10-11];膜分离具有效率高、能耗低、操作简便的优点,ZIF-8膜是目前的研究热点^[12];分子筛、活性炭及MOFs材料是研究较多的用于丙烯/丙烷分离的吸附材料^[13];吸收分离工艺的能耗和成本远低于低温精馏,在丙烯/丙烷的分离中具有巨大潜力^[14];离子液体在分离丙烯/丙烷上具有优异的性能,蔡艾梓等^[7]总结对比了不同离子液体的分离性能及其影响因素。

烯烃和炔烃的分子量接近,使炔烃和烯烃的分离成为一个巨大的挑战^[15-16],虽然低温蒸馏和选择性加氢技术广泛应用于分离炔烃/烯烃混合物,但分离过程中的能耗大和产生副产物等问题尚未得到解决^[17]。在近几年的研究中,部分MOFs材料在丙炔/丙烯的分离中表现出出色的分离性能,如ELM-12^[18]、NCU-100^[19]。不同碳数的烷烃物质物理化学性质差异小,且随碳数增加,体系复杂性呈指数级上升,分子筛吸附和聚合物膜分离都是有效的分离手段^[5]。正异构烷烃的分离常用吸附分离技术,利用其在吸附材料上的吸附速率和吸附容量的差异而进行分离,例如5A分子筛和ZIF-8对直链烷烃具有较高的吸附量,表现出较好的正构烃吸附性能^[20-21],UIO-66可优先吸附支链烷烃,被广泛应用于

异构烷烃的吸附分离^[22-24]。

1.2.2 芳烃与非芳烃体系 芳烃是石化过程的核心基础原料,但其常与非芳烃共存于催化重整产物中,二者极性接近,分离难度大,主要有萃取精馏、吸附分离、膜分离、结晶分离等分离方法。统计近五年的关于苯/环己烷分离方法的研究如图3所示。吸附是当前苯/环己烷分离方法的研究热点,其他分离系统的研究涉及到膜分离和萃取精馏分离。

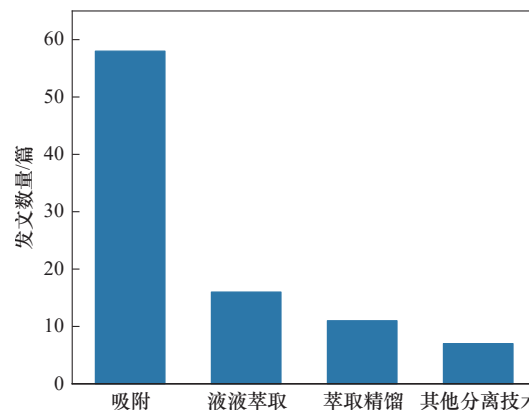


图3 基于Web of Science(WOS)数据库的苯/环己烷分离方法近五年发文数量统计(数据检索范围为“last five years”,检索关键词为:“benzene cyclohexane separation”,文献类型限定为“article”)

Fig.3 Statistics of the number of published papers on benzene/cyclohexane separation methods in the past five years based on the Web of Science (WOS) database (The data retrieval range is “last five years”, the search keyword is “benzene cyclohexane separation”, and the document type is limited to “article”)

萃取精馏技术基于溶剂与芳烃和非芳烃作用力不同,提高体系相对挥发度,其分离效率高于传统精馏^[25]。可利用单一溶剂就可以实现99%的芳烃纯度,如用*N*-甲基-2-吡咯烷酮、环丁砜或苯酚分离甲苯/正庚烷体系^[26]。吸附分离技术通过吸附剂对混合物各组分吸附能力的不同实现分离,该方法的优势在于操作简单、适应性强,常见的有分子筛^[27]、金属有机骨架^[28]等。膜分离技术利用膜的选择透过性实现分离,其中聚合物膜因其优异的成膜性备受关注^[29]。

近几年的研究中,基于系统集成的耦合分离技术逐渐成为焦点。耦合分离技术是指结合两种或两种以上的分离技术,综合各自优点实现高效分离,芳烃/非芳烃体系的分离技术耦合包括超声波辅助萃取、精馏-膜和萃取-萃取精馏等^[30]。

1.2.3 芳烃异构体体系 芳烃异构体体系由于其组分间沸点接近、同分异构等特性,分离单一组分

面临较大挑战,目前常见的分离方法包括结晶分离、吸附分离、反应精馏等。不同的分离方法适用的分离体系也有所区别,如 MIL-160 膜对 C_8 芳烃异构体具有较好的分离效果^[31],萃取精馏对 C_9 芳烃具有较好的分离效果^[32]等。何燎等^[33]对 $C_8 \sim C_{10}$ 芳烃异构体的分离方法和分离效率做了统计,如图4所示。

1.2.4 含硫/含氮化合物体系 石油馏分中常含 H_2S 、硫醇、噻吩等硫化物,以及氨、吡啶等含氮化合物,这些杂质不仅腐蚀设备、毒害催化剂,还需脱除至 ppm(10^{-6})级以下以满足环保标准,以二苯并噻吩类化合物脱硫体系为例,现有的方法有吸附分离^[34]、萃取精馏、加氢^[35]等方法。此外,近年来离子液体替代传统有机溶剂萃取脱硫的研究报道不断涌现,离子液体在室温条件下的脱硫脱氮率均较高, $[FeCl_4]^-$ 、 $[ZnCl_3]^-$ 等 Lewis 酸性和 $[HSO_4]^-$ 、 $[H_2PO_4]^-$ 等 Bronsted 酸性阴离子有较强的脱除能力^[36]。

1.2.5 重质油组分分离 石油加工中的重油(如减压渣油、焦化蜡油)是石油化工领域组分最复杂的原料之一,组分分子量跨度大(从 C_{15} 到 C_{100+})、结构复杂且易聚合,其分离主要有三种依据,一是各组分在不同溶剂中的溶解度不同,二是不同组分的极性不同,三是不同组分的酸碱程度不同^[37-38]。常用的分离方法有液液萃取和超临界流体萃取,后者对重质油组分有较好的分离效果^[39],如使用丁烷/戊烷超临界萃取溶剂进行渣油脱沥青,其分离能耗要比丙烷脱沥青要低^[37]。

1.3 难分离的原因剖析

难分离体系的形成主要源于体系中各组分的

物理性质、化学性质以及它们之间的相互作用等多方面因素,具体如下:(1)物理性质相近。混合物中各组分的沸点、熔点、溶解度、密度、蒸汽压等物理性质相近,如在近沸点物系中各组分沸点相近,使得它们难以通过普通精馏利用挥发度差异实现有效分离;对于溶解度相近的组分,采用萃取等基于溶解度差异的分离方法也难以达到理想效果;(2)化学性质相似。当各组分的化学结构和化学性质相似时,它们之间的相互作用力相近,难以通过化学反应或化学作用实现分离。例如,同分异构体由于具有相同的分子式和相似的化学结构,化学性质几乎相同,使得常规化学分离方法难以发挥作用;(3)形成共沸物。共沸物的气相组成和液相组成相同,在普通精馏过程中无法通过多次汽化和冷凝实现进一步分离;(4)相对挥发度接近。相对挥发度是衡量混合物中各组分分离难易程度的重要参数,当体系中各组分的相对挥发度接近1时,难以通过精馏等气液传质过程实现有效分离;(5)复杂的分子间相互作用。混合物中各组分之间可能存在氢键、范德华力、离子-偶极相互作用等复杂的分子间相互作用,这些相互作用会影响各组分的物理化学性质和相平衡关系,使得分离过程变得更加复杂。

2 传统分离技术及其应用

2.1 精馏分离

在石油化工行业,精馏技术因其成熟性和可靠性,广泛应用于多种混合组分体系的分离,主要包括低碳数烯烃与烷烃的分离^[40-41]、芳烃与非芳烃的

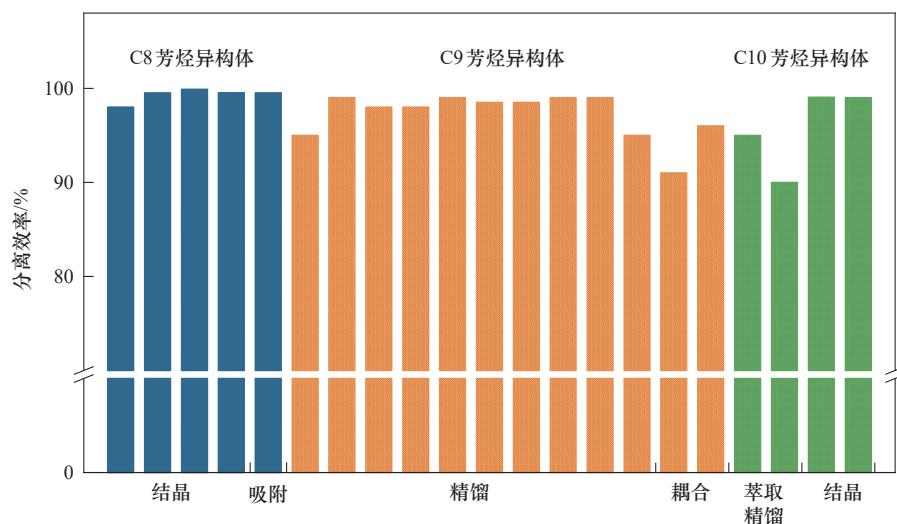


图4 芳烃异构体分离方法和分离效率的关系

Fig.4 Relationship between the separation methods of aromatic isomers and their separation efficiency

分离^[42]、石油馏分的切割以及同系物或同分异构体的分离。其原理是利用混合物中各组分挥发度的差异,通过多次部分汽化和部分冷凝,从而实现高纯度分离。然而,在分离相对挥发度接近的难分离体系时,为了达到预期的分离纯度,精馏吸收等传统分离方法需要多个理论塔板数,存在设备占地大、投资成本高、能耗高等问题。特殊精馏则是针对一些普通精馏难以分离的体系,如共沸物体系、近沸点物系等,采用特殊方法来实现高效分离。常见的特殊精馏包括共沸精馏、萃取精馏和变压精馏等,其通过改变组分之间的相对挥发度,使混合物易于分离。

萃取精馏是向混合物中加入萃取剂,利用萃取剂对各组分的溶解度差异,从而改变各组分间的相对挥发度,使混合物易于分离。萃取精馏技术需要额外的溶剂回收装置,选择合适的溶剂是实现高效低耗分离的关键。常用萃取剂包括二甲基亚砜、环丁砜、*N*-甲基甲酰胺、甘油和 *N*-甲基吡咯烷酮等有机溶剂^[43],利用量子化学计算和分子动力学模拟等方法,通过对相对挥发度、密度泛函理论和分子机

理的分析,可筛选出更合适的溶剂。此外,混合萃取剂由于分离效果好,能耗更低的优点逐渐成为主流,通过调整混合萃取剂的比例,可以灵活地实现分离性能与工艺能耗之间的权衡。Zhang 等^[44]研究了用单一溶剂和混合溶剂用萃取精馏分离环己烷-异丙醇-水三元共沸混合物的过程,如图 5 所示,利用相对挥发性曲线和分子机理确定了合适的溶剂。结果表明,混合萃取剂的分离技术可降低年总成本,节约能源。

共沸精馏是在被分离的混合物中加入共沸剂,使其与原混合物中的一个或多个组分形成新的共沸物,该共沸物的沸点与原混合物中各组分的沸点相差较大,从而通过精馏实现分离。在乙酸乙酯-甲醇-苯-异丙醇-异丙醇-水、乙醇/甲苯和碳酸二甲酯-甲醇^[45]的分离中,共沸精馏是一种更经济、更节能的替代传统精馏的技术。而变压精馏则利用混合物在不同压力下相对挥发度的差异,通过改变操作压力实现难分离混合物分离。变压精馏仅适用于压力敏感性强的体系,如丁酮/异丙醇/正庚烷^[46]、四氢呋喃/甲醇/水^[47]和丙酸乙酯/乙醇^[48]等体系。

特殊精馏技术在难分离体系中应用广泛,但受分离推动力、操作条件及经济性等限制,存在显著

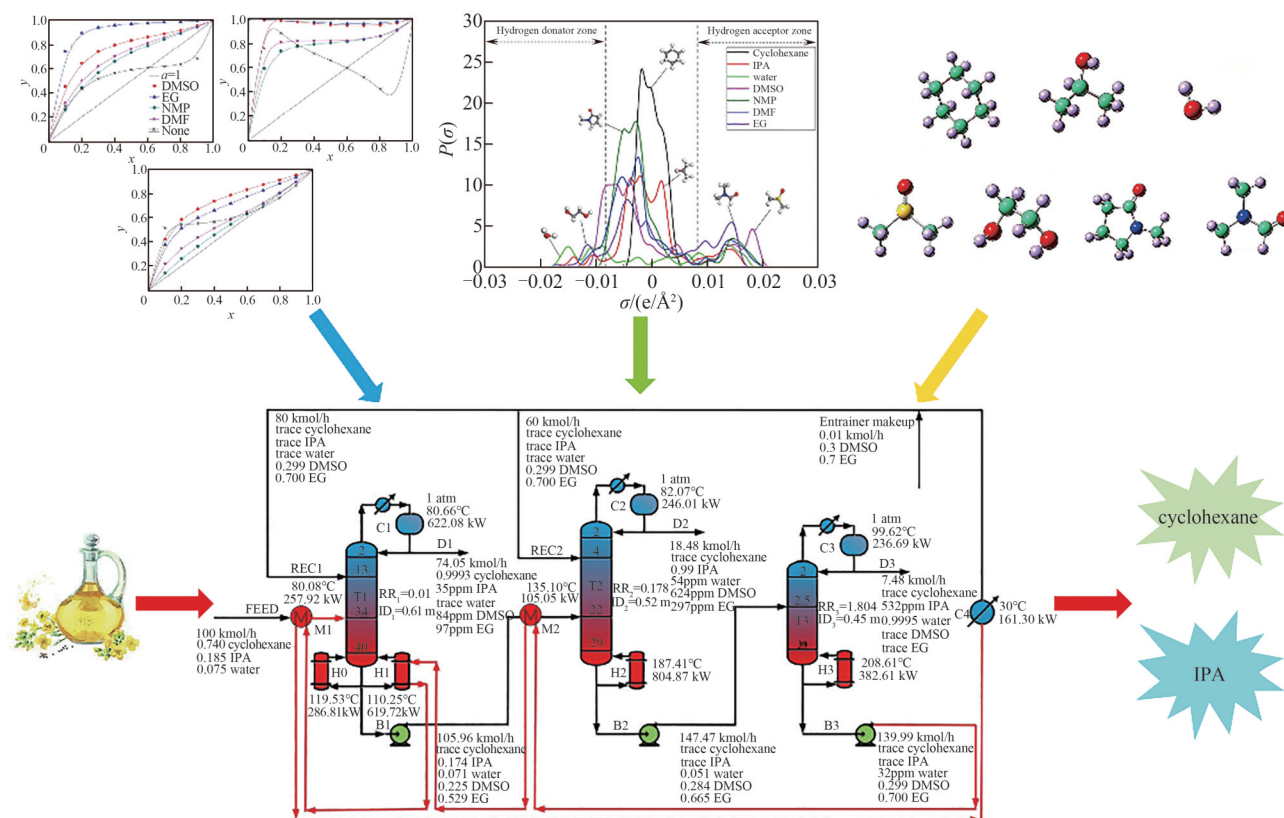


图 5 基于分子机理的混合萃取剂分离环己烷-异丙醇-水体系^[44]($1 \text{ \AA}=0.1 \text{ nm}$, $1 \text{ atm}=101325 \text{ Pa}$)

Fig.5 Separation of the cyclohexane-iso-propanol-water system using a mixed extractant based on molecular mechanism^[44]

局限性:(1)技术适用范围局限,变压精馏仅适用于恒沸组成随压力变化显著的体系,共沸精馏需引入能与待分离组分形成新恒沸物的共沸剂,且新恒沸物需具备“低沸点、易分离”特性,否则无法应用(如某些极性差异极小的烃类混合物难以找到合适夹带剂);(2)能耗与经济性限制,萃取精馏中,溶剂回收塔需将高沸点溶剂与重组分分离,再沸器负荷高(尤其溶剂用量大时,能耗可能超过常规精馏);(3)安全与环保风险,部分萃取剂(如某些有机溶剂)具有毒性、易燃性,存在泄漏风险,需额外安全防护(如防爆设计、废气处理)。

2.2 液液萃取分离

液液萃取基于“相似相溶”原理,利用溶质在溶剂中溶解度和选择性差异实现分离。液液萃取技术在石化分离中主要应用于芳烃/非芳烃、C₄/C₅烃类异构体、重质油馏分的精细分离体系,常用的萃取剂包括环丁砜、N-甲基吡咯烷酮(NMP)、二甲基亚砜(DMSO)、N-甲酰基吗啉(NFM)、磺烷(SUL)、糠醛、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)和乙腈等有机溶剂^[49]。对于液液萃取分离技术的研究主要集中在溶剂设计和溶剂选择,选择合适的萃取剂是高效分离的关键^[30]。

在溶剂设计领域,主要通过实验结果结合量子化学计算,为选择高分离性能溶剂提供理论指导。量子化学计算通过密度泛函理论(DFT)计算溶剂与溶质分子的相互作用力(如氢键、范德华力),结合分子动力学模拟预测相平衡行为,从分子层面揭示萃取机理,减少实验筛选的盲目性,有助于快速选择萃取过程中高效的溶剂^[50-51]。如Li等^[52]通过量子化学计算方法探讨了在NMP、SUL和NFM溶剂分离

1-甲基萘和十二烷中溶剂分子结构、相互作用力与萃取性能之间的构效关系,如图6所示,1-甲基萘在NMP中的溶解度最高,SUL对1-甲基萘和十二烷的分离能力最强。此外,除了量子化学计算方法,还有基于COSMO-RS模型或COSMO-SAC模型的溶剂设计,可通过预测溶剂与芳烃间的相平衡关系,实现溶剂筛选和配方优化^[53-55]。

而在溶剂选择方面,针对复杂体系的分离需求,混合萃取剂的研发成为新趋势。将两种或多种溶剂按一定比例复配,可发挥协同效应,例如DMSO与DMF按9:1混合后,减少了环烷烃在萃取剂中的溶解度,提高了复合萃取剂对芳烃的选择性^[56-57]。混合体系的优势在于灵活调节溶剂性能,其组分比例的优化需结合实验与模拟计算等方法,以实现性能最大化^[58]。

传统液液萃取的局限性在于溶剂损耗与环保方面,传统有机溶剂(如糠醛、乙腈)易挥发,且部分有毒(如N-甲基吡咯烷酮对水生生物有害)。此外,尽管复合萃取剂提高了分离效率,但是由于萃取后溶剂的分离困难、能耗大、成本高等,限制了其在工业上的应用。

2.3 结晶分离

结晶分离基于组分间熔点差异或溶解度随温度的显著变化,通过相变实现选择性分离,分为熔融结晶和溶液结晶。熔融结晶技术是当混合体系温度降低至某一组分的熔点时,该组分优先结晶析出,从而实现与其他组分的分离。溶液结晶则依据溶解度随温度的变化,对于大多数物质,其在溶剂中的溶解度随温度降低而减小。当对混合溶液进行降温操作时,溶解度降低的物质会达到过饱和状

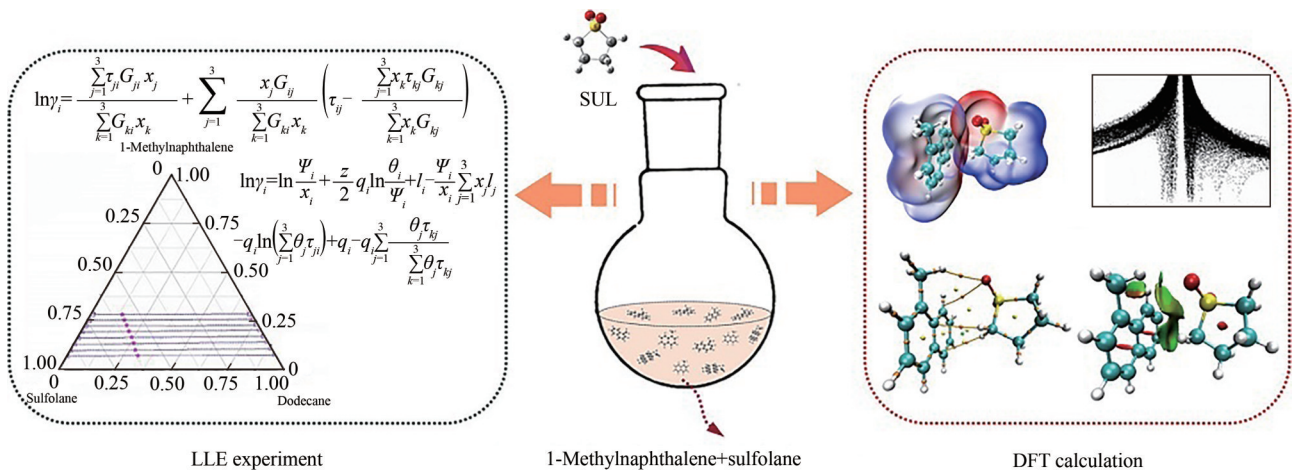


图6 基于量子化学计算方法分离1-甲基萘和十二烷体系^[52]

Fig.6 System for separating 1-methylnaphthalene and dodecane based on quantum chemical calculation method^[52]

态,进而结晶析出。

熔融结晶在工业中应用较多,多应用于分离共沸混合物,异构体混合物和热敏体系,如从煤焦油中提取萘油、二甲苯异构体分离、丁二烯/丁烷分离和乙二醇/1,2-丁二醇等分离。以对二甲苯分离为例,二甲苯异构体分离是世界七大分离难题之一,工业上结晶分离法是最早用来分离对二甲苯及其异构体体系,利用混合二甲苯中各种异构体的熔点差,生产高纯度对二甲苯,目前,全球30%的装置采用结晶法^[59]。

结晶分离技术利用物质溶解度或者凝固点的差别来实现产品组分分离,通常不需要外加溶剂,减少了有机溶剂的使用,避免造成环境污染。因此,结晶分离是一种相对绿色环保的单元操作。然而,结晶分离技术也有其局限性:(1)在连续生产方面仍存在结壳和堵塞等问题,大规模连续工业化生产是关键技术难题;(2)对于重质油等高黏度体系,结晶过程中的传质效率较低,影响结晶速率和分离效果;(3)熔融结晶设备,通常需要精确温控和特殊材质,以适应低温或高温等操作条件,增加了设备投资成本。

上述传统分离技术的能耗、环境影响以及优缺点对比见表1。

表 1 不同传统分离技术的对比

Table 1 Comparison of different traditional separation techniques

分离技术	能耗	环境影响	优点	缺点
传统精馏	高	大	技术成熟,操作简单	投资高,能耗高
萃取精馏	中	中	操作灵活,能耗较低	溶剂回收成本高
共沸精馏	中	中	投资较少,能耗较低	溶剂回收成本高
液液萃取	低	中	操作简便,选择性强	溶剂回收成本高
结晶分离	低	低	工艺简单,能耗低	连续工业化生产难

3 新型分离技术及其应用

3.1 离子液体分离

离子液体由有机阳离子和无机或有机阴离子构成,具有蒸气压极低、热稳定性高、溶解能力可调、选择性强等独特性质^[60],在石油化工领域的分离过程中展现出显著优势,尤其适用于传统分离技术能耗高、效率低或污染严重的场景^[61-63]。

在石油化工的原料气和工艺气处理中,离子液体在酸性气体的吸收方面表现出高选择性^[64-65],使

其成为传统胺法脱酸技术的绿色替代方案。Zhang等^[66]分子动力学模拟证实了吡啶鎓(如[bpy]⁺)、磷鎓(如[P₆₆₆₁₄]⁺)、胍鎓(如[TMG]⁺)等阳离子和[SCN]⁻、[NO₃]⁻、[BF₄]⁻、[Tf₂N]⁻等阴离子在SO₂吸收中具有重要作用;刘茹飞等^[67]的研究表明离子液体[BMIM][Tf₂N]作为吸收剂表现出良好的CO₂捕集效果。

面对石油化工中的难分离体系,离子液体通过调控溶解选择性实现高效分离。其已被广泛应用于芳烃混合物^[68-71]、烯烃/烷烃^[72,73]的分离。Ayuso等^[74]研究了苯、甲苯和二甲苯的分离,利用VLE/VLE实验数据验证了CPA-EOS模型的准确性,进一步研究发现[C₂C₁Im][TCM]和[C₄C₁Py][TCM]这两种离子液体适合苯、甲苯和二甲苯在裂解汽油的分离^[75]。Guo等^[76]采用粒子群优化算法对不同丙烯/丙烷进料组成的新工艺进行了优化设计,并与基于[BMIM]的ILs和热泵蒸馏工艺进行了比较,提出的基于[MMIM]的ILs工艺表现出明显的优势,在能源消耗、年总成本(TAC)和气体排放方面分别降低了6.1%~16.0%、18.5%~53.5%和12.6%~27.3%。

在稠环芳烃的分离中,离子液体也因其独特的理化性质表现出巨大的应用潜力^[77]。Li等^[78]对正十六烷/1-甲基萘体系的分离进行了研究,通过模拟和实验证明了离子液体高效分离的可行性;Zhao等^[79]研究了12种不同的离子液体,发现[BMIM][TOS]的苯并芘的去除率最高;Arenas-Fernández等^[80]使用离子液体从润滑油中提取PAH化合物,证实了各种离子液体有效去除芳香族化合物的潜力;Liu等^[50]研究了从FCC柴油中提取PAHS的方法,发现离子液体的选择性显著高于常规溶剂。

离子液体在石油产品精制领域也表现突出。如惠燕华等^[81]合成了5种三乙二胺类离子液体用于油品萃取脱氮,对吡啶的脱除率可达74.0%;蒋斯麒等^[82]将[EMIM][DCA]用于萃取分离苯并噻吩和喹啉,从计算和实验角度证明了其可行性;李斯文等^[83]总结了多种负载型离子液体多酸在燃油脱硫的应用,比如单一离子液体多酸的初次脱硫效率都在80%以上,最高可达99.2%,有良好的应用前景。

聚焦于石化行业难分离体系,本课题组以离子液体为核心,构建了“溶剂设计-工艺模拟-工业评估”的完整技术链条,如图7所示,提出基于混合整数非线性规划的计算机辅助离子液体筛选模型,整合UNIFAC-IL热力学模型与基团贡献法,实现溶剂结构与分离性能的精准匹配,针对不同难分离体系

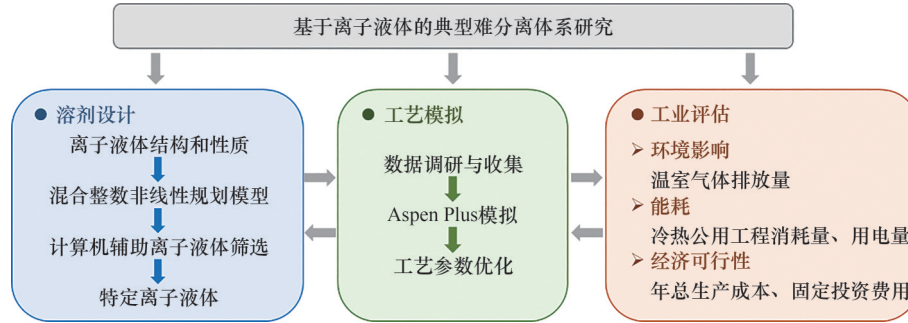


图7 “溶剂设计-工艺模拟-工业评估”的技术链条

Fig.7 The technical chain of “solvent design-process simulation-industrial evaluation”

的特性,定向设计并筛选出系列高性能离子液体溶剂,在芳烃混合物、烯烃/烷烃等典型难分离体系中取得突破性成果,为基于离子液体分离技术的工业化应用提供了核心支撑。

对于烯烃/烷烃典型难分离体系,例如乙烯/乙烷分离体系,筛选得到[C₁Py][TFA]和[C₁Im][TFA]为最优离子液体溶剂,与传统分离工艺相比,基于[C₁Py][TFA]和[C₁Im][TFA]的萃取精馏乙烯/乙烷分离工艺的年度总成本分别降低46.51%和69.82%。此外,能耗分别减少41.60%和42.16%,温室气体排放量也分别下降34.00%和34.65%^[84]。对于丙烯/丙烷分离体系,对传统分离工艺和基于[C₂IM][EtSO₄]的萃取精馏工艺进行了严格过程模拟并进行了深入的能源与经济性评估,如图8所示,基于[C₂IM][EtSO₄]的分离工艺可实现68.9%的能源节约和74.7%的成本降低,且离子液体溶剂回收率达99.9%以上,兼具经济性与绿色低碳优势,具备规模化推广潜力^[73]。

同样,在使用离子液体代替DMF在C5工厂异戊二烯/正戊烷分离中,筛选得到的[MPy][TFA]离子液体与工业中常用的DMF分离工艺相比,基于[MPy][TFA]的分离工艺在能源节约(69.8%)、环境可持续性(57.7%)和经济可行性(30.0%)方面均表现最佳,凸显出离子液体在异戊二烯与正戊烷分离领域可持续研究中的巨大潜力^[85]。

对于芳烃混合物,用[C₁mPy][BF₄]替代传统溶剂环丁砜进行芳烃抽提,通过Aspen Plus模拟发现,相比于环丁砜萃取精馏工艺,离子液体萃取精馏工艺单位芳烃能耗降低约34.8%,总年度成本降低约31.1%;针对乙苯/苯乙烯体系,相较于传统精馏分离,基于[mPy][CF₃SO₃]和[C₂Py][BF₄]的萃取精馏工艺在能耗、碳排放量方面具有很大优势,如图9所示,其能耗分别降低了44.2%和59.0%,碳排放量分别降低了28.9%和25.4%^[70]。在干气制乙苯的精馏过程中,以中国某炼油企业工业规模乙苯生产分离过

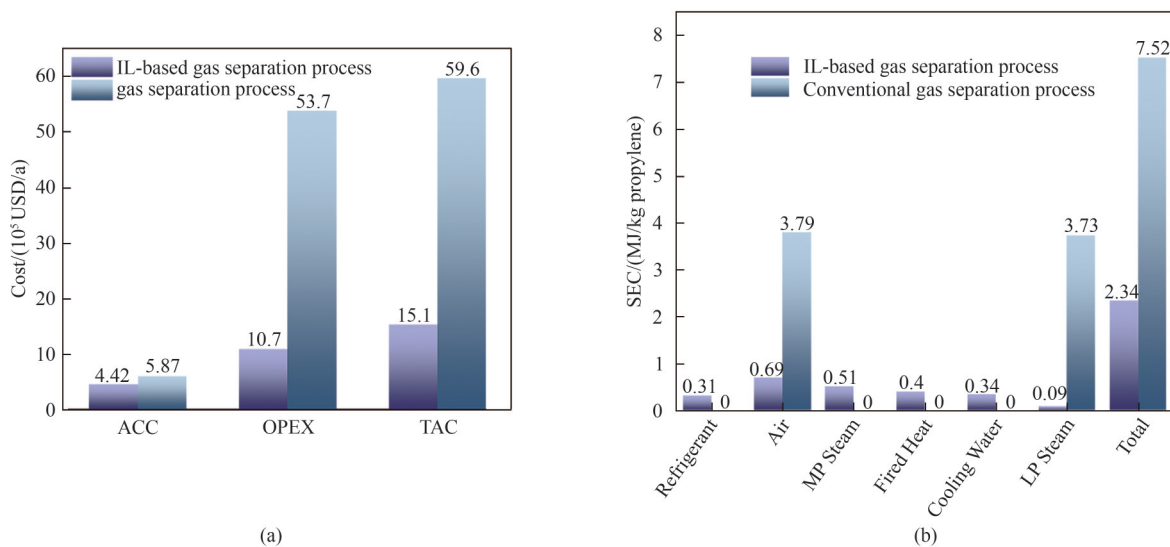


图8 离子液体萃取精馏分离和传统分离丙烯/丙烷工艺的能源和成本比较^[73]

Fig.8 Comparison of energy and cost between ionic liquid extractive distillation separation and traditional propylene/propane separation processes^[73]

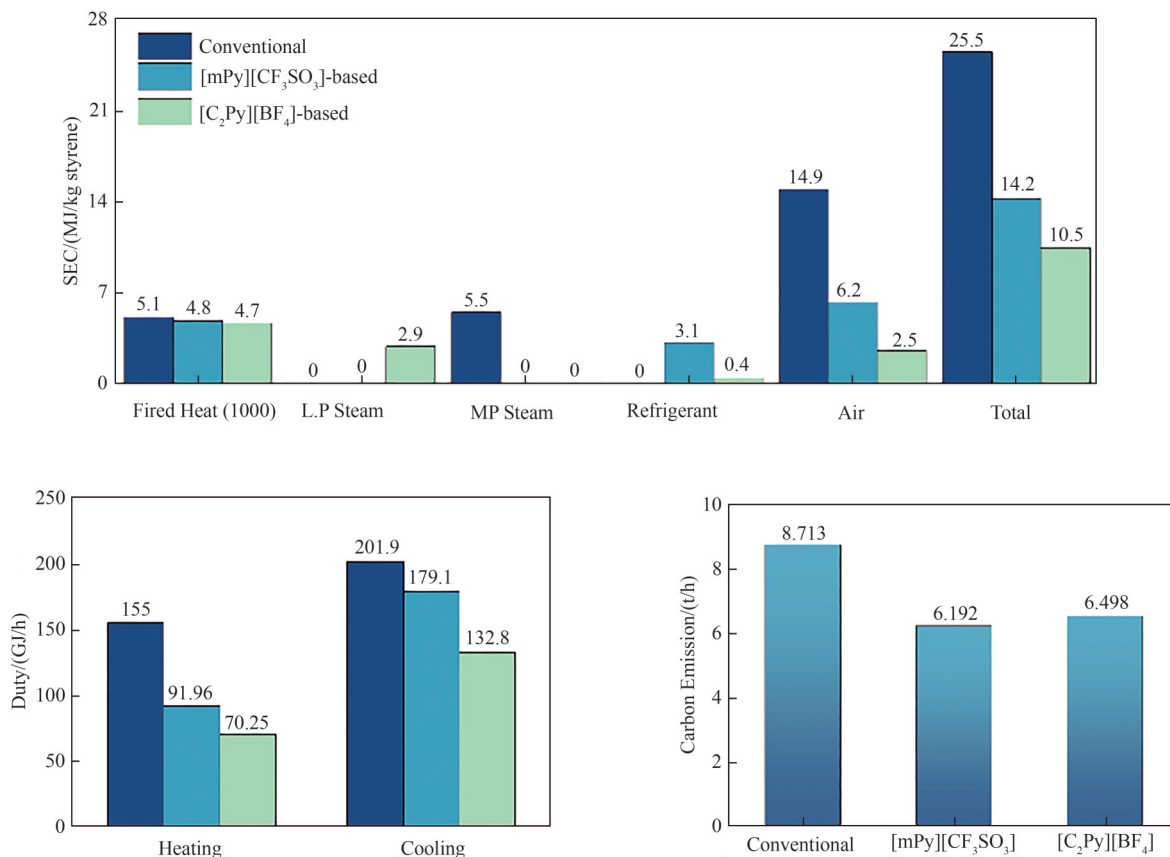


图9 离子液体萃取精馏分离和传统分离乙苯/苯乙烯工艺的能量和碳排放比较^[70]

Fig.9 Comparison of energy and carbon emissions between ionic liquid extractive distillation separation and traditional ethylbenzene/styrene separation processes^[70]

程为案例,与当前石化行业普遍采用的传统工艺相比,筛选得到的[C₂H₈N][TfO]分离工艺可实现40%的热能(热公用工程)节约和11%的成本降低,碳排放量减少40%,充分展现了其在干气制乙苯工艺中实现可持续运营的巨大潜力^[71]。

离子液体分离技术在石油化工领域虽展现出高效、绿色的潜力,但受限于材料特性、工艺成本及应用场景,仍存在显著局限性,主要体现在以下方面:(1)离子液体自身性质的制约。离子液体黏度较高导致其传质速率慢,部分离子液体在高温或强氧化、还原环境中易分解,限制了其应用;(2)成本较高。离子液体合成工艺复杂,价格昂贵,大规模应用时经济可行性低;(3)应用场景的局限性。离子液体对复杂体系的适应性差,往往难以同时处理多组分混合体系,且其工程化难度大,很难转化至工业规模;(4)环境和安全隐患。部分离子液体生物降解性差,具有潜在毒性,长期使用可能会危害健康和生态环境。

3.2 膜分离

膜分离是一种基于选择性透过膜实现混合物分离的物理过程,其核心原理是利用膜对不同物质的透过性差异,在外界驱动力作用下,使混合物中的某些组分优先透过膜,而其他组分被截留,从而达到分离、提纯或浓缩的目的^[86],包括微滤、纳滤、超滤、反渗透、电渗析、透析等分离技术^[87]。膜分离技术是一种现代化高新技术,具有分离效率高、能耗低、安全可控以及易于与其他工艺耦合等优点^[88-91]。

在烃类混合物分离中,新型金属有机框架(MOFs)膜通过分子尺寸筛分或选择性吸附实现烯烃/烷烃的高效分离^[92-93],MOF膜已实现对乙烯/乙烷^[94]、丙烯/丙烷^[95-97]、正丁烷/异丁烷^[98]、己烷异构体^[22,99-100]等典型同碳数烃体系的高效分离。沸石膜利用不同气体的表面吸附差异和膜内扩散差异以及沸石自身的分子筛分效应实现分离^[101],Liu等^[102]制备了MFI沸石膜用于二甲苯异构体[图10(a)],Sakai等^[103]制备了Ag-X沸石膜提升了丙烯/丙烷和乙烯/乙烷体系的分离选择性[图10(b)].渗透汽化

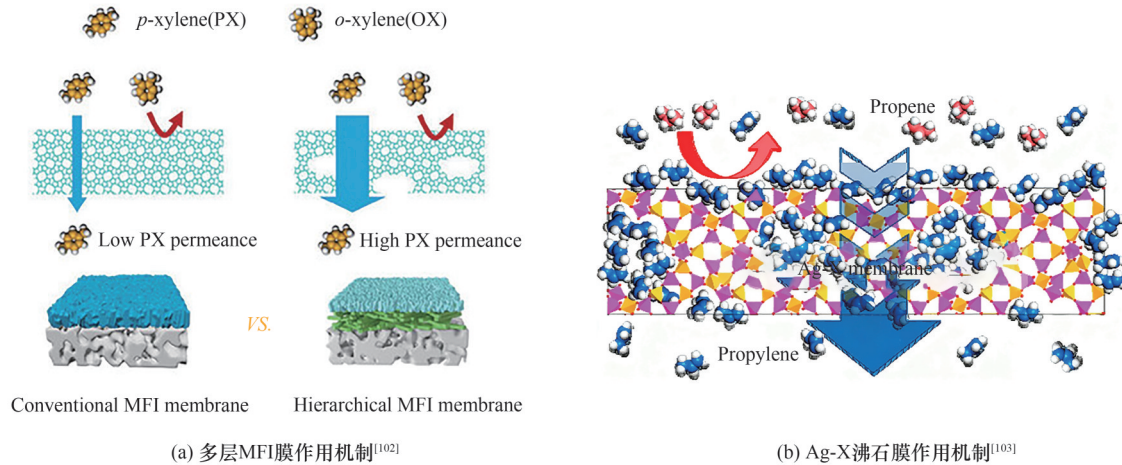


图10 不同膜分离体系作用机制

Fig.10 Mechanisms of action of different membrane separation systems

膜利用不同组分溶解和扩散速率的差异实现分离^[104],常用于极性/非极性^[105-106]、芳烃/脂肪烃^[107-108]、同分异构体^[109]的分离。超疏水-超亲油膜^[110-112]或超亲水-水下超疏油膜^[113-114]可以通过选择性渗透实现油相和水相的分离,联用超滤膜与纳滤膜能够使得出水可达到循环利用标准,降低新鲜水消耗。

石油化工中的原料气净化、尾气回收等场景也可利用膜分离技术。在甲醇合成、费托合成等过程中,可用钌合金膜对 H_2/CO 、 H_2/CH_4 进行分离,替代传统变压吸附技术^[115];在酸性气脱除过程中,采用聚酰亚胺复合膜^[116]或离子液体凝胶膜^[117],利用气体与膜材料的溶解度差异实现分离。此外,石油化工业使用大量的有机溶剂,通过膜分离技术可以对溶剂进行高效回收,降低危废处理成本^[118]。

膜分离技术虽凭借高效、低能耗等优势在多个领域广泛应用,但受限于膜材料性能、操作条件及分离体系特性,仍存在一些显著局限性,主要体现在以下方面:(1)耐候性不足。多数膜材料对极端环境的耐受性较差^[119],容易遭到破坏,导致分离性能下降;(2)成本较高。高性能膜材料的制备工艺复杂、成本高昂,且膜在污染严重的体系中更换周期短,使其长期运行成本超过传统分离技术;(3)对分离体系的适应性窄。如易结晶组分容易在膜表面结晶,堵塞孔道;高黏度混合物容易导致溶质在膜表面富集,导致膜通量骤降等;(4)抗污染能力弱。当分离体系中含有胶体、蛋白质、悬浮颗粒或有机物时,易在膜表面或孔道内发生吸附、沉积,导致孔道堵塞,需要频繁清洗或更换;(5)膜材料本身的制约。膜的选择性和渗透性往往存在此消彼长的关系,难以兼顾分离效率与速度^[120]。

3.3 吸附分离

在石油化工领域,吸附法凭借其高效性和低能耗成为难分离体系传统低温精馏的重要替代技术。其原理是基于吸附剂与不同组分间的作用力差异(物理吸附中的范德华力或化学吸附中的化学键合)^[121]或通过分子筛分效应(孔径与目标分子尺寸匹配实现选择性阻隔)实现分离,如图11所示^[122]。例如,4A和13X沸石对丙烷/丙烯的分离依赖于其微孔结构与分子间的相互作用,通过Monte Carlo模拟可计算吸附平衡等温线,Molecular Dynamics方法用于评估扩散动力学特性;而理想分子筛材料UTSA-200通过 3.4 \AA ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$)的精准孔径设计,可完全阻隔乙烯分子并高效吸附乙炔,IAST选择性高达6000以上^[122]。

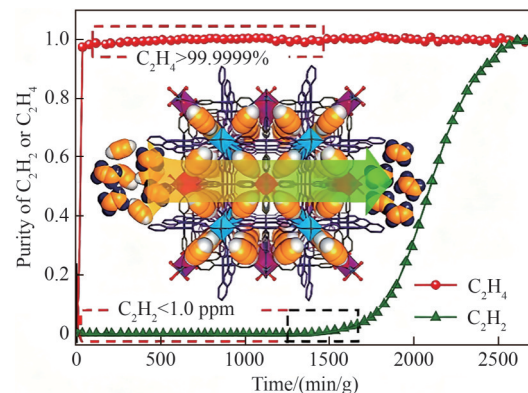


图11 分子筛分离 C_2H_4/C_2H_2 作用机制^[122]

Fig. 11 Mechanism of molecular sieve separation of C_2H_4/C_2H_2 ^[122]

吸附法在石油化工难分离体系中应用广泛:在轻烃分离中,13X沸石和蒸汽活化碳可通过低温吸附增强丙烷/丙烯、乙烷/乙烯的分离选择性,性能因子(选择性与负载差的乘积)显著提升^[123];在脱硫领

域,张连中等^[124]使用 HL-306 吸附剂在 55°C、5.0 atm 条件下对异戊二烯中硫化物的脱除率达 87.8% 以上,且不影响原料化学活性, Jin 等^[125]制备的金属有机框架材料 Cu-ZIF-8 对苯并噻吩具有很强的吸收率,且在苯、辛烷和水的环境中具有高稳定性。在 VOC 处理中,徐子栋等^[126]制备的超疏水活性炭对 VOCs 的吸附效率显著优于原活性炭,在潮湿的大气环境中和水中的去除效率均保持在较高水平(超 90%),且兼具经济和环保效益,已在扬子石化烯烃厂投入使用。

然而,吸附法仍存在局限性:部分吸附剂再生能耗高,如 K₂CO₃/碳气凝胶复合材料虽降低再生温度至 380°C,但循环稳定性不足^[127];寿命与成本问题,如碱金属碳酸盐基纳米复合材料的再生温度需 380 K 以上,而 HL 系列吸附剂经 5 次再生后脱硫效果明显下降^[124];吸附剂性能瓶颈,如水热稳定性差, MOFs 材料在湿润环境中易结构坍塌^[128]。这些问题限制了吸附法在大规模工业应用中的进一步推广。

3.4 其他分离技术

在石油化工难分离体系中,超临界流体分离技术依托超临界流体(SCF)的特殊性质实现高效分离。超临界流体是处于临界温度和压力以上的流体,具有液体的高溶解能力和气体的高扩散性、低黏度特性。其密度、溶解度等关键参数可通过调节温度和压力来精确调控,从而实现对不同物质的选择性分离^[129-130]。这种特性使其能高效渗透复杂基质,选择性溶解目标组分,尤其适用于传统蒸馏、溶剂萃取难以分离的高沸点、热敏性石油组分(如渣油、沥青质)。在实际应用中,该技术展现出显著优势:在渣油脱沥青中,采用超临界轻烃溶剂(如 C₃~C₅混合溶剂)处理重质渣油,能在较低温度下实现沥青质与脱沥青油(DAO)的高效分离,能耗比传统液态烃类溶剂工艺降低 60%,且所得 DAO 可作为优质加氢裂化原料,显著减少催化剂结焦^[131];在烃类分离与纯化中,某企业通过超临界乙烷萃取锭子油、粗柴油,分离效率高于传统液态溶剂萃取精馏工艺,同时利用超临界流体状态下的催化加氢工艺,还可进一步获得合成石油以及低含氮燃油^[132]。但其对极性极强或分子量过大的组分(如部分金属杂质)溶解能力有限,需添加共溶剂或螯合剂(如 L-组氨酸),将增加工艺复杂性^[133-134]。当前研究聚焦于耦合技术开发(如超临界流体+膜分离/精馏)以降低能耗,以及优化相平衡理论模型提升分离选择性^[135]。

分子印迹技术(MIT)通过对目标分子的特异性识别能力展现出独特优势。其原理是通过模板分子与功能单体、交联剂等特定条件下聚合,形成具有与模板分子空间结构和结合位点互补的印迹聚合物(MIPs),借助疏水作用、 π - π 相互作用、氢键、离子交换等机制实现对目标物的选择性识别与分离^[136-137]。该技术已在石油化工相关难分离体系中取得进展,如表面分子印迹聚合物修饰的 SMIP-COF@SiO₂ 材料可通过多种作用机制同时分离极性和非极性化合物,成功应用于烷基苯、多环芳烃(PAHs)等石油化工常见污染物的分离^[138];双模板分子印迹微球以萘和蒽为模板,对多环芳烃类物质的吸附量高于单模板体系,为石油化工中多组分难分离体系的分离提供了思路^[139];此外,分子印迹固相萃取(MISPE)结合气相色谱-质谱(GC-MS)技术,可实现石油化工废水中 16 种的高效分离与检测,检出限低至 0.001~375 ng/L^[140]。然而,该技术在石油化工难分离体系中仍存在局限性:一是模板分子泄漏(残留约 5%)会干扰痕量组分的准确分析,影响石油化工中痕量目标物的检测精度^[141];二是在水相体系中,水分子易与功能单体竞争氢键,导致 MIPs 的识别能力下降,而石油化工分离常涉及水相或极性溶剂环境,限制了其效能^[140];三是传统 MIPs 吸附容量偏低,难以满足石油化工大规模分离的需求,且部分制备过程使用有害溶剂,与绿色化工理念不符^[142-143]。

上述新型分离技术的对比见表 2。尽管新型分离技术在传统技术的基础上能耗和分离效果以及环境影响都有所改善,但是由于新型分离技术成本、技术成熟度、安全性等问题,距离全面工业化尚有一定的差距。

表 2 不同新型分离技术的对比

Table 2 Comparison of different new separation technologies

分离技术	能耗	环境影响	优点	缺点
离子液体	中	中	分离效果好	成本高,工业化难
膜分离	低	小	分离效率高,能耗低	成本高,适用范围窄
吸附分离	低	小	选择性高,低能耗	吸附剂再生成本高
超临界萃取	高	小	绿色环保,分离效率高	成本高,操作严格

4 分离技术的展望

石油化工领域的分离技术正朝着高效化、低能

耗、智能化和绿色化的方向发展。将两种或多种不同原理的分离技术通过协同设计整合为一个高效系统,能够整合不同技术的优势、简化流程、提高收率,又能降低能耗与成本,成为提升分离效率的核心发展方向^[144]。这种“1+1>2”的策略在石油化工等领域应用广泛,其核心在于通过技术间的优势互补,解决单一技术难以应对的分离难题。目前石油化工中典型的分离技术耦合方式有精馏与萃取耦合、膜分离与精馏耦合、吸附与精馏耦合、萃取与膜分离耦合等。

具体应用中,精馏-膜耦合技术表现优异。例如,乙烯/乙烷体系因挥发度接近,普通精馏分离难度大,采用精馏-膜耦合系统后,原料经精馏塔得到接近共沸浓度的混合蒸气,再通过膜组件分离,渗透气与剩余气分别回流至精馏塔特定塔板,最终实现高效分离^[145]。Xu等^[146]提出使用萃取精馏-渗透汽化膜分离实现异丙醇-二异丙醚-水三元物系的分离,通过对比常规萃取精馏流程发现,耦合分离流程在经济、能耗以及生物毒性等各方面表现均最佳。Jiao等^[147]针对乙基叔丁基醚的精制流程开发了萃取-精馏、萃取-变压精馏和萃取精馏-膜分离工艺,其中萃取精馏-膜分离集成工艺在经济、气体排放和能耗均优于其他流程。此外,蒸馏-渗透蒸发单元通过内置膜段,无须引入额外组分即可打破蒸馏边界,使顶部乙醇和异丙醇浓度较传统蒸馏分别提高38%和32%^[148]。

吸附-精馏耦合技术在共沸物分离中成效显著。以异丙醇-水共沸物分离为例,生物质固定床吸附-精馏耦合流程通过“精馏Ⅰ-吸附-精馏Ⅱ”三步,先经精馏Ⅰ得到接近共沸浓度的蒸气,再用淀粉质吸附剂ZSG-1突破共沸点,最后经精馏Ⅱ获得高纯度异丙醇,能耗仅为8.4 MJ/kg,较现有共沸精馏流程降低50%^[149]。此类技术集成了吸附的高选择性与精馏的规模化处理能力,有效解决了单一技术分离效率低、能耗高的问题。

反应-分离耦合技术则通过将反应与分离过程协同进行,实现效能突破。针对水/甲醇/四氢呋喃共沸物,反应-萃取精馏(RED)工艺通过在第一塔引入环氧乙烷与水反应生成乙二醇(副产品),实现水与共沸物的分离,其中新设计较传统工艺总资本成本更低、CO₂排放更少,且乙二醇副产品可产生显著收益^[150]。随着各类环保政策的出台,对石油化工生产过程中的污染物排放要求越来越严格。未来

的分离技术将更加注重开发绿色环保的分离剂和工艺,减少对环境的影响,开发无毒、可生物降解的绿色萃取剂,优化分离工艺,提高资源利用率,实现废弃物的最小化排放。

智能化也是分离技术发展的重要方向。随着传感器技术、大数据和人工智能的发展,分离过程将朝智能化和自动化迈进,通过传感器实时监测分离过程中的各种参数,如温度、压力、流量、浓度等,并将数据传输到控制系统。控制系统利用人工智能算法对数据进行分析和处理,自动调整操作参数,实现分离过程的优化。还可以利用机器学习算法建立分离过程的预测模型,提前预测分离效果和故障,及时采取措施进行调整和维护,提高生产效率和产品质量。

5 结 语

本文针对石油化工难分离体系,明确了其难分离机理。在传统分离技术方面,对精馏、萃取和结晶等技术的原理、工艺、应用案例及局限性进行了阐述。精馏技术应用广泛,但在处理难分离体系时存在能耗高、分离效率低等问题;萃取技术面临溶剂选择困难、回收复杂、易产生二次污染以及分离效率受多种因素影响的局限。

针对传统分离技术的不足,众多新型分离技术应运而生,如离子液体分离、膜分离、吸附分离技术等,离子液体分离技术虽展现出高效、绿色的潜力,但受限于材料特性、成本高昂;膜分离技术具有高效分离、节能降耗、操作条件温和等优势,但面临膜污染、膜材料成本高、稳定性和寿命有限等挑战;吸附技术则存在吸附材料选择难度大、吸附容量有限、选择性不高以及吸附剂再生困难等问题。

未来需加强跨学科研究,综合运用化学工程、物理化学、材料科学、生物工程、人工智能等多学科的知识和方法,深入研究难分离体系的本质特征和分离机理,推动分离技术的创新和发展。

参考文献

- [1] Corma A, Corresa E, Mathieu Y, et al. Crude oil to chemicals: light olefins from crude oil[J]. *Catalysis Science & Technology*, 2017, 7(1): 12-46.
- [2] Sadrameli S M. Thermal/catalytic cracking of liquid hydrocarbons for the production of olefins: a state-of-the-art review (II): Catalytic cracking review[J]. *Fuel*, 2016, 173: 285-297.
- [3] Griffiths S, Sovacool B K, Kim J, et al. Decarbonizing the oil

- refining industry: a systematic review of sociotechnical systems, technological innovations, and policy options[J]. *Energy Research & Social Science*, 2022, **89**: 102542.
- [4] 李明丰, 李延军, 吴昊. 中国石化企业低碳发展路径探索与实践[J]. *石油学报(石油加工)*, 2025, **41**(5): 1161–1168.
Li M F, Li Y J, Wu H. Exploration and practice of low-carbon development pathway of China's petrochemical enterprises[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2025, **41**(5): 1161–1168.
- [5] 罗伊雯, 赵亮, 张宇豪, 等. 轻烃分离材料和机理的研究进展[J]. *化工进展*, 2025, **44**(5): 2938–2954.
Luo Y W, Zhao L, Zhang Y H, et al. Progress on separation materials and mechanisms of light hydrocarbons[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, **44**(5): 2938–2954.
- [6] Chen Y W, Tu S, Fu P, et al. A cobalt-based metal-organic framework for efficient separation of propene from propane *via* electrostatic effect[J]. *AIChE Journal*, 2022, **68**(8): e17730.
- [7] 蔡艾梓, 董海峰, 任梦雨, 等. 离子液体强化丙烯/丙烷分离的研究进展[J]. *科学通报*, 2025, **70**(26): 4488–4500.
Cai A Z, Dong H F, Ren M Y, et al. Reviews on propylene/propane separation by using ionic liquids materials[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2025, **70**(26): 4488–4500.
- [8] Wang Y X, Peh S B, Zhao D. Alternatives to cryogenic distillation: advanced porous materials in adsorptive light olefin/paraffin separations[J]. *Small*, 2019, **15**(25): 1900058.
- [9] Xie Y, Shi Y S, Cedeño Morales E M, et al. Optimal binding affinity for sieving separation of propylene from propane in an oxyfluoride anion-based metal-organic framework[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, **145**(4): 2386–2394.
- [10] Yang L F, Qian S H, Wang X B, et al. Energy-efficient separation alternatives: metal-organic frameworks and membranes for hydrocarbon separation[J]. *Chemical Society Reviews*, 2020, **49**(15): 5359–5406.
- [11] 朱炜, 李庆, 豆琳琳, 等. 正己烷+1-丁基-3-甲基咪唑硫酸盐的分子动力学[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2020, **33**(2): 93–99.
Zhu W, Li Q, Dou L L, et al. Molecular dynamics of *n*-hexane+1-butyl-3-methylimidazolium thiocyanate binary system[J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2020, **33**(2): 93–99.
- [12] 莫凯, 问菲, 金花, 等. ZIF-8 膜分离丙烯/丙烷的研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2020, **40**(2): 136–145.
Mo K, Wen F, Jin H, et al. Recent advances in ZIF-8 membrane for efficient separation of propylene/propane[J]. *Membrane Science and Technology*, 2020, **40**(2): 136–145.
- [13] 张延鹏, 张胜中, 王红涛, 等. 丙烯/丙烷吸附分离材料研究进展[J]. *精细化工*, 2020, **37**(7): 1327–1333.
Zhang Y P, Zhang S Z, Wang H T, et al. Research process of adsorption-separation materials for propylene/propane separation[J]. *Fine Chemicals*, 2020, **37**(7): 1327–1333.
- [14] Cong S Z, Feng X Q, Guo L L, et al. Rational design of mixed matrix membranes modulated by trisilver complex for efficient propylene/propane separation[J]. *Advanced Science*, 2023, **10**(10): 2206858.
- [15] Yang L F, Cui X L, Yang Q W, et al. A single-molecule propyne trap: highly efficient removal of propyne from propylene with anion-pillared ultramicroporous materials[J]. *Advanced Materials*, 2018, **30**(10): 1705374.
- [16] Li L B, Wen H M, He C H, et al. A metal-organic framework with suitable pore size and specific functional sites for the removal of trace propyne from propylene[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, **57**(46): 15183–15188.
- [17] Bloch E D, Queen W L, Krishna R, et al. Hydrocarbon separations in a metal-organic framework with open iron(II) coordination sites[J]. *Science*, 2012, **335**(6076): 1606–1610.
- [18] Li L B, Lin R B, Krishna R, et al. Flexible-robust metal-organic framework for efficient removal of propyne from propylene[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, **139**(23): 7733–7736.
- [19] Wang J, Zhang Y, Zhang P X, et al. Optimizing pore space for flexible-robust metal-organic framework to boost trace acetylene removal[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, **142**(21): 9744–9751.
- [20] Liu J X, Zhu S J, Zhang L, et al. Study on characterization and coke compositions of deactivated 5A molecular sieve for adsorption separation of industrial naphtha[J]. *ChemistrySelect*, 2020, **5**(42): 12844–12852.
- [21] Peralta D, Chaplais G, Simon-Masseron A, et al. Separation of C₆ paraffins using zeolitic imidazolate frameworks: comparison with zeolite 5A[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, **51**(12): 4692–4702.
- [22] 王宇轩, 花敬贤, 潘宜昌, 等. 两步干凝胶转化法制备 UiO-66 膜并用于己烷异构体的高效分离[J]. *石油炼制与化工*, 2024, **55**(1): 112–121.
Wang Y X, Hua J X, Pan Y C, et al. Fabrication of UiO-66 membrane by two-step dry gel conversion for efficient separation of hexane isomer[J]. *Petroleum Processing and Petrochemicals*, 2024, **55**(1): 112–121.
- [23] 张亚明, 徐荣, 黄维秋, 等. UiO-66 膜的制备及其对正/异丁烷体系的分离[J]. *精细化工*, 2019, **36**(1): 25–30.
Zhang Y M, Xu R, Huang W Q, et al. Fabrication of UiO-66 membrane for the separation of *n*-butane/*i*-butane[J]. *Fine Chemicals*, 2019, **36**(1): 25–30.
- [24] Sun Y W, Yan J H, Jiang J, et al. Hierarchical defect-rich UiO-66 membrane towards superior flue gas and butane isomer separations[J]. *Science Bulletin*, 2024, **69**(14): 2174–2178.
- [25] Lotkhov V A, Kvashnin S Y, Kulov N N. Effect of separating agent in extractive distillation[J]. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, **54**(1): 172–177.
- [26] Perkar T, Choksi N, Modi C, et al. Simulation studies of *n*-heptane/toluene separation by extractive distillation using sulfolane, phenol, and NMP[J]. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 2021, **19**(8): 829–837.
- [27] 赵闯, 陈自浩, 张博宇, 等. 分子筛吸附剂对不同类型柴油吸附分离性能的研究[J]. *无机盐工业*, 2024, **56**(3): 80–85.
Zhao C, Chen Z H, Zhang B Y, et al. Study on adsorption and separation performance of molecular sieve adsorbents for different types of diesel[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2024, **56**(3): 80–85.
- [28] Sapanik A A, Kovalenko K A, Samsonenko D G, et al. Exceptionally effective benzene/cyclohexane separation using a nitro-decorated metal-organic framework[J]. *Chemical Communications*, 2020, **56**(59): 8241–8244.
- [29] 叶宏, 李继定, 林阳政, 等. 聚氨酯酯和聚氨酯酰胺膜的制备与渗透汽化芳烃/烷烃分离性能研究[J]. *膜科学与技术*, 2009, **29**(2): 40–46.

- Ye H, Li J D, Lin Y Z, et al. Preparation of polyurethaneurea and polyurethaneimide membranes and their pervaporation performances to aromatic/aliphatic hydrocarbon mixtures[J]. Membrane Science and Technology, 2009, **29**(2): 40–46.
- [30] 俞健. 基于碳吸附剂的油品芳烃/非芳烃吸附分离研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024.
- Yu J. Absorptive separation of aromatic and non-aromatic hydrocarbons in fossil fuels using carbon materials[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.
- [31] Wu X C, Wei W, Jiang J W, et al. High-flux high-selectivity metal-organic framework MIL-160 membrane for xylene isomer separation by pervaporation[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2018, **57**(47): 15354–15358.
- [32] 张瑞琪, 姜斌, 任海伦, 等. 环丁砜萃取精馏提纯连三甲苯的实验和模拟[J]. 化工进展, 2016, **35**(11): 3465–3469.
- Zhang R Q, Jiang B, Ren H L, et al. Experiment and simulation on the purification of 1, 2, 3-trimethylbenzene by extractive distillation with sulfolane[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, **35**(11): 3465–3469.
- [33] 何燎, 李俊, 高梦舒, 等. 石油馏中芳烃分离技术研究进展[J]. 化工学报, 2025, **76**(5): 1909–1926.
- He L, Li J, Gao M S, et al. Research progress on aromatic hydrocarbons separation from petroleum hydrocarbons[J]. CIESC Journal, 2025, **76**(5): 1909–1926.
- [34] 赵东东, 余波, 黎春霖, 等. 活性炭吸附预处理对真油加氢脱硫脱氮的影响[J]. 有色金属设计, 2019, **46**(1): 78–81.
- Zhao D D, Yu B, Li C L, et al. Effect of adsorption pretreatment by activated carbon on hydro-desulfurization and hydro-denitrogenation of real oil[J]. Nonferrous Metals Design, 2019, **46**(1): 78–81.
- [35] 李丽娜. 燃料油加氢精制催化剂载体的研究进展[J]. 精细石油化工进展, 2022, **23**(4): 27–32, 58.
- Li L N. Research progress on catalyst supports for fuel oil hydrotreating[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2022, **23**(4): 27–32, 58.
- [36] 林赛燕, 刘丹, 王红, 等. 酸性离子液体萃取脱除焦化柴油中碱性氮化物[J]. 石油化工高等学校学报, 2012, **25**(1): 8–12.
- Lin S Y, Liu D, Wang H, et al. Removing basic nitrogen compounds from coker diesel by extraction with acidic ionic liquid [J]. Journal of Petrochemical Universities, 2012, **25**(1): 8–12.
- [37] 舒展. 超临界流体萃取油品的工艺研究进展[J]. 广东化工, 2019, **46**(5): 144–145.
- Shu Z. Research progress on supercritical fluid extraction technology of petroleum products[J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, **46**(5): 144–145.
- [38] 韦存福, 王伦, 杨燕. 超临界流体萃取分馏法分离石油重质油的应用研究[J]. 化工设计通讯, 2020, **46**(6): 46, 68.
- Wei C F, Wang L, Yang Y. Study on the application of supercritical fluid extraction and fractionation in the separation of heavy oil[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2020, **46**(6): 46, 68.
- [39] 杨光, 陈松, 刘旭丹, 等. 超临界流体萃取技术在重油加工领域的应用进展[J]. 化学工程师, 2017, **31**(6): 54–57.
- Yang G, Chen S, Liu X D, et al. Application of supercritical fluid extraction technology in the field of heavy oil processing[J]. Chemical Engineer, 2017, **31**(6): 54–57.
- [40] Leo M, Dutta A, Farooq S. Process synthesis and optimization of heat pump assisted distillation for ethylene-ethane separation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2018, **57**(34): 11747–11756.
- [41] 王远航. 催化裂解分离流程模拟与优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- Wang Y H. Simulation and optimization of catalytic cracking separation process[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [42] Li X G, Cui C T, Li H, et al. Process synthesis and simulation-based optimization of ethylbenzene/styrene separation using double-effect heat integration and self-heat recuperation technology: a techno-economic analysis[J]. Separation and Purification Technology, 2019, **228**: 115760.
- [43] Qiu X M, Shen Y Y, Hou Z K, et al. Mechanism analysis of solvent selectivity and energy-saving optimization in vapor recompression-assisted extractive distillation for separation of binary azeotrope[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2022, **46**: 271–279.
- [44] Zhang H R, Zhao F, Ma Z Y, et al. Design and optimization for the separation of cyclohexane-isopropanol-water using mixed extractants with thermal integration based on molecular mechanism[J]. Separation and Purification Technology, 2021, **266**: 118541.
- [45] Lyu H, Hu Y X, Zhou T. Dimethyl carbonate/methanol separation by azeotropic distillation with water: an alternative process driven by low-pressure steam[J]. Separation and Purification Technology, 2025, **355**: 129677.
- [46] Zhang F K, Sun D F, Li Y N, et al. Heat integration and dynamic control for separating the ternary azeotrope of butanone/isopropanol/*n*-heptane via pressure-swing distillation[J]. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2022, **170**: 108657.
- [47] Liu X J, Xu Q L, Ma C C, et al. Design and multi-objective optimization of reactive pressure-swing distillation process for separating tetrahydrofuran-methanol-water[J]. Separation and Purification Technology, 2024, **329**: 125160.
- [48] Salman M, Javed N, Liu X Y, et al. Azeotrope separation of ethyl propionate and ethanol by extractive distillation and pressure swing distillation method[J]. Separation and Purification Technology, 2023, **311**: 123361.
- [49] 李欣宇. 含氮杂环类功能化溶剂萃取分离柴油中芳烃/烷烃的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.
- Li X Y. Extraction separation of aromatics/alkanes from diesel fuel by nitrogen-containing heterocyclic functionalized solvents [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2023.
- [50] Liu Q H, Li G X, Gui C M, et al. Solvents evaluation for extraction of polycyclic aromatics from FCC diesel: experimental and computational thermodynamics[J]. Chemical Engineering Science, 2022, **264**: 118205.
- [51] Li H, Guo J J, Zhang Y H, et al. Research on separation of aromatics from FCC diesel using organic solvent: a combination of experiments and quantum chemical calculations[J]. Fuel, 2022, **308**: 121982.
- [52] Li H, Guo J J, Zhang Y H, et al. Influence of solvent structure on the extraction of aromatics from FCC diesel and computational thermodynamics study[J]. Fuel Processing Technology, 2021, **224**: 107021.
- [53] Zhou N X, Wang F T, Huang Z B, et al. Molecular-level insights

- into extractant selection for aromatic-saturate separation in FCC slurry oil[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2025, **435**: 128093.
- [54] Yan J L, Li X N, Meng M M, et al. Mechanistic investigation of isobutanol/isobutyl acetate separation by extraction using low-transition temperature mixtures[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, **62**(33): 13223-13234.
- [55] Dong S L, Sun X Y, Wang L L, et al. Prediction, application, and mechanism exploration of liquid-liquid equilibrium data in the extraction of aromatics using sulfolane[J]. *Processes*, 2023, **11**(4): 1228.
- [56] 张琳娜, 李冬, 朱永红, 等. 煤基石脑油萃取脱芳制备溶剂油工艺研究[J]. *精细化工*, 2016, **33**(6): 703-708.
Zhang L N, Li D, Zhu Y H, et al. Study on the liquid-liquid extraction aromatic process for the coal-derived naphtha to produce solvent oil[J]. *Fine Chemicals*, 2016, **33**(6): 703-708.
- [57] 薛凤凤, 李冬, 张琳娜, 等. 煤基石脑油萃取脱芳复合萃取剂[J]. *化工进展*, 2017, **36**(8): 2897-2902.
Xue F F, Li D, Zhang L N, et al. Composite extractant of liquid-liquid extraction aromatics for the coal-derived naphtha[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2017, **36**(8): 2897-2902.
- [58] 冯弦, 李冬, 张琳娜, 等. 煤基石脑油芳烃抽提的实验与模拟[J]. *化学工程*, 2017, **45**(11): 23-28.
Feng X, Li D, Zhang L N, et al. Experiment and simulation of coal-based naphtha aromatics extraction[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2017, **45**(11): 23-28.
- [59] 杨勇, 张钊, 王东亮, 等. 二甲苯异构体不同分离策略的技术经济评价[J]. *化工进展*, 2025, **44**(8): 4732-4740.
Yang Y, Zhang Z, Wang D L, et al. Technical-economic evaluation for different separation strategies of xylene isomers[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2025, **44**(8): 4732-4740.
- [60] Anderson K, Atkins M P, Estager J, et al. Carbon dioxide uptake from natural gas by binary ionic liquid-water mixtures[J]. *Green Chemistry*, 2015, **17**(8): 4340-4354.
- [61] Lei Z G, Dai C N, Zhu J Q, et al. Extractive distillation with ionic liquids: a review[J]. *AIChE Journal*, 2014, **60**(9): 3312-3329.
- [62] Lei Z G, Dai C N, Chen B H. Gas solubility in ionic liquids[J]. *Chemical Reviews*, 2014, **114**(2): 1289-1326.
- [63] Li G X, Chen K, Lei Z G, et al. Condensable gases capture with ionic liquids[J]. *Chemical Reviews*, 2023, **123**(16): 10258-10301.
- [64] Siami H, Razmkhah M, Moosavi F. Does side chain group of anion affect absorption of SO₂ in amino acid ionic liquid? [J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2023, **376**: 121479.
- [65] 黄少轩, 李安, 赵佳豪, 等. 离子液体吸收法碳捕集系统的热力学分析[J]. *热科学与技术*, 2025, **24**(3): 249-260.
Huang S X, Li A, Zhao J H, et al. Thermodynamic analysis of carbon capture system based on ionic liquid absorption[J]. *Journal of Thermal Science and Technology*, 2025, **24**(3): 249-260.
- [66] Zhang X C, Jiang K, Liu Z P, et al. Insight into the performance of acid gas in ionic liquids by molecular simulation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2019, **58**(3): 1443-1453.
- [67] 刘茹飞, 刘涛, 姚远, 等. 离子液体用于燃烧后二氧化碳捕集的热力学及过程模拟研究[J]. *环境工程*, 2023, **41**(S2): 451-459.
Liu R F, Liu T, Yao Y, et al. Thermodynamic and process simulation of ionic liquids for carbon dioxide capture after combustion[J]. *Environmental Engineering*, 2023, **41**(S2): 451-459.
- [68] Lei Y, Zhou Y H, Wei Z Q, et al. Optimal design of an ionic liquid (IL)-based aromatic extractive distillation process involving energy and economic evaluation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, **60**(9): 3605-3616.
- [69] Yu G Q, Dai C N, Gao H, et al. Capturing condensable gases with ionic liquids[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, **57**(36): 12202-12214.
- [70] Lei Y, Yan J Q, Chen Y M, et al. Energy-efficient styrene production by incorporating ionic liquid-based separation technology[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2025, **48**(4): e70008.
- [71] Lei Y, Yu Z Y, Wei Z Q, et al. Structure optimization of task-specific ionic liquids targeting low-carbon-emission ethylbenzene production[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, **308**: 122827.
- [72] Yang K, Ban Y J, Yang W S. Layered MOF membranes modified with ionic liquid/AgBF₄ composite for olefin/paraffin separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2021, **639**: 119771.
- [73] Lei Y, Yu Z Y, Wei Z Q, et al. Energy-efficient separation of propylene/propane by introducing a tailor-made ionic liquid solvent[J]. *Fuel*, 2022, **326**: 124930.
- [74] Ayuso M, Palma A M, Larriba M, et al. Experimental and CPA EoS description of the key components in the BTX separation from gasolines by extractive distillation with tricyanomethanide-based ionic liquids[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, **59**(33): 15058-15068.
- [75] Ayuso M, Navarro P, Moya C, et al. Extractive distillation with ionic liquids to separate benzene, toluene, and xylene from pyrolysis gasoline: process design and techno-economic comparison with the morphylane process[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2022, **61**(6): 2511-2523.
- [76] Guo C, Luo K, Hou W, et al. A novel [MMIM]-based ionic liquid extractive distillation process for achieving liquid-phase propylene at 1.8 MPa with enhanced energy-economic-environmental benefits [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2025, **525**: 146579.
- [77] Shang Z J, Liu Y P, Shang W Z, et al. Green separation pathway for hydrocarbon compounds: ionic liquid extraction technology[J]. *Separation and Purification Technology*, 2025, **362**: 131858.
- [78] Li G X, Gao Q H, Liu Q H, et al. Extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from fluid catalytic cracking diesel with ionic liquids [J]. *AIChE Journal*, 2023, **69**(2): e17914.
- [79] Zhao X, Xing H B, Yang Q W, et al. Differential solubility of ethylene and acetylene in room-temperature ionic liquids: a theoretical study[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2012, **116**(13): 3944-3953.
- [80] Arenas-Fernández P, Suárez I, Coto B. Liquid-liquid extraction of polyaromatic compounds with ionic liquid. A theoretical and experimental approach[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, **303**: 122160.
- [81] 惠燕华, 王辉, 刘福胜, 等. 三乙烯二胺类离子液体的合成及其用于脱除非碱性氮[J]. *石油化工*, 2021, **50**(2): 123-129.
Hui Y H, Wang H, Liu F S, et al. Synthesis of triethylenediamine ionic liquids and their use in removing non-basic nitrogen[J]. *Petrochemical Technology*, 2021, **50**(2): 123-129.
- [82] 蒋斯麒, 胡玉峰, 程永强, 等. 离子液体萃取分离FCC柴油中双环芳香性硫氮组分: 实验和分子机理[J]. *化工学报*, 2024, **75**

- (10): 3651–3659.
- Jiang S Q, Hu Y F, Cheng Y Q, et al. Extraction of bicyclic S/N-compounds from FCC diesel with ionic liquid: experimental and molecular insight[J]. *CIESC Journal*, 2024, **75**(10): 3651–3659.
- [83] 李斯文, 雷敏, 刘玉霜, 等. 离子液体多酸在燃油氧化脱硫中的研究进展[J]. *化工进展*, 2024, **43**(6): 3322–3335.
- Li S W, Lei M, Liu Y S, et al. Research progress of ionic liquid polyacid in fuel oxidation desulfurization[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2024, **43**(6): 3322–3335.
- [84] Lei Y, Pan W Y, Hu S B, et al. Ionic liquid-assisted extractive distillation for ethylene/ethane separation: molecular design and process assessment[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2024, **63**(44): 19187–19199.
- [85] Lei Y, Guo Z Q, Du L, et al. Replacing DMF with ionic liquid in isoprene/*n*-pentane separation in C₅ plants: solvent design, process optimization, and industrial-scale assessment[J]. *Fuel*, 2024, **357**: 130006.
- [86] 杨乘宇. 基于新型聚酰亚胺的超滤膜与纳滤膜制备及性能研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
- Yang C Y. Research on preparation and performance of ultrafiltration membrane and nanofiltration membrane based on novel polyimide[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021.
- [87] Pendergast M M, Hoek E M V. A review of water treatment membrane nanotechnologies[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, **4**(6): 1946–1971.
- [88] Li B F, Qi B, Guo Z Y, et al. Recent developments in the application of membrane separation technology and its challenges in oil-water separation: a review[J]. *Chemosphere*, 2023, **327**: 138528.
- [89] 马云, 查辉, 田伟, 等. 膜分离技术在油气田采出水处理中的应用现状与发展趋势[J]. *水处理技术*, 2025, **51**(8): 8–14, 22.
- Ma Y, Zha H, Tian W, et al. Application and development of membrane separation technology in treating produced water from oil and gas field[J]. *Technology of Water Treatment*, 2025, **51**(8): 8–14, 22.
- [90] Sholl D S, Lively R P. Seven chemical separations to change the world[J]. *Nature*, 2016, **532**(7600): 435–437.
- [91] 潘宜昌, 周荣飞, 邢卫红. 高效分离同碳数烃的先进微孔膜: 现状与挑战[J]. *化工进展*, 2023, **42**(8): 3926–3942.
- Pan Y C, Zhou R F, Xing W H. Advanced microporous membranes for efficient separation of same-carbon-number hydrocarbon mixtures: state-of-the-art and challenges[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, **42**(8): 3926–3942.
- [92] Knebel A, Caro J. Metal-organic frameworks and covalent organic frameworks as disruptive membrane materials for energy-efficient gas separation[J]. *Nature Nanotechnology*, 2022, **17**(9): 911–923.
- [93] Chen G N, Chen C L, Guo Y N, et al. Solid-solvent processing of ultrathin, highly loaded mixed-matrix membrane for gas separation[J]. *Science*, 2023, **381**(6664): 1350–1356.
- [94] 花敬贤, 罗宇荣, 顾亚伟, 等. 超薄取向 ZIF-8 膜的制备及乙烯/乙烷高效分离[J]. *化工学报*, 2025, **76**(5): 2209–2218.
- Hua J X, Luo Y R, Gu Y W, et al. Preparation of ultra-thin oriented ZIF-8 membrane for efficient ethylene/ethane separation [J]. *CIESC Journal*, 2025, **76**(5): 2209–2218.
- [95] Pan Y C, Li T, Lestari G, et al. Effective separation of propylene/propane binary mixtures by ZIF-8 membranes[J]. *Journal of Membrane Science*, 2012, **390/391**: 93–98.
- [96] Zhou S, Shekha O, Jia J T, et al. Electrochemical synthesis of continuous metal-organic framework membranes for separation of hydrocarbons[J]. *Nature Energy*, 2021, **6**(9): 882–891.
- [97] Zhang Z N, Zhu H, Jin H, et al. Restricting linker rotation in nanocages of ZIF-8 membranes using crown ether “molecular locks” for enhanced propylene/propane separation[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2025, **64**(3): e202415023.
- [98] 于子钧. 高性能 MOF 混合基质膜的制备及其分离性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2024.
- Yu Z J. Preparation and separation performance study of high performance MOF-based mixed matrix membranes[D]. Tianjin: Tianjin: Tiangong University, 2024.
- [99] Yang W H, Yang X, Wang Y X, et al. Pervaporation separation of C₆ alkane isomers by Al-btob membrane[J]. *Journal of Membrane Science*, 2022, **661**: 120916.
- [100] Wang Y C, Ban Y J, Hu Z Y, et al. Energy-efficient extraction of linear alkanes from various isomers using structured metal-organic framework membrane[J]. *Nature Communications*, 2023, **14**: 6617.
- [101] Kosinov N, Gascon J, Kapteijn F, et al. Recent developments in zeolite membranes for gas separation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2016, **499**: 65–79.
- [102] Liu M L, Ge Y Y, Du J H, et al. Hierarchical MFI zeolite membranes for superior xylene separation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, **34**(34): 2400772.
- [103] Sakai M, Sasaki Y, Tomono T, et al. Olefin selective Ag-exchanged X-type zeolite membrane for propylene/propane and ethylene/ethane separation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, **11**(4): 4145–4151.
- [104] 李明, 吴红丹, 周志辉. 渗透气膜分离混合有机溶剂研究进展[J]. *现代化工*, 2021, **41**(4): 43–47.
- Li M, Wu H D, Zhou Z H. Research progress on separation of organic solvent mixtures by pervaporation membrane[J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, **41**(4): 43–47.
- [105] Han G L, Chen Z, Cai L F, et al. Post-synthetic MIL-53(Al)-SO₃H incorporated sulfonated polyarylethersulfone with cardo (SPES-C) membranes for separating methanol and methyl tert-butyl ether mixture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, **220**: 268–275.
- [106] Castro-Muñoz R, Galiano F, de la Iglesia Ó, et al. Graphene oxide-filled polyimide membranes in pervaporative separation of azeotropic methanol-MTBE mixtures[J]. *Separation and Purification Technology*, 2019, **224**: 265–272.
- [107] Wu T, Wang N X, Li J, et al. Tubular thermal crosslinked-PEBA/ceramic membrane for aromatic/aliphatic pervaporation[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, **486**: 1–9.
- [108] Zhang Y, Wang N X, Ji S L, et al. Metal-organic framework/poly(vinyl alcohol) nanohybrid membrane for the pervaporation of toluene/*n*-heptane mixtures[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, **489**: 144–152.
- [109] Zheng H Y, Yoshikawa M. Molecularly imprinted cellulose membranes for pervaporation separation of xylene isomers[J]. *Journal of Membrane Science*, 2015, **478**: 148–154.
- [110] Jiang Y H, Zhang Y Q, Wang Z H, et al. Controllable construction of multifunctional superhydrophobic coating with ultra-stable

- efficiency for oily water treatment[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, **628**: 356–365.
- [111] Lin J Y, Lin F, Liu R R, et al. Scalable fabrication of robust superhydrophobic membranes by one-step spray-coating for gravitational water-in-oil emulsion separation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2020, **231**: 115898.
- [112] Gu H H, Li G Q, Li P P, et al. Superhydrophobic and breathable SiO₂/polyurethane porous membrane for durable water repellent application and oil-water separation[J]. *Applied Surface Science*, 2020, **512**: 144837.
- [113] Xiong W, Li L, Qiao F, et al. Air superhydrophilic-superoleophobic SiO₂-based coatings for recoverable oil/water separation mesh with high flux and mechanical stability[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2021, **600**: 118–126.
- [114] Xu Z Z, Li L, Liu J W, et al. Mussel-inspired superhydrophilic membrane constructed on a hydrophilic polymer network for highly efficient oil/water separation[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, **608**: 702–710.
- [115] 王莹, 田梦圆, 张振展, 等. 钯及其合金膜制备研究进展[J]. *膜科学与技术*, 2025, **45**(2): 192–204.
Wang Y, Tian M Y, Zhang Z Z, et al. Research progress in preparation of palladium and its alloy films[J]. *Membrane Science and Technology*, 2025, **45**(2): 192–204.
- [116] 段翠佳, 齐迹, 郭宇, 等. 功能化聚酰亚胺膜的制备和气体分离性能研究[J]. *辽宁化工*, 2025, **54**(2): 252–255.
Duan C J, Qi J, Guo Y, et al. Preparation of functionalized polyimide membrane and its gas separation performance[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2025, **54**(2): 252–255.
- [117] Cowan M G, Gin D L, Noble R D. Poly(ionic liquid)/ionic liquid ion-gels with high “free” ionic liquid content: platform membrane materials for CO₂/light gas separations[J]. *Accounts of Chemical Research*, 2016, **49**(4): 724–732.
- [118] Zhou Z Y, Lu D W, Li X, et al. Fabrication of highly permeable polyamide membranes with large “leaf-like” surface nanostructures on inorganic supports for organic solvent nanofiltration[J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, **601**: 117932.
- [119] Liang B, He X, Hou J J, et al. Membrane separation in organic liquid: technologies, achievements, and opportunities[J]. *Advanced Materials*, 2019, **31**(45): 1806090.
- [120] 易砖, 朱国栋, 刘洋, 等. 膜分离在石油化工领域中的应用: 现状、挑战及机遇[J]. *水处理技术*, 2022, **48**(8): 7–13.
Yi Z, Zhu G D, Liu Y, et al. Applications of membrane separation on petrochemical industry: progress, challenges and opportunities [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, **48**(8): 7–13.
- [121] Mukhtar A, Saqib S, Mellon N B, et al. CO₂ capturing, thermokinetic principles, synthesis and amine functionalization of covalent organic polymers for CO₂ separation from natural gas: a review[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2020, **77**: 103203.
- [122] Li B, Cui X L, O’Nolan D, et al. An ideal molecular sieve for acetylene removal from ethylene with record selectivity and productivity[J]. *Advanced Materials*, 2017, **29**(47): 1704210.
- [123] Schmittmann S, Pasel C, Luckas M, et al. Adsorption of light alkanes and alkenes on activated carbon and zeolite 13X at low temperatures[J]. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 2020, **65**(2): 706–716.
- [124] 张连中, 丁元生, 李正, 等. 石油裂解碳五分离工艺中吸附法异戊二烯脱硫技术研究[J]. *应用化工*, 2019, **48**(S1): 55–59.
Zhang L Z, Ding Y S, Li Z, et al. Study on adsorption isoprene desulfurization technology in C₅ separation process of petroleum cracking[J]. *Applied Chemical Industry*, 2019, **48**(S1): 55–59.
- [125] Jin Y N, Wu J F, Wang J Q, et al. Highly efficient capture of benzothiophene with a novel water-resistant-bimetallic Cu-ZIF-8 material[J]. *Inorganica Chimica Acta*, 2020, **503**: 119412.
- [126] 徐子栋, 张功尚, 刘春晖, 等. 超疏水活性炭污水池废气 VOC_s 长效吸附特性研究[J]. *石油化工安全环保技术*, 2025, **41**(2): 63–68.
Xu Z D, Zhang G S, Liu C H, et al. Study on the long-term adsorption characteristics of superhydrophobic activated carbon for VOCs in wastewater tank exhaust gas [J]. *Petrochemical Safety and Environmental Protection Technology*, 2025, **41**(2): 63–68.
- [127] Yang G, Luo H C, Ohba T, et al. CO₂ capture by carbon aerogel - potassium carbonate nanocomposites[J]. *International Journal of Chemical Engineering*, 2016, **2016**(1): 4012967.
- [128] Cui W G, Hu T L, Bu X H. Metal-organic framework materials for the separation and purification of light hydrocarbons[J]. *Advanced Materials*, 2020, **32**(3): 1806445.
- [129] da Silva R P F F, Rocha-Santos T A P, Duarte A C. Supercritical fluid extraction of bioactive compounds[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2016, **76**: 40–51.
- [130] 陈淦铭. 超临界流体萃取技术的研究与应用[J]. *辽宁化工*, 2021, **50**(1): 55–57.
Chen G M. Research and application of supercritical fluid extraction technology[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2021, **50**(1): 55–57.
- [131] 刘同举, 杜志国, 郭莹, 等. 超临界流体技术在石油化工中的应用[J]. 2011(8): 1676–1680.
Liu T J, Du Z G, Guo Y, et al. Application of supercritical fluid technology in petrochemical industry[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2011(8): 1676–1680.
- [132] 杨科. 超临界流体萃取技术在化工生产中的应用[J]. *山西化工*, 2023, **43**(8): 109–111.
Yang K. Application of supercritical fluid extraction technology in chemical production[J]. *Shanxi Chemical Industry*, 2023, **43**(8): 109–111.
- [133] Makaryan I A, Kostin A Y, Sedov I V. Application of supercritical fluid technologies in chemical and petrochemical industries (review)[J]. *Petroleum Chemistry*, 2020, **60**(3): 244–254.
- [134] Chaves J O, de Souza M C, da Silva L C, et al. Extraction of flavonoids from natural sources using modern techniques[J]. *Frontiers in Chemistry*, 2020, **8**: 507887.
- [135] Uwineza P A, Waśkiewicz A. Recent advances in supercritical fluid extraction of natural bioactive compounds from natural plant materials[J]. *Molecules*, 2020, **25**(17): 3847.
- [136] 陈林凤. 分子印迹膜的设计构建及其在有机污染物分析中的应用[D]. 武汉: 华中师范大学, 2021.
Chen L F. Design and construction of molecularly imprinted membrane and its application in the analysis of organic pollutants [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2021.
- [137] Ostovan A, Arabi M, Wang Y Q, et al. Greenificated molecularly imprinted materials for advanced applications[J]. *Advanced Materials*, 2022, **34**(42): 2203154.
- [138] Liu Y F, Zhao L L, Liu Y J, et al. Surface molecularly imprinted polymer/covalent organic framework/silica composite material

- with specific recognition ability and excellent chromatographic performance[J]. *Talanta*, 2024, **276**: 126238.
- [139] 宋兴良. 分子印迹固相萃取材料的制备及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Song X L. Molecularly imprinting solid-phase extraction materials: preparation and its application[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [140] 熊满艳, 王巧环, 王俊杰. 分子印迹固相萃取技术及其在环境中多环芳烃测定中的应用进展[J]. *环境化学*, 2022, **41**(5): 1522-1529.
- Xiong M Y, Wang Q H, Wang J J. Recent advances of molecularly imprinted solid-phase extraction technique and its application for the determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in environment [J]. *Environmental Chemistry*, 2022, **41**(5): 1522-1529.
- [141] Chen L X, Wang X Y, Lu W H, et al. Molecular imprinting: perspectives and applications[J]. *Chemical Society Reviews*, 2016, **45**(8): 2137-2211.
- [142] Liu Y X, Wang L L, Li H T, et al. Rigorous recognition mode analysis of molecularly imprinted polymers: rational design, challenges, and opportunities[J]. *Progress in Polymer Science*, 2024, **150**: 101790.
- [143] Arabi M, Ostovan A, Li J H, et al. Molecular imprinting: green perspectives and strategies[J]. *Advanced Materials*, 2021, **33**(30): 2100543.
- [144] 印振昌, 田雨, 方华, 等. 新型分离技术在化工工艺中的应用研究[J]. *辽宁化工*, 2025, **54**(3): 501-504.
- Yin Z C, Tian Y, Fang H, et al. Research on application of new separation technology in chemical process[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2025, **54**(3): 501-504.
- [145] Zhao J, Wang X H, Tian Z H, et al. Optimization design and evaluation of the industrial distillation-membrane separation process[J]. *Chemical Engineering & Technology*, 2024, **47**(2): 335-348.
- [146] Xu Q G, Dai Y S, Zhao Q, et al. Economy, environmental assessment and energy conservation for separation of isopropanol/diisopropyl ether/water multi-azeotropes *via* extractive distillation coupled pervaporation process[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2023, **54**: 353-363.
- [147] Jiao Y Y, Yan M, Wang X L, et al. Economic, environmental, energy and exergy analysis and multi-objective optimization for efficient purification of a friendly gasoline additive by extractive distillation coupled with pervaporation[J]. *Fuel*, 2023, **335**: 127069.
- [148] León J A, Fontalvo J. Theoretical and experimental evaluation of a distillation-pervaporation in a single unit column for the separation of an azeotropic mixture[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2020, **59**(43): 19426-19437.
- [149] 宫春美. 生物质固定床吸附-精馏耦合分离异丙醇-水共沸物研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
- Gong C M. Study on separation of isopropanol-water azeotrope using the coupling process of biomass-based fixed-bed adsorption and distillation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [150] Neyestani F, Eslamloueyan R. A novel reactive-extractive distillation process for separation of water/methanol/tetrahydrofuran mixtures[J]. *Scientific Reports*, 2024, **14**: 1931.