

新型分离技术在化工工艺中的应用研究

马巧敏¹ 周旋² 吕海俊²

1. 浙江博聚新材料有限公司 浙江 丽水 323000

2. 浙江宏德丽新材料有限公司 浙江 丽水 323000

摘要: 在化工工艺不断追求创新突破的背景下, 本文聚焦新型分离技术在化工工艺中的应用。阐述膜分离、超临界流体萃取、离子液体萃取、吸附分离、渗透汽化膜等技术的分类与原理。分析其在原料预处理、反应过程优化、产物纯化、资源循环利用等场景的潜在应用。探讨未来在材料创新、技术集成、绿色化发展、跨学科融合等方面的发展趋势, 为化工行业提供技术参考。

关键词: 新型分离技术; 化工工艺; 应用场景; 发展趋势

引言: 化工行业对分离技术需求迫切, 传统分离技术存在能耗高、效率低等问题。新型分离技术凭借独特优势, 成为行业关注焦点。膜分离、超临界流体萃取等技术不断涌现, 在化工工艺各环节展现出巨大潜力。深入研究这些新型分离技术, 有助于提升化工生产效率、降低成本、推动行业可持续发展, 具有重要的现实意义。

1 新型分离技术分类与原理

1.1 膜分离技术

膜分离技术依托半透膜或复合膜的选择性透过特性实现物质分离。这种技术通过膜孔径大小及表面性质差异, 对不同分子或离子进行筛分或选择性吸附。根据分离尺度与目标物质特性, 膜分离可细分为微滤、超滤、纳滤、反渗透及气体分离膜等类型^[1]。微滤膜孔径范围在0.1-10微米, 适用于悬浮颗粒截留, 可拦截粒径大于其孔径的90%以上的颗粒; 超滤膜孔径范围在0.001-0.1微米, 可分离大分子物质, 能截留分子量大于1000道尔顿的物质; 纳滤膜孔径范围在0.001微米以下, 对二价离子及小分子有机物具有较高截留率, 对硫酸钠截留率可达95%以上; 反渗透膜孔径小于0.0001微米, 则能实现水分子与溶质的彻底分离, 对氯化钠截留率可达99%以上; 气体分离膜通过溶解-扩散机制实现气体混合物分离, 对氧气和氮气的分离系数可达3-5。该技术核心优势在于分离过程无相变发生, 能耗显著低于传统蒸馏或结晶工艺, 且设备结构紧凑、操作灵活, 在化工、食品及环保领域应用广泛。

1.2 超临界流体萃取技术

超临界流体萃取技术利用超临界状态流体兼具气体扩散性与液体溶解性的特性, 通过调节压力与温度实现

目标物质选择性萃取。以二氧化碳为例, 其超临界状态兼具低黏度与高扩散系数, 可快速渗透至物料内部并溶解非极性或弱极性成分。该技术通过压力变化实现溶质与溶剂的分离, 在压力从超临界状态降低至常压时, 溶质可析出, 避免有机溶剂残留问题。与传统萃取工艺相比, 超临界流体萃取在低温条件下操作, 尤其适用于热敏性物质分离, 如天然香料、药物活性成分提取等场景。在提取天然香料时, 操作温度可控制在40-60℃, 能有效保留香料的香气成分。此外, 二氧化碳作为萃取剂可循环使用, 在连续萃取过程中, 每萃取100千克物料, 二氧化碳循环使用量可达500-800千克, 显著降低工艺成本与环境负荷。

1.3 离子液体萃取技术

离子液体萃取技术基于离子液体与目标物质间的特异性相互作用实现分离。该技术如同精准匹配的“化学钥匙”, 能靶向识别食品、环境中的痕量有害物质及工业共沸体系组分, 在农兽药残留检测、水处理净化等场景中展现出高效分离优势。离子液体由阴阳离子构成, 具有低挥发性、高热稳定性及结构可设计性等特点。通过调节阴阳离子组合, 可构建对特定金属离子或有机物具有高亲和力的萃取体系。借助COSMO-RS等理论模型可快速筛选适配离子液体, 其阴离子电负性往往主导萃取机制, 能通过形成稳定氢键网络强化分离效果。该技术分离过程依赖离子液体与目标物质的静电作用、氢键作用或疏水作用, 实现选择性分离。分离后, 离子液体可通过反萃取或蒸馏等方式再生, 重复使用率较高。与传统有机溶剂萃取相比, 离子液体萃取技术显著减少挥发性有机化合物排放, 符合绿色化学发展要求。

1.4 吸附分离技术

吸附分离技术通过固体吸附剂表面活性位点与目标

通讯作者: 周旋, 2001年11月25日出生, 2024年毕业于宁波大学科学技术学院, 现就职于浙江宏德丽新材料有限公司。主要从事生产技术。

物质的物理或化学吸附作用实现分离。这类“微观捕手”的性能可通过精准调控孔道结构与功能基团优化,在盐湖提锂、生物医药纯化、超纯水制备等领域发挥关键作用,能从低浓度体系中高效富集目标组分。常用吸附剂包括活性炭、分子筛、硅胶及树脂等,其孔隙结构与表面化学性质决定分离选择性。活性炭依赖微孔结构实现非极性物质吸附;分子筛通过孔径筛分作用分离特定分子尺寸物质;树脂则利用功能基团与目标物质的离子交换或配位作用实现分离。特种树脂类吸附剂已实现产业化应用,在锂资源提取、减肥药载体制备等场景中,能大幅提升产品纯度与资源利用率。该技术操作条件温和,常温常压下即可完成分离过程,且吸附剂可通过热再生或溶剂洗脱方式循环使用,适用于低浓度物质分离及气体净化等场景。

1.5 渗透汽化膜技术

渗透汽化膜技术利用膜两侧组分蒸气压差驱动物质传递,通过膜材料对不同组分的溶解扩散速率差异实现选择性分离。其传质过程遵循溶解-扩散理论,膜两侧分压差为核心推动力,真空吹扫、冷凝冷却等方式可强化分离动力,单级分离系数最高可达1000。该技术核心在于膜材料选择,需兼具高溶解选择性及快速扩散性能。目前主流膜材料包括高分子膜、无机膜及有机-无机复合膜,复合膜结合了两者优先,成为高性能膜的主要发展方向。渗透汽化膜在有机溶剂脱水领域表现突出,可实现乙醇-水、异丙醇-水等恒沸体系深度脱水;在有机-有机混合物分离方面,通过设计具有特定亲和性的膜材料,可实现苯-环己烷、甲苯-二甲苯等难分离体系的高效分离。与传统蒸馏工艺相比,渗透汽化膜技术能耗降低约50%,且设备占地面积小,尤其适用于中小规模分离场景。

2 新型分离技术在化工工艺中的潜在应用场景

2.1 原料预处理阶段

原料预处理是化工生产的基础环节,新型分离技术在此阶段可显著提升原料品质与工艺效率。膜分离技术凭借高效截留特性,在气体净化领域展现独特优势^[2]。通过选择合适孔径的膜材料,可实现氢气、氮气等工业气体中微量杂质的高效脱除,对于氢气中体积分数为0.1%的杂质,膜分离技术可将其脱除至体积分数低于0.001%,为后续反应提供高纯度原料。超临界流体萃取技术则在溶剂回收方面表现突出,利用超临界二氧化碳对有机溶剂的高溶解能力,可实现反应后混合体系中溶剂的快速分离与循环利用,既减少原料消耗又降低废弃物排放。在某化工反应后的混合体系中,含有50千克有机溶剂,利用超临界流体萃取技术可在2小时内回收45千

克以上的有机溶剂。吸附分离技术通过固体吸附剂对特定组分的选择性吸附,可有效去除液体原料中的重金属离子或有机污染物,尤其适用于对原料纯度要求严苛的精细化工领域。对于液体原料中质量浓度为10毫克/升的重金属离子,吸附分离技术可将其降低至质量浓度低于0.1毫克/升。渗透汽化膜技术通过蒸气压差驱动传递,可实现原料中水分的深度脱除,为需要无水环境的反应体系提供关键支持。对于含水量为5%的原料,渗透汽化膜技术可将其含水量降低至0.1%以下。

2.2 反应过程优化

新型分离技术与反应工艺的深度融合,为化工生产过程优化开辟新路径。渗透汽化膜技术通过在反应器内集成膜组件,可实时移除反应生成的水或小分子副产物,使目标产物收率提升10-30个百分点,打破化学平衡限制,显著提高目标产物收率。这种反应-分离耦合模式在酯化、醚化等可逆反应中具有显著优势,可减少传统蒸馏分离带来的能耗与设备投资。吸附分离技术在催化剂回收领域展现重要价值,通过设计对贵金属或酶催化剂具有高选择性的吸附材料,可实现催化剂回收率达到95%以上,实现催化剂与反应体系的快速分离与再生,降低生产成本的同时减少重金属污染风险。离子液体萃取技术凭借对特定金属离子的高亲和力,可在反应过程中选择性萃取目标产物,实现连续化生产与产物即时分离,特别适用于催化加氢或氧化反应体系。

2.3 产物纯化阶段

产物纯化是决定产品质量的关键环节,新型分离技术为此提供了高效解决方案。纳滤技术通过膜孔径筛分与电荷排斥作用,可实现药物中间体、天然产物等高附加值物质的高效纯化,替代传统结晶或重结晶工艺,显著缩短生产周期。离子液体萃取技术利用阴阳离子与目标分子的特异性相互作用,可实现同分异构体或手性化合物的精准分离,在香料、医药等领域具有重要应用前景。超临界流体萃取技术通过调节压力与温度,可实现天然产物中活性成分的选择性提取与分级纯化,避免热敏性物质降解,特别适用于高纯度植物提取物制备。膜分离技术与吸附分离技术的组合工艺,可实现复杂混合物中多组分的梯度分离,满足电子化学品、特种聚合物等高端领域对产品纯度的严苛要求。

2.4 资源循环利用

资源循环利用是化工行业可持续发展的核心方向,新型分离技术在此领域发挥关键作用。膜分离技术通过不同孔径膜组件的组合,可实现工业废水中重金属离子、有机污染物与水的分级分离,回收的纯净水可循环

用于生产过程, 浓缩的污染物则通过后续处理实现资源化利用。吸附分离技术凭借对二氧化碳的高选择性吸附能力, 可在工业废气处理中实现碳捕集与封存, 捕获的二氧化碳经纯化后可用于尿素合成或食品级干冰生产。渗透汽化膜技术在有机废水处理方面表现优异, 可实现溶剂与水的选择性分离, 回收的有机溶剂经简单处理即可重新投入使用^[3]。离子液体萃取技术通过设计对特定离子或分子具有高亲和力的萃取体系, 可实现废液中稀有金属或贵金属的高效回收, 推动资源循环利用向高值化方向发展。

3 未来发展趋势与研究方向

3.1 材料创新

材料创新是推动分离技术突破的核心驱动力。新型膜材料的研发聚焦于提升分离效率与降低成本双重目标, 石墨烯复合膜凭借单原子层厚度与优异机械性能, 展现出超快传质速率与高截留精度, 在气体分离与渗透汽化领域具有广阔前景。功能化离子液体通过引入特定官能团, 可实现对金属离子、有机污染物或手性分子的高选择性识别, 拓展在稀有金属回收与生物医药分离的应用边界。吸附剂材料设计则侧重于孔隙结构调控与表面化学修饰, 金属有机框架材料与共价有机框架材料凭借高比表面积与可定制化孔道, 在低浓度物质分离与催化反应中表现突出。此外, 生物基分离材料的开发成为热点, 通过仿生设计构建具有特异性识别能力的蛋白质膜或多糖基吸附剂, 为绿色分离工艺提供材料支撑。

3.2 技术集成

技术集成是提升分离系统综合性能的关键路径。多技术耦合体系通过整合不同分离原理的优势, 实现复杂体系的高效分离。膜分离与吸附分离的组合工艺可先通过膜组件实现大尺度组分截留, 再利用吸附剂对微量目标物进行深度纯化, 显著降低能耗与操作成本。智能化控制系统的引入使分离过程具备自适应调节能力, 通过实时监测温度、压力、浓度等参数, 动态优化操作条件, 提升分离效率与产物纯度。过程强化技术如微通道反应器与旋转膜装置的集成, 可实现分离单元的小型化与模块化, 满足灵活生产需求。

3.3 绿色化发展

绿色化发展是分离技术可持续转型的必然选择。生物基分离材料以可再生资源为原料, 通过绿色合成路径制备, 使用后可生物降解, 从源头减少环境负荷。可再生能源驱动的分选工艺利用太阳能、风能或工业余热提供能量, 替代传统蒸汽或电力加热, 显著降低碳排放。零排放分离技术通过物质循环利用与能量梯级利用设计, 实现分离过程废弃物近零产生, 例如闭路循环膜系统与吸附剂再生工艺的优化。此外, 开发低毒或无毒溶剂体系, 减少挥发性有机化合物排放, 成为绿色分离工艺的重要方向。

3.4 跨学科融合

跨学科融合为分离技术性能跃升提供新范式。纳米技术通过构建纳米级分离通道或修饰纳米粒子表面, 可显著提升膜通量与抗污染性能, 同时赋予吸附剂对特定分子的靶向识别能力。生物技术借助酶催化或仿生通道设计, 实现手性化合物分离与生物大分子纯化, 突破传统分离方法的局限性^[4]。人工智能与大数据技术的深度应用, 可加速新型分离材料的筛选与工艺优化, 通过机器学习模型预测分离效率与操作参数, 缩短研发周期并降低试验成本。多尺度模拟技术的引入, 从分子层面揭示分离机制, 为工艺设计提供理论指导。

结束语

新型分离技术在化工工艺中已展现诸多优势, 从原料处理到产物纯化, 从资源利用到过程优化, 均发挥关键作用。材料创新、技术集成、绿色化及跨学科融合等发展方向, 将进一步推动性能提升与应用拓展。化工行业应积极引入这些技术, 不断探索创新, 以实现更高效、环保、可持续的生产模式, 提升行业整体竞争力。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 谌红艳. 新型膜分离技术在化工分离过程中的创新应用[J]. 当代化工, 2025, 54(9): 2154-2158.
- [3] 王玉申, 李洪坤, 盖帅, 等. 分离与纯化技术创新在化工工艺中的操作稳定性[J]. 广州化工, 2025, 53(11): 190-192.
- [4] 周良莲, 朱浩, 朱翼虹. 化工工艺中的新型节能降耗技术及其应用分析[J]. 智库时代, 2025(2): 239-241.