

化工工艺中溶剂回收与循环利用技术研究

牛天芳

河北科防冶金安全评价有限公司, 河北 石家庄 050000

[摘要]文章对化工生产过程中常用的溶剂回收方法进行了归纳总结,包括精馏法、萃取法、吸附法、膜分离法、结晶法,并分别介绍了这些方法的基本原理、适用条件、特点以及在实际生产中的应用情况;探讨了影响溶剂回收率及其循环再利用率的主要因素,例如溶剂物性、操作条件、装置能力等,并对溶剂回收及循环利用系统进行优化设计,以期能为其他化工行业实现溶剂资源化绿色生产起到一定的指导作用和参考。

[关键词]化工工艺; 溶剂回收; 循环利用; 分离技术; 绿色化工

DOI: 10.33142/sca.v8i11.18691

中图分类号: TQ244.2

文献标识码: A

Research on Solvent Recovery and Recycling Technology in Chemical Processes

NIU Tianfang

Hebei Kefang Metallurgy Safety Evaluation Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: This article summarizes the commonly used solvent recovery methods in chemical production processes, including distillation, extraction, adsorption, membrane separation, and crystallization. The basic principles, applicable conditions, characteristics, and practical applications of these methods are introduced; Explored the main factors affecting solvent recovery rate and its recycling rate, such as solvent properties, operating conditions, equipment capacity, etc; And optimize the design of solvent recovery and recycling systems, in order to provide guidance and reference for other chemical industries to achieve solvent resource green production.

Keywords: chemical process; solvent recovery; recycling; separation technology; green chemistry

引言

化工行业作为国民经济的重要基础性产业,在生产过程中往往需要大量的有机溶剂作为生产过程中的溶解剂、萃取剂、反应介质等^[1]。“双碳”发展愿景及绿色发展要求,化工行业也应该顺应时代发展,积极转型,追求资源的高效利用以及减少污染物的排放^[2]。而溶剂回收再利用技术对化工生产过程中产生的废溶剂进行回收利用,再次达到生产使用的要求并返回到工艺循环中去,不但可以控制成本,节省资源,还可以大大减少废溶剂的排放量,减轻环境污染的压力,并且溶剂的回收和再循环也能够提高企业的效益和竞争力,促进化工产业向绿色化、低碳化、可持续化方面迈进。如何变“废”为“宝”,实现污染物的资源化回收利用,是行业面临的一项重要课题^[3]。因此,本文研究对化工工艺中的溶剂回收及再利用进行研究,推进工业生产过程中产生的废溶剂处理由末端治理向资源化利用转变具有重要意义。

1 化工工艺中常用溶剂回收技术

1.1 精馏技术

精馏法就是利用混合物中的各组分具有不同沸点,在加热的情况下使混合物部分汽化,并把蒸汽冷却下来,利用汽液两相之间各组分的浓度不同而达到分离目的物理分离方法。精馏按照操作压力的不同分为常压精馏、减压精馏及加压精馏三种^[4],其中常压精馏主要应用于沸点低、热稳定性好的溶剂混合物之间的分离,分别有操作简便、

设备投资少等特点;减压精馏是通过减小系统压力从而降低混合物沸点的一种方法,适合于沸点高、热敏感性强的溶剂分离,可以防止溶剂在高温下被破坏;加压精馏用于沸点太低而难于冷凝的溶剂分离,通过增大压力,提升溶剂的沸点以便于冷凝回收。精馏技术有分离效率高、产品纯度高、适用范围广等优点,是目前化工行业应用最为广泛的一种溶剂回收技术类型;但同时也存在着能耗高、设备投资大、操作复杂等缺点,尤其是对一些沸点接近的共沸混合物,普通的精馏技术无法进行有效分离,需采用特殊精馏技术。

1.2 萃取技术

萃取技术是利用溶质在两种互不相溶(或微溶)的溶剂中溶解度不同而将溶质由一种溶剂转到另一溶剂的技术。依据萃取方式不同分为液-液萃取、固-液萃取、超临界萃取等方式。其中液-液萃取最为常见,适用于液体混合物中目标溶剂的回收;固-液萃取主要是将固体物料中的溶剂或者有用的物质进行分离提取;而超临界萃取是以超临界流体(如CO₂)为萃取剂,具有萃取率高、选择性好、环保等优势,可用于热敏性和高价溶剂的回收。萃取技术具有分离效率高、操作温度低、能耗低等优点,尤其适用于沸点相近、难以用精馏技术分离的溶剂混合物,以及热敏性溶剂的回收。但其也存在萃取剂选择难度大、萃取剂回收成本高缺点。

1.3 吸附技术

吸附法就是利用吸附材料的多孔性及表面吸附作用

把废弃溶剂中被吸附物的分子吸附于吸附材料表面上，从而达到被吸附物与其他杂质分离的目的。按照吸附材料的不同，吸附法分为活性炭吸附法、分子筛吸附法、硅胶吸附法等。活性炭吸附法的优点有：吸附量大；使用范围广；成本低等，适用于各类有机溶剂的回收；分子筛吸附适用于对极性溶剂的回收，其特点为选择性高，吸附性能稳定；硅胶吸附主要应用于对水分的吸附，常与其他吸附结合使用。吸附技术具有设备简单、操作方便、能耗低、投资少等优点，适用于低浓度废溶剂的回收。但其也存在吸附剂容量有限、需要频繁再生、再生过程可能产生二次污染等缺点，对于高浓度废溶剂的回收效率较低。

1.4 膜分离技术

膜分离技术是利用具有特定孔径与选择性的膜材料，在压力差、浓度差等驱动力的作用下，使废溶剂中的目标溶剂分子通过膜孔，而杂质分子被截留，从而实现目标溶剂与杂质分离的技术。离子交换与活性炭吸附处理后的废水仍需进一步净化与浓缩，以实现重金属离子的深度回收。根据膜的孔径大小与分离机理，膜分离技术可分为微滤、超滤、纳滤、反渗透、渗透汽化等。其中，微滤膜孔径较大，可用于去除废溶剂中的一些悬浮颗粒等杂质；超滤膜孔径较小，用于去除废溶剂中的大分子有机物；纳滤膜及反渗透膜的选择性较高，可以将溶剂和溶质进行有效分离，适用于对高浓度废溶剂的回收提纯；渗透汽化膜是新兴的一种膜分离技术，适合于共沸混合物、近沸混合物的分离，有分离效率高、能耗低的优点。

膜分离技术具有分离效率高、能耗低、操作简单、绿色环保等优点，尤其适用于传统分离技术难以分离的溶剂混合物。但其也存在膜材料成本高、膜易污染、膜寿命短等缺点，限制了其在工业中的广泛应用。

1.5 结晶技术

结晶法就是利用物质在不同的温度、浓度下的溶解度的不同，在一定条件下采用冷却、蒸发等方式使得目的溶剂或溶质形成晶体以达到分离的目的方法。包括冷凝结晶、蒸发结晶、真空结晶等。其中，冷却结晶适用于溶解度

随着温度上升而增大较多的物质的分离；蒸发结晶适用于溶解度受温度影响不大的物质的分离；真空结晶则是指在真空条件下的结晶过程，其具有操作温度较低、能耗低等优势，在对热敏性物质进行分离中得到应用。

结晶技术具有产品纯度高、操作简单、能耗较低等优点，适用于含有大量溶质的废溶剂的回收。但其也存在结晶过程缓慢、设备体积大、对操作条件要求严格等缺点。

1.6 各类溶剂回收技术对比

为了更清晰地对比各类溶剂回收技术的特点与适用范围，现将常用溶剂回收技术的关键性能指标总结如下表所示：

2 溶剂循环利用的关键影响因素

2.1 溶剂理化性质

溶剂理化性质（沸点、极性、溶解度、热稳定性、化学稳定性等）影响其回收利用效果。沸点差异大利于精馏分离；极性决定吸附分离性能；溶解度影响萃取与结晶技术选择；热、化学稳定性差的溶剂，分别不宜高温回收、可能与其他物质反应影响回收与产品质量。

2.2 回收工艺参数

通过对回收工艺参数进行精细化的优化，可以提高溶剂回收效率，并改善产品的质量。然而，由于不同回收技术所涉及的参数各异。例如在精馏工艺中回流比是主要的控制参数，通过增加回流比，虽然可以提高产品的纯度，但是也会造成能耗的增加。萃取技术的关键参数包括萃取剂用量，若剂量控制不合理，不仅会影响操作效率，而且会增加回收成本。在吸附过程中需要监测空速的参数，若空速设置不合理，会影响吸附效果。膜分离技术的操作压力参数是关键，若压力控制不合理会导致分离效率下降，增加能耗，加剧膜污染。

2.3 设备性能

回收设备性能影响溶剂回收的效率与稳定性。其材质、结构、密封性能等影响回收效果，如精馏塔的塔板数等影响传质效率；吸附塔结构影响吸附效率；膜分离设备膜组件等影响膜性能与寿命。此外，设备密封性能也很关键，密封不严会降低回收率并污染环境。

表 1 常用溶剂回收技术的关键性能指标总结

回收技术	分离原理	适用范围	优点	缺点	回收率	能耗
精馏技术	沸点差异	各类溶剂混合物，尤其适用于沸点差异较大的混合物	分离效率高、产品纯度高、适用范围广	能耗高、设备投资大、操作复杂	85%~99%	高
萃取技术	溶解度差异	沸点相近的溶剂混合物、热敏性溶剂	分离效率高、操作温度低、能耗低	萃取剂选择难、回收成本高、可能产生二次污染	90%~98%	中
吸附技术	表面吸附力	低浓度废溶剂	设备简单、操作方便、能耗低、投资少	吸附容量有限、需频繁再生、再生可能产生二次污染	80%~95%	低
膜分离技术	膜孔径与选择性	共沸混合物、近沸混合物、高纯度溶剂提纯	分离效率高、能耗低、操作简单、绿色环保	膜材料成本高、膜易污染、膜寿命短	90%~99%	中低
结晶技术	溶解度差异	含有大量溶质的废溶剂	产品纯度高、操作简单、能耗较低	结晶过程缓慢、设备体积大、操作条件要求严格	85%~95%	中

2.4 杂质积累

在溶剂循环的利用过程中,废溶剂杂质难以彻底被清除是亟待解决的关键问题,残留杂质会在循环系统内不断积累,破坏工艺的稳定性。在涂料行业,杂质积累会影响涂料的附着力、流变性能等关键指标,致使涂料影响涂料性能,无法预期的使用效果。因此,要采取有效措施控制杂质积累,如优化回收工艺、定期净化、设置旁路排放等。

2.5 经济成本

经济成本作为衡量溶剂回收循环利用技术可行性的关键性指标之一,主要涵盖了多个维度,包括操作运行成本,投资成本,以及后续的维护保养成本。并且,这些成本会因所采用的技术类型处理规模的不同而出现明显的差异。鉴于此,在甄选溶剂回收循环利用技术方案时,同时需要全面考虑经济成本以及环境效益,由此选择出性价比最优的方案。

3 溶剂回收与循环利用系统的优化策略

3.1 技术集成优化

单一的溶剂回收技术往往存在一定的局限性,将多种回收技术集成应用,可实现优势互补,提升整体分离效果与经济性。例如,把吸附技术和精馏技术集成在一起,先用吸附技术对低浓度废溶剂进行浓缩后再用精馏技术对浓缩后的高浓度溶剂进行提纯,可以减少精馏技术的能耗与设备投资;将萃取技术和膜分离技术集成在一起,先用萃取技术对难分离的溶剂混合物进行预处理后再用膜分离技术进行深度分离,可以提升分离效果及产品的纯度;将精馏技术和结晶技术结合起来,先利用精馏技术将绝大部分溶剂分离出来,然后利用结晶技术除去剩余的溶质,得到高纯度的溶剂产品。

3.2 工艺参数优化

工艺参数的优化也是提高溶剂回收效率以及降低能耗的重要途径。可以采用试验研究结合模拟计算的方法,对回收工艺关键参数进行优化;也可以使用响应面法、遗传算法等优化方法,对多参数、多目标的回收工艺进行全局优化,从而实现回收效率、产品纯度与能耗之间的平衡。

3.3 智能化控制优化

引入智能化控制技术,可实现溶剂回收与循环利用过程的精准调控,提升系统的稳定性与效率。从回收设备上布置温度、压力、流量、浓度等传感器来实现实时的过程参数测量;依托 PLC、DCS 等控制系统对测得的参数进行分析处理并依据预设的控制规则自动调控运行参数(如:加热功率、冷水量、进料量等);结合人工智能、机器学习等技术,构建过程预测模型,预测溶剂回收率及产品指标变化情况,并提前对操作条件进行调整以防止系统波动。此外,还可通过工业互联网平台实现对溶剂回收与循环利用系统的远程监控与管理,提高系统的运维效率。

3.4 溶剂替代优化

溶剂替代是源头减少溶剂消耗量及污染物产生量的有效途径之一,可通过采用毒性低、易回收、环境友好型

溶剂来取代以往常用的具有毒性和难回收特性溶剂,以减少溶剂回收处理的困难程度和费用,提高溶剂回收再利用的可能性。如用乙醇、乙酸乙酯等绿色溶剂代替苯、甲苯等有毒溶剂;用离子液体、超临界流体等新溶剂替代传统有机溶剂。另外还可以通过改进生产方法以减少溶剂用量,从而从源头上减少废溶剂的产生量。

4 结论与展望

4.1 结论

在绿色化工理念的引导下,化工工艺中溶剂回收以及循环利用技术优化,不仅可以实现化工行业资源的高效循环利用,而且可以推动环境友好型发展。本文研究对于化工工艺中溶剂回收以及循环利用技术进行了深入的研究发现在工业生产中常用到的溶剂回收技术有多种方法,每一种技术具有不同的优缺点,适用范围。其中,精馏技术因其适用范围广泛,分离效率高,在溶剂回收领域中占据重要地位,但是因其能耗较高的特性也在一定程度上限制了其广泛使用。萃取技术因其对难分离的溶剂混合物具有独特的优势,能耗也较低,但是关于萃取剂的选择难度比较大;吸附技术以及能耗低、设备简单等特点,在低浓度废溶剂中得到了广泛的应用,展现出独特的实用性与经济性;结晶技术因其产品纯度较高,尤其适用于含有大量溶质的废溶剂中;膜分离技术其具有绿色环保、分离效率高等特点,尤其在处理复杂溶剂混合物方面效果较为显著。溶剂循环利用的关键因素影响较多,通过对影响因素的分析,并制定一系列有效的干预策略,包括智能控制、工艺参数优化、技术集成等,可以提高容积的回收效率,增强循环利用效果。

4.2 展望

未来伴随着新型分离材料的持续研发,容积回收与循环利用体系的数字化与智能化全面升级、耦合分离技术的开发与应用、绿色容积的大规模推广,溶剂回收与循环利用的技术也应该向智能化、绿色化、低能化的方向推进。通过持续的系统化优化与技术创新,实现更高的回收效率,控制运营成本,提高环境效率,推动化工产业向绿色低碳方向转型以及可持续发展。与此同时,应该强化政策层面的引导作用,加强制定与完善相关规章制度与标准,确保在公益领域中溶剂回收与循环利用技术的广泛普及与深度应用。

[参考文献]

- [1]张成林,袁洋波,王超,等.工业废水资源化的膜分离技术前沿与进展研究[J].水处理技术,2023,39(6):78-80.
- [2]王东,许峰,刘晨晨.污泥及工业废水废渣资源化利用产业技术研究[J].清洗世界,2023,39(6):78-80.
- [3]李瑞端,潘宵,胡靓.节能型精馏技术:几种热泵精馏工艺综述[J].广东化工,2021,48(24):81-82.
- [4]孙诗瑞,杨傲,石涛,等.特殊精馏热耦合强化技术研究进展[J].化工学报,2020,71(10):4575-4589.

作者简介:牛天芳(1985.6—),毕业院校:河北工业大学,所学专业:化学工程与工艺,当前就职单位:河北科防冶金安全评价有限公司,职务:安全评价师,职称级别:中级。