

# 绿色化工理念下溶剂回收工艺设计探讨

魏华兵

中国电子系统工程第四建设有限公司, 河北 石家庄 050000

**[摘要]**为响应绿色化工“减污降碳、资源高效利用”要求,解决化工生产中溶剂消耗大、污染环境等问题,文章基于绿色化工理念,探讨溶剂回收工艺设计思路与关键技术,明确绿色化工内涵及对溶剂回收工艺的要求;从设计原则、流程优化、技术选型等方面提出兼顾环境、资源与经济的工艺设计框架,最后展望发展方向。文中研究为绿色化工背景下溶剂回收工艺设计与优化提供理论支撑,助力行业绿色发展。

**[关键词]**绿色化工; 溶剂回收; 工艺设计; 资源利用; 绿色评价

DOI: 10.33142/sca.v8i11.18692

中图分类号: TE65

文献标识码: A

## Discussion on Solvent Recovery Process Design under the Concept of Green Chemistry

WEI Huabing

The Fourth Construction Co., Ltd. of China Electronics System Engineering, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

**Abstract:** In response to the requirements of "pollution reduction, carbon reduction, and efficient utilization of resources" in green chemistry, and to solve the problems of high solvent consumption and environmental pollution in chemical production, this article explores the design ideas and key technologies of solvent recovery processes based on the concept of green chemistry, clarifies the connotation of green chemistry, and the requirements for solvent recovery processes; Propose a process design framework that considers the environment, resources, and economy from the aspects of design principles, process optimization, and technology selection, and finally look forward to the development direction. The research in the article provides theoretical support for the design and optimization of solvent recovery processes under the background of green chemistry, and helps promote the green development of the industry.

**Keywords:** green chemical industry; solvent recovery; process design; resource utilization; green evaluation

### 引言

溶剂是化工生产关键辅材,应用广泛,行业年消耗量占辅助材料总量超 30%,大量废弃溶剂排放不仅浪费资源,更对生态环境造成严重威胁,引发环境污染等相关问题<sup>[1]</sup>。随着环保意识提升,传统溶剂处理方式难满足需求。能源紧缺和环境污染已成为全球关注的焦点。为了实现化工行业的可持续发展,减少对有限资源的依赖,节能技术,控制环境污染的研究和应用至关重要。绿色化工理念以“原子经济性”等为核心,为溶剂回收工艺优化指明方向。溶剂回收是关键环节,但现有技术存在回收效率低、能耗高、二次污染控制不足等问题。因此,基于绿色化工理念探讨溶剂回收工艺设计原则、关键技术等,对提升回收效率、推动行业绿色发展意义重大<sup>[2]</sup>。本文从理论层面构建绿色化设计框架,为溶剂回收工艺创新提供思路。

### 1 绿色化工理念的核心内涵及对溶剂回收工艺的要求

#### 1.1 绿色化工理念的核心内涵

绿色化工即环境友好化工,核心是在化工生产全生命周期采用先进技术工艺,以最大程度减少对环境的有害影响,实现资源高效利用与经济收益提升。其核心原则有原

子经济性、减量化、无害化、资源化。其本质在于构建“经济-环境-资源”三位一体的协同发展体系,打破传统模式,从源头控污,推动行业走向绿色、可持续的未来。

#### 1.2 绿色化工理念对溶剂回收工艺的核心要求

基于绿色化工内涵,溶剂回收工艺设计的关键要旨在于:实现资源的高效循环回收,通过工艺优化、技术创新使回收率提高,以确保溶剂得到最大化的再利用效果;严格遵循低能耗、低碳排放相关原则,对工艺流程进行合理精准的优化,削减能源消耗及温室气体排放量;始终坚持环境无害化的处理相关标准,在工艺实施过程中,选择环保、无毒的辅助材料,避免二次污染的产生;要确保工艺设计的可行性与经济性,通过资源优化配置以及合理的成本控制,实现环境与经济效益统一。

### 2 绿色化工理念下溶剂回收工艺设计原则

#### 2.1 源头优化与过程控制相结合原则

绿色化工理念能产生的源头加强管控,在溶剂回收工艺设计过程中需突破传统“末端回收”的局限。在源头优化层面应该结合化工生产的核心工艺流程,科学合理地选择具备易回收特性、环境友好、低毒性的溶剂种类,降低对环境造成风险的可能性。在过程的控制层面,精准优化

溶剂使用过程中的各类操作参数,涵盖反应时间、温度等,可以有效避免溶剂在使用过程中出现变质、损耗,提升待回收溶剂的纯度,推动后续回收工艺的高效进行。

## 2.2 技术适配性原则

不同类型溶剂(极性、非极性、混合等)物理化学性质各异,且待回收溶剂的浓度、杂质情况也不尽相同。因此,溶剂回收工艺设计要遵循技术适配性原则,以溶剂的化学性质为依据,科学合理的选择回收技术(如精馏、膜分离等),保障回收效率与稳定性。同时在技术选型的过程中,优先选择绿色环保、成熟度较高的技术,防止因选型失误造成高能耗或二次污染。

## 2.3 系统集成与协同优化原则

溶剂回收工艺并不是一个孤独存在的环节,需要与化工生产主工艺深度融合。从回收工艺设计的角度而言,不仅需要考虑到主工艺的生产节奏,而且要细致考量溶剂的具体需求,通过合理的匹配与规划,实现回收溶剂的及时回用,同时可以减少溶剂储存与运输过程中出现的不必要损耗。另一方面,通过工艺集成可以有效实现能源和物料的高效阶梯利用,减少额外的能量消耗。

## 2.4 全生命周期绿色化原则

溶剂回收工艺的绿色化设计需要覆盖工艺设计、设备选型、运输维护、废气处理等各环节。应该挑选具有环保节能高效特性的设备,不仅可以降低运行期间的能量消耗,而且可以有效控制污染。与此同时,定期对设备进行维护保养,若发现异常问题,及时采取措施加以解决。在废气处理方面,对于回收工艺中所产生的无法再利用的废弃物,合理设计无害化处理方案,将废弃物中的有害物质彻底的去掉或者是转化,防止二次污染。

## 3 绿色化工理念下溶剂回收工艺的关键设计环节与技术选型

### 3.1 待回收溶剂预处理环节设计

待回收溶剂常含原料残渣、反应副产物、水分等少量杂质,影响回收效率,还可能引发设备堵塞、腐蚀等问题。预处理是溶剂回收工艺设计的基础,核心在于去除固体、水分及部分高沸点杂质,提升溶剂纯度。基于绿色化要求,预处理应优先选择低能耗、无二次污染技术。固体杂质去除用过滤、离心分离等物理方法,不用化学絮凝剂。脱水处理环节中,需要去除其中的水分,溶剂与水呈现不互溶状态时采用重力沉降、分液法,当溶剂与水相互溶解时则用吸附脱水(如分子筛吸附)、渗透汽化脱水等技术,渗透汽化脱水技术能耗低、分离好、无污染,契合绿色理念,适合高纯度溶剂脱水预处理。

### 3.2 核心回收环节技术选型与设计优化

核心回收环节是溶剂资源循环的关键,技术选型须依待回收溶剂特性(沸点、挥发性、极性)定制。常用回收技术有精馏、膜分离、吸附、萃取等,不同技术绿色特性与适用范围不同,详见对比表1。

表1 不同回收技术绿色特性与适用范围

回收技术	核心原理	绿色化特性	适用范围
精馏	基于组分沸点差异实现分离	技术成熟,回收率高;传统精馏能耗高,绿色化改进后(如热泵精馏、膜精馏)能耗显著降低	适用于沸点差异较大的混合溶剂体系,应用范围广
膜分离	基于膜的选择性渗透实现分离	能耗低、无二次污染,操作简单;膜材料成本较高,需定期更换	适用于低浓度溶剂回收、同分异构体溶剂分离等
吸附	基于吸附剂对溶剂的选择性吸附实现分离	设备简单、能耗低;吸附剂再生过程可能产生二次污染,需优化再生工艺	适用于低浓度挥发性溶剂回收(如VOCs溶剂)
萃取	基于溶剂在萃取剂中溶解度差异实现分离	分离效率高;需选择环境友好的萃取剂,避免二次污染	适用于难分离的混合溶剂体系、高浓度溶剂回收

### 3.2.1 热泵精馏技术设计与优化

热泵精馏技术利用热泵原理,将低品位能量提升至高温状态,为精馏过程提供所需热量。它是在传统的精馏工艺基础上所作的改进,通过热泵循环系统的运作,将环境中较低温度的热量转移到蒸馏塔中,提供蒸汽以驱动精馏过程,从而实现节能、环保、高效的目标<sup>[3]</sup>。传统的精馏过程通常需要使用化石燃料,如燃煤或燃油,这会产生大量的二氧化碳、氮氧化物和其他有害气体。而热泵精馏技术利用可再生能源或废热源提供热能,减少化石燃料的消耗,从而减少温室气体的排放和环境污染<sup>[4]</sup>。热泵精馏工艺的绿色化设计需重点关注以下优化要点:一是要根据不同工艺流程的热能需求特点,结合热泵技术的原理和优势,进行路径选择和系统优化。在选择热泵路径方案时,需要考虑热能源的供给方式、温度要求、回收利用的可行性等因素,确保选取合适的热泵路径方案。对于沸点较低的溶剂体系,优先选择蒸汽压缩式热泵,通过合理的热能互换和能量优化设计,充分利用热源和热汇的温度差,提高热泵系统的运行效率;二是用流程模拟软件(如 Aspen Plus)优化精馏塔操作参数(回流比、塔板数等),确定最优组合以降耗且保回收率;三是采用高效传热设备(如高效换热器等)提升传热效率、降低热量损失。图1为绿色化热泵精馏溶剂回收工艺流程图。

### 3.2.2 膜分离技术设计与优化

膜分离技术具备能耗低、操作便捷、无二次污染等优势,在低浓度及难分离溶剂回收中价值显著。其绿色化设计核心是去优化操作参数以及精准选型。材料的选型方面,除了考虑溶剂的分子尺寸、极性等关键因素,同时要具备高渗透性且兼具良好容积性能的膜材料,对于极性溶剂体系,优先选择聚酰亚胺适配的膜材料等,非极性溶剂优先选择聚二甲基硅氧烷等膜材料;在参数优化方面,重点调控压力、温度、进料流速,通过实验精准确定各参数的最优范围,以提高分离效率,降低能耗。

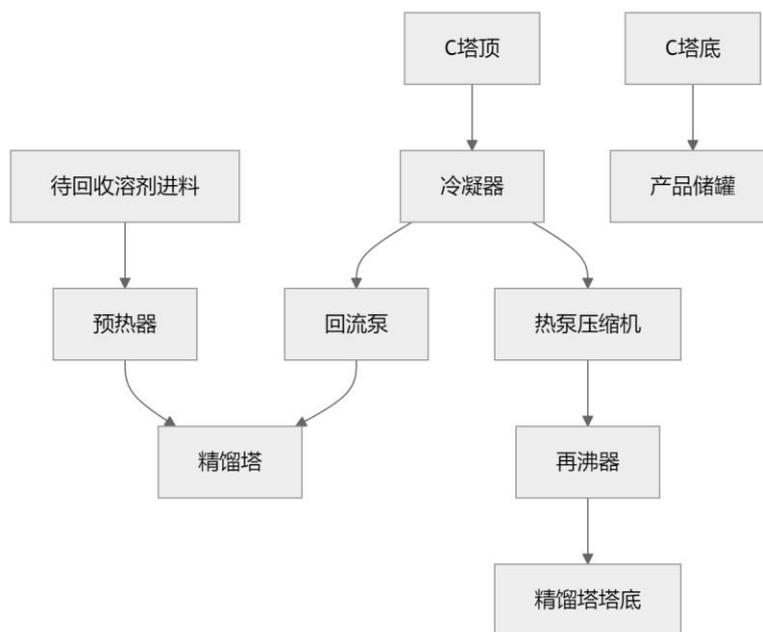


图1 绿色化热泵精馏溶剂回收工艺流程图

### 3.3 精制提纯环节设计

核心回收环节所得溶剂或含少量杂质，不满足化工生产纯度要求，故需设计精制提纯环节<sup>[5]</sup>。其绿色化设计遵循“低能耗、无二次污染”原则，优先采用物理提纯，不使用化学试剂。对纯度要求高的溶剂（如电子级、医药级），可用精密精馏（优化塔板结构、增理论塔板数提分离精度）、膜分离精制、吸附精制（选高性能吸附剂如活性炭、分子筛除微量杂质）等技术，该系统具备集成核心回收模块与精制提纯工序的能力，通过构建热量和物料的循环利用体系，切实降低能源消耗。

### 3.4 尾气与废液处理环节设计

溶剂回收会产生少量尾气（如挥发性溶剂蒸汽）和废液（如洗涤、膜清洗废水），直接排放会二次污染，违背绿色化工无害化原则，需设计配套处理环节。在尾气处理上，针对少量挥发性溶剂蒸汽的治理，以浓度特性为依据，合理采用差异化的处理技术，例如，对于低浓度的工况，优先选择活性炭吸附法，以此实现高效的吸附与净化。反之，对于高浓度的工况，优先选用催化燃烧技术，降低反应活化能，不仅可实现污染物的深度氧化，而且可以回收燃烧热能；在废液处理上，对于含微量溶剂的洗涤废水，建议采用溶剂萃取法进行资源化回收，处理后的废水经生化处理达标后排放或回用，实现水资源的循环利用。

## 4 绿色溶剂回收工艺设计的挑战与展望

### 4.1 面临的挑战

尽管绿色化工理念为溶剂回收工艺的科学合理设计提供了明确的方向，但是在实际的设计以及应用环节仍然存在一些不足：一是高性能绿色技术与关键材料的匮乏严

重影响绿色溶剂回收工艺设计，以膜分离技术为例，具备耐溶性特性且膜材料的应用成本较高，在一定程度上限制了其在大规模工业场景中的应用；二是复杂溶剂体系回收难度大，针对具有高粘性，多组分高浓度特性的混合溶剂体系。然而，当前现有的回收技术在分离效率方面并不理想，无法实现高效回收的目标，难以有效满足实际生产的需求；三是工艺集成度有待进一步提升，目前多数溶剂回收工艺与主工艺之间缺乏有效的系统集成，导致利用效率降低，造成了不必要的资源浪费。

### 4.2 发展展望

于当前所面临的不足之处，为了顺应绿色化工理念的时代趋势，未来，可加强新型绿色回收技术与材料的创新研发，尤其是在吸附剂、膜材料等核心功能材料方面加大投资研究力度，为了满足溶剂回收过程中对材料性能以及经济的要求，致力于开发具备高选择性分离能力、耐溶性特点以及成本低廉的绿色材料。同时探讨在实际工业领域新型回收技术的应用效果，不断优化工艺参数以及操作条件，以促进溶剂效率的提高。伴随着人工智能、大数据、流程模拟等智能化技术的高速发展，在溶剂回收工艺设计方面融入智能化技术，建立工艺全生命周期的数字孪生模型，模拟不同操作参数下工艺的运行效果，快速确定最优设计方案，确保工艺设计的准确性，提高效率。

积极推动溶剂回收工艺与化工生产主工艺、能源系统以及环保系统进行全流程深度集成，以此达成物料和能源的梯级利用与循环利用目标。例如，基于物质流和能量流的精准分析与优化调控构建“生产-回收-回用-环保”一体化系统，实现系统内资源的优化配置与高效流转，提升整

个化工生产系统的绿色化水准。

## 5 结论

在绿色化工理念的引导下,溶剂回收工艺设计优化,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。本文研究紧密围绕绿色化工的深刻内涵。明确提出系列具有指导性、前瞻性的设计原则,包括通过源头优化与过程控制的深度融合、技术的精准适配、全生命周期的绿色化等。对关键环节进行了深入的剖析,绿色化工艺设计的适宜技术选型以及创新思路,指出当前挑战与未来方向。研究结果表明,溶剂回收工艺的绿色化设计综合考量多维度的因素,通过精准的流程优化、持续的技术创新,从而实现资源的高效利用,降低能源消耗,从而降低对环境的影响,实现可持续发展。展望未来,伴随新型绿色技术与新型材料的深度研发、智能化水平的全面提升以及评价体系的日益完善,在未来的化工生产之中,相信溶剂回收工艺将朝着更高效率、更优环保性能、更强经济性的方向

迈进,为化工行业的绿色转型提供坚实有力的支撑。

## [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,2025,11(12):1-6.
- [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.
- [5]魏奇业,杨树林,魏毓良.乙腈精制过程优化研究[J].化工自动化及仪表,2011,38(9):104-106.

作者简介:魏华兵(1992.1—),毕业院校:河北科技大学,所学专业:化学工程与工艺,当前就职单位:中国电子系统工程第四建设有限公司,职务:工艺安全设计,职称级别:工程师。