

# 制药过程中溶剂回收与循环利用技术的经济性分析

王 瑞

伊犁川宁生物技术股份有限公司 新疆伊宁 835000

**摘 要：**在制药生产过程中，溶剂作为关键辅料被广泛使用，其采购成本与废弃处理成本占据制药总成本的重要比例，同时废弃溶剂排放还会引发环境问题。本文聚焦制药过程中溶剂回收与循环利用技术的经济性，首先梳理了制药行业常用的溶剂类型及回收技术，包括蒸馏法、吸附法、膜分离法等；接着从成本构成与收益维度，深入分析不同回收技术的经济性，涵盖设备投资、运行成本、溶剂再生收益及环保成本节约等方面；最后结合实际应用场景，探讨影响溶剂回收经济性的关键因素，并提出优化建议。研究结果可为制药企业选择适宜的溶剂回收技术、降低生产成本、实现绿色生产提供参考。

**关键词：**制药过程；溶剂回收；循环利用；经济性分析；成本收益

## 引言

制药工业是高附加值、高技术密集型产业，同时也是溶剂消耗与排放大户。在药物合成、提取纯化等核心工序中，乙醇、甲醇、乙酸乙酯等溶剂的使用量巨大，不仅带来高额的采购支出，废弃溶剂的处理还需符合严格的环保标准，进一步增加企业成本。随着“双碳”目标推进与环保法规趋严，制药企业对溶剂回收与循环利用的需求日益迫切。然而，不同回收技术的投资与运行成本差异显著，其经济性直接影响企业的应用意愿。因此，系统分析溶剂回收与循环利用技术的经济性，对推动制药行业降本增效与绿色转型具有重要现实意义。

## 一、制药过程中常用溶剂及回收技术类型

### 1. 常用溶剂类型

制药过程中使用的溶剂需满足纯度高、化学稳定性好、与药物成分相容性适宜等要求，主要分为极性溶剂与非极性溶剂两类。极性溶剂中，乙醇、甲醇因毒性较低、易与水混溶，广泛用于口服制剂与注射剂的生产；乙酸乙酯、丙酮则常用于药物中间体的萃取与分离；二甲基亚砜（DMSO）、N，N-二甲基甲酰胺（DMF）等强极性溶剂，适用于难溶性药物成分的溶解。非极性溶剂如正己烷、甲苯，多应用于脂溶性药物的提取，但因挥发性强、毒性较高，其排放与回收管控更为严格<sup>[1]</sup>。

### 2. 主流回收技术类型

#### （1）蒸馏法

蒸馏法是制药行业最传统、应用最广泛的溶剂回收技术，基于溶剂间沸点差异实现分离提纯，可分为常压

蒸馏、减压蒸馏与精馏。常压蒸馏适用于沸点差异大、稳定性好的溶剂体系，如乙醇-水混合物的分离，设备结构简单、操作便捷；减压蒸馏通过降低体系压力降低溶剂沸点，适用于高温易分解的溶剂回收，如热敏性药物生产中使用的乙醚、四氢呋喃；精馏则通过多层塔板或填料强化分离效果，可实现高纯度溶剂再生，常用于对溶剂纯度要求严苛的注射剂生产环节。蒸馏法的优势在于技术成熟、适应性强，可处理多种混合溶剂体系，但存在能耗较高、设备占地面积大的不足。

#### （2）吸附法

吸附法利用活性炭、分子筛、树脂等吸附剂对溶剂分子的选择性吸附能力实现回收，适用于低浓度溶剂蒸汽的处理，如制药车间尾气中挥发性溶剂的回收。活性炭吸附法成本较低，可快速吸附有机溶剂，但吸附容量有限，需定期再生，且再生过程中易产生二次污染；分子筛吸附法具有高选择性 with 高吸附容量，可在较高温度下保持稳定，适用于极性溶剂如甲醇、乙醇的回收，再生后吸附剂可重复使用；树脂吸附法则通过功能化基团增强对特定溶剂的吸附能力，分离精度高，且再生过程温和，适用于高价值溶剂的回收。吸附法的核心优势是能耗较低、设备紧凑，但吸附剂的定期更换与再生会增加运行成本，且对混合溶剂体系的分离效果有限。

#### （3）膜分离法

膜分离法基于高分子膜或无机膜的选择性渗透作用实现溶剂分离，根据分离机理可分为反渗透、纳滤与渗透汽化。渗透汽化技术在制药溶剂回收中应用最为广泛，尤其适用于共沸混合物或近沸混合物的分离，如乙

醇—水共沸体系，无需添加第三组分，可直接获得高纯度溶剂。膜分离法具有能耗低、分离效率高、无二次污染等优势，且设备模块化设计便于灵活调整处理规模，适用于中小批量、多品种溶剂的回收。但膜材料成本较高，易受溶剂腐蚀或污染物堵塞影响使用寿命，且对进料溶剂的预处理要求严格，需去除悬浮物、胶体等杂质，否则会缩短膜的更换周期<sup>[2]</sup>。

#### (4) 萃取法

萃取法通过加入萃取剂与待回收溶剂形成互不相溶的两相，利用溶剂在两相中分配系数差异实现分离，适用于难分离的混合溶剂体系或含杂质较多的溶剂回收。在制药过程中，常用于含高沸点杂质溶剂的回收，如药物合成废液中DMF与高聚物杂质的分离。萃取法的优势在于分离效率高、可处理复杂体系，且设备投资相对较低，但萃取剂的选择需兼顾选择性、溶解性与后续分离难度，同时萃取剂的回收与循环使用会增加工艺复杂度与运行成本，若萃取剂残留还可能影响再生溶剂的纯度，需额外增加净化工序。

### 二、溶剂回收与循环利用技术的经济性核心维度

#### 1. 成本构成分析

##### (1) 设备投资成本

设备投资成本是溶剂回收技术经济性的基础考量，不同技术的初始投入差异显著。蒸馏法设备包括蒸发器、冷凝器、塔器、储罐等，常压蒸馏设备单套投资较低，而精馏设备因塔板或填料设计复杂，投资成本较高；若需配套减压系统，还需增加真空泵、真空缓冲罐等设备，进一步提升投资。吸附法设备主要包括吸附塔、再生装置、风机等，单套投资低于蒸馏法与膜分离法，但大规模应用时需多组吸附塔交替运行，总投资会相应增加。膜分离法的核心成本在于膜组件，尤其是高性能无机膜或专用高分子膜，单支膜组件价格较高，且需配套预处理设备与增压系统，初始投资显著高于传统蒸馏法与吸附法。萃取法设备包括萃取塔、分离罐、溶剂回收塔等，投资规模介于吸附法与膜分离法之间，具体取决于萃取体系的复杂程度与处理规模。

##### (2) 运行成本

运行成本是影响长期经济性的关键，主要包括能耗、耗材、人工与维护成本。蒸馏法的能耗占比最高，尤其是精馏与减压蒸馏，需消耗大量蒸汽或电力用于加热与真空维持，处理高沸点溶剂时能耗进一步攀升；同时，设备的定期清洗、塔板维护也会增加维护成本。吸附法的能耗主要集中在吸附剂再生环节，如活性炭的热再生

需消耗热能，分子筛的变压再生需消耗电力，但整体能耗显著低于蒸馏法；运行成本的核心是吸附剂的更换成本，活性炭更换周期较短，长期运行成本较高，而分子筛与树脂的使用寿命较长，可降低耗材支出。膜分离法的能耗主要用于进料增压与膜组件的温度控制，整体能耗较低，但膜组件的更换成本较高，且需定期进行膜清洗维护，使用专用清洗剂进一步增加运行成本。萃取法的运行成本主要包括萃取剂采购与再生成本，若萃取剂可高效循环利用，成本可大幅降低，否则会成为主要支出项。

##### (3) 环保与合规成本

环保与合规成本是制药企业不可忽视的隐性成本，包括废弃溶剂处理成本与环保设施运行成本。若不进行溶剂回收，企业需将废弃溶剂交由有资质的危废处理机构处置，根据溶剂类型与处理量支付高额处置费用，且处置过程需符合《危险废物贮存污染控制标准》等法规要求，配套建设贮存设施；同时，废弃溶剂排放若超出环保标准，还可能面临罚款与停产风险。溶剂回收技术的应用可大幅减少危废产生量，降低处置成本，同时减少挥发性有机物（VOCs）排放，避免因VOCs超标产生的环保处罚<sup>[3]</sup>。

#### 2. 收益构成分析

##### (1) 溶剂再生收益

溶剂再生收益是回收技术最直接的经济回报，即通过回收再生减少新溶剂采购支出。高价值溶剂如DMF、DMSO，市场价格较高，回收再生后可直接替代新溶剂用于生产，显著降低采购成本；即使是乙醇、乙酸乙酯等常规溶剂，长期循环利用也能带来可观的成本节约。例如，某口服制剂企业通过精馏法回收乙醇，再生乙醇纯度可达99.5%，满足生产要求，每年可减少新乙醇采购量数千吨，按市场价格计算，年节约采购成本数百万元。溶剂再生收益的高低取决于溶剂的市场价格、回收率与再生纯度，回收率越高、溶剂价值越高，收益越显著。

##### (2) 能耗与资源节约收益

部分回收技术通过优化能源利用实现间接收益。膜分离法、吸附法的能耗显著低于传统蒸馏法，长期运行可减少电力或蒸汽消耗，降低能源成本；同时，溶剂回收减少了新鲜溶剂的生产与运输环节，间接降低了溶剂全生命周期的能源消耗与碳排放，符合碳交易市场趋势下的绿色收益。

### 三、影响经济性的关键因素与优化策略

#### 1. 关键影响因素

##### (1) 溶剂特性与回收规模

溶剂的物理化学特性直接决定回收技术的选择与效率，高沸点、热敏性溶剂需采用减压蒸馏或膜分离法，增加投资与运行成本；而低浓度、易挥发溶剂更适合吸附法，经济性更高。回收规模则影响单位处理成本，大规模溶剂回收可通过设备满负荷运行摊薄投资成本，降低单位能耗与人工成本，如大型原料药企业的溶剂回收线，因处理量大，单位溶剂回收成本显著低于中小型制剂企业；反之，小规模、间歇式回收则因设备利用率低，单位成本较高，经济性较差。

### (2) 技术成熟度与操作管理

技术成熟度影响设备故障率与运行稳定性，蒸馏法等传统技术因应用时间长，操作经验丰富，维护成本较低；而膜分离法、新型吸附技术等新兴技术，虽具有能耗优势，但技术门槛较高，需专业人员操作与维护，若操作不当易导致膜堵塞、吸附剂失效，增加运行成本。此外，企业的操作管理水平也会影响经济性，如定期设备维护可延长使用寿命，优化工艺参数可提升溶剂回收率与纯度，减少浪费；反之，设备故障频发或工艺参数不合理，会导致回收效率下降，增加成本支出。

### (3) 政策环境与市场波动

政策环境对经济性的影响主要体现在环保法规与补贴政策，环保标准趋严会提高废弃溶剂处置成本，间接提升回收技术的经济性；而地方政府的补贴或税收优惠可直接降低初始投资或运行成本，缩短投资回报周期。市场波动则通过溶剂价格与能源价格影响收益，溶剂价格上涨时，再生溶剂的成本优势更显著；能源价格上涨则会增加蒸馏法等高能耗技术的运行成本，而对膜分离法、吸附法等低能耗技术更有利。

## 2. 经济性优化策略

### (1) 技术组合与工艺优化

针对复杂溶剂体系，采用多技术组合可提升回收率与经济性。例如，先通过吸附法浓缩低浓度溶剂蒸汽，再通过蒸馏法提纯，既降低蒸馏法的处理量与能耗，又提升吸附法的处理效率；或采用“膜分离+精馏”组合工艺，利用膜分离突破共沸限制，再通过精馏进一步提升溶剂纯度，兼顾低能耗与高纯度。同时，优化工艺参数可提升经济性，如蒸馏法中优化加热温度与回流比，减少能耗；吸附法中优化吸附时间与再生条件，延长吸附剂寿命；膜分离法中加强进料预处理，减少膜污染，延长膜组件使用寿命<sup>[4]</sup>。

### (2) 规模化与集约化运营

对于中小型制药企业，可通过联合回收或第三方运营实现规模化效益。多家企业共建共享溶剂回收中心，集中处理废弃溶剂，摊薄设备投资成本，提升处理规模；或委托专业第三方环保企业运营溶剂回收设施，企业无需承担设备投资与维护成本，仅按处理量支付费用，降低运营风险。对于大型企业，可实现溶剂回收与生产工艺的一体化设计，将回收溶剂直接接入生产流程，减少储存与运输环节，降低成本。

### (3) 政策利用与风险管控

企业应积极关注并利用政策支持，如申请绿色制造补贴、环保专项基金，争取税收减免，降低初始投资；同时，加强环境风险管理，确保回收过程符合环保法规，避免处罚。针对市场波动风险，可通过长期合同锁定溶剂采购价格与能源供应价格，减少价格波动对经济性的影响。

## 结语

制药过程中溶剂回收与循环利用技术的经济性，是企业平衡成本、环保与效益的关键。从成本构成看，设备投资、运行成本与环保成本共同决定初始投入与长期支出；从收益维度看，溶剂再生、能耗节约与环保成本降低形成多重回报。蒸馏法、吸附法、膜分离法等技术各有优劣，其经济性受溶剂特性、回收规模、政策环境等多因素影响。通过技术组合优化、规模化运营与政策利用，可有效提升回收技术的经济性。未来，随着环保法规进一步趋严与低能耗回收技术的发展，溶剂回收与循环利用将成为制药企业降本增效、实现绿色可持续发展的重要路径，其经济性与环境效益将进一步凸显。

## 参考文献

- [1] 乔坤, 李纪胜. 制药行业溶剂回收工艺的残留风险评估与质量保证策略[J]. 国际全科医学, 2025(4).
- [2] 李彦菊, 赵华, 胡永琪, 等. 新型分离法回收制药废液中的硅醚, 二氯甲烷等有机剂[C]// 第三届全国化学工程与生物化工年会. 0[2025-11-03].
- [3] 朱华旭, 唐志书, 段金庭, 等. 面向清洁生产的中草药制药过程废水资源化循环利用基本思路及其关键技术[J]. 中草药, 2017, 48(20): 6.
- [4] 尹阳阳. 中药渣气化循环利用系统的生命周期评价——以山东步长制药有限公司为例[J]. 云南民族大学学报: 自然科学版, 2019, 28(4): 6.