

化工过程强化技术在精细化工中的应用及经济性

姚化鹏 郭迎春（山东博泰特安全技术有限公司，山东 聊城 252000）

摘要：精细化工作为化工产业的重要分支，因其产品具有高附加值、技术密集等特点，在国民经济中占据着举足轻重的地位。然而，传统精细化生产过程往往面临着反应效率低、能耗高、设备占地面积大、三废排放严重等诸多问题，严重制约了产业的进一步发展。在此形势下，化工过程强化技术应运而生，成为推动精细化产业升级的关键力量。本文主要研究化工过程强化技术在精细化过程（如反应流程、分离流程等）中的应用，并就其经济性进行分析，以期为精细化产业经济创收，实现可持续发展提供技术支持。

关键词：化工过程强化技术；精细化；应用；经济性分析

0 引言

精细化是化学工业的一个重要分支，其产品附加值高、性能好、批量小，在医药、农药、染料、香料、电子化学品等领域有着广泛的应用。由于传统精细化工艺存在的众多问题，难以适应现代社会对绿色、高效和可持续发展的需求。化工过程强化技术这一新兴的技术理念，其目的是通过深入研究化工过程的本质，利用先进的技术与方法，彻底改变传统的化工流程，达到高效、节能、环保、经济的目的。

1 化工过程强化技术概述

过程强化是指在实现既定生产目标的前提下，大幅减少生产设备的尺寸，减少生产装置的数量、从而使工厂布局更加紧凑，节省占地面积，在此基础上，提高能量利用效率，降低单位能耗，减少废物排放，避免副产品的生成，最终达到降低生产成本、提高生产效率、改善安全性、减少环境污染的目的。化工过程强化技术的主要方法如下：

1.1 设备强化

设备强化，即开发新的化工设备，改进现有设备结构，提高设备性能。比如，以微反应器缩短反应时间、提高选择性与产率。如板式换热器、螺旋板换热器等新型高效换热器，其换热系数高，结构紧凑，可有效降低设备占地面积，降低能源消耗。

1.2 过程集成

将多种化工生产单元的操作有机结合在一起，形成更高的效率和更高的协同性。如反应—分离一体化技术，即在同一装置或系统内同时进行反应与分离，使产物及时分离，打破平衡限制，提高转化率与产率。又如热量整合技术，对化工生产过程中产生的废热进行合理利用，达到梯级利用的目的，降低外部能量需求，减少能源消耗。

1.3 新型材料与催化剂的应用

新型功能材料与高效催化剂的开发与应用，对化工过程性能的提升具有重要意义。如新型吸附剂及膜材料，其选择性高，吸附量大，分离效率高；而高效催化剂可有效降低反应活化能，提高反应速度和选择性，实现反应条件温和，降低能耗，降低设备投资。

2 化工过程强化技术在精细化中的应用

2.1 在精细化反应过程中的应用

2.1.1 微反应器技术

微反应器以其独特的微观结构，为精细化反应提供了新途径，显示出传统反应器所不具备的优势。在快速反应体系中，如硝化反应和重氮化等反应条件十分敏感，传统搅拌釜反应器因混合效率低，反应物不能均匀混合，易出现局部过热现象。而微反应器技术，其独特的微尺度结构，使反应物即时高效混合，配合精密控温系统，使反应环境始终保持在理想状态。以芳烃类化合物的硝化反应为例，在常规反应器中，反应时间长，副产物多。采用微反应器技术，可以将反应时间缩短至数分钟，并大幅提高目标产物的选择性，大大降低副产物的产生，对精细化具有重要意义^[1]。

2.1.2 反应—分离集成技术

在众多的化学反应中，可逆反应因受化学平衡的制约，很难达到理想的转化率，针对酯化、酯交换等典型可逆反应，利用反应—分离集成技术是解决该问题的关键。反应—分离集成技术的核心是将反应和分离有机结合，及时去除反应产物，打破原有反应平衡，使反应向正向方向发展。以酯化为例，反应精馏就是该思想的典型应用，该工艺采用精馏装置同步操作，利用各组分沸点差实现酯与水的连续分离。随着产物的不断移除，反应平衡不断向正向方向进行，使酯化反应的效率与产率得到显著提高。

2.2 在精细化工分离过程中的应用

2.2.1 膜分离技术

膜分离作为一种重要的分离技术，因其独特的膜选择性通过特性而展现出诸多优异性能。高效性表现为能够快速、准确地分离混合物，大大缩短分离流程的时间；从节能角度看，与传统的分离方式相比，无需大量的能量投入即可实现物质状态的变化，有效减少能量消耗；而无相变特性则可以避免由于材料状态的改变而引起的性能变化等潜在问题。膜分离是精细化工领域中应用最广的一项技术，尤其是在医药行业。超滤膜是一种精确的“筛子”，它可以根据分子尺寸对蛋白质、多肽等生物大分子进行精确分离与富集，为医药研究与生产提供高纯度的原材料^[2]。反渗透膜作为严格的“净化卫士”，能有效除去水中的盐分、杂质等杂质，配制出符合高标准的注射水，从而保证药品的质量与安全。

2.2.2 吸附分离技术

随着新型吸附剂的不断开发和应用，吸附分离技术在精细化工中的地位越来越重要。新型吸附剂的开发为精细化学品的分离纯化提供了新的契机与突破口。其中，金属—有机框架（MOFs）材料是这类材料中最具代表性的一类，这种材料的比表面积很大，相当于一个巨大的“吸附平台”，可以为目标分子提供更多的吸附位置，从而增加与目标分子接触的概率。同时，其孔道可调的孔道结构可作为“智能通道”，可根据不同分子的尺寸、形貌及性能实现精确调控，实现对特定气体或液体分子的高选择性吸附。金属有机框架（MOFs）材料在精细化学品生产中占有重要地位。对于杂质的去除，它就像一个“吸附能手”，牢牢地吸附住产品中的杂质分子，有效提高产品的纯度；在富集目标产物的过程中，它还能像“精确采集器”一样，对目标产物进行富集，提升产品品质。

2.3 在精细化工传热、传质过程中的应用

2.3.1 强化传热技术

高效传热技术与装备是精细化工过程优化的关键，随着对产品精细化、高质化生产的需求，传统换热方法已不能满足化工生产日益增长的要求，强化换热技术应运而生。微型换热器独特的结构设计，有限空间内的流体换热更加充分，使换热效率大大提高。与传统换热器相比，该结构可实现同等换热任务，且换热面积更小，设备占地面积更小，制造成本更低。强化换热表面是从微观角度出发，通过对换热表面进行特殊处理或结构设计，增加流体与换热界面间的接

触与扰动，进一步提升换热效果。该方法可以加速传热，也能有效防止局部过热和过冷，保证了反应过程的稳定。微通道换热器在精细化工过程精确控制温度方面具有不可替代的作用。其微通道结构可在极短时间内实现温度均匀分布，对温度的快速响应，为化学反应提供稳定的温度环境。该技术应用可以提高反应的转化率、选择性，还可以保证产品质量与稳定，从而提高精细化工产品的市场竞争力和经济效益。

2.3.2 强化传质技术

质量传递在精细化工过程中具有重要作用，通过改进传质装置结构与运行模式，可大幅提升传质效率，优化生产流程。首先，新型填料塔和板式塔在气—液传质方面表现出优异的性能；通过选择结构化填料、新型高效填料等高性能填料，增加气—液接触面积，实现了气液两相在填料表面的充分接触与传质。同时，优化后的塔盘结构可以改善气液分配，增强传质推动力，提高传质效率。其次，在板式塔中引入了新的溢流堰和降液管，以强化气—液两相传质。这些改进措施能有效地降低返混现象，提高塔内传质效率，显著提高了塔器的整体性能。最后，对搅拌装置进行优化设计，对强化传质具有重要意义。通过对搅拌桨形状、尺寸及转速的合理设计，可强化混合效果，促进溶质在溶剂中的分布更均匀，促进传质过程。此外，部分先进搅拌设备还配有智能控制系统，可根据不同生产要求实时调节搅拌参数，进一步提高了产品的传质效率与灵活性。

3 化工过程强化技术在精细化工中应用的经济性分析

3.1 经济性分析模型的构建

为全面评价精细化工过程强化技术的经济性，需要建立综合经济分析模型，该模型需综合考虑设备的投资费用、操作费用和生产效益。

3.2 投资成本

设备购置费用：以某具有代表性的精细化工企业为例，年生产能力为5000t精细化工产品，其主要生产设备如釜、蒸馏塔等设备可能需要1500万元。如采用微反应器等化工过程强化工艺，则可能额外增加300万元的购置成本；膜分离设备的总投资约为500万至800万元。

安装费用：对于传统生产设备（如反应釜、蒸馏塔等）的安装，费用通常包括设备运输、现场安装、调试及验收等环节。根据设备类型、规模和安装复杂度，传统设备安装费用约占总设备投资的10%至20%。采用化工过程强化工艺后，新增的设备（如微

反应器、膜分离设备等)将带来额外的安装费用。

土建费用:根据场地的规模与复杂性,假定该公司的场地面积为10000m²,其建设成本约为300万元。

3.3 运行成本

能源消耗费用:根据生产规模及工艺要求,采用传统的工艺流程,一年能耗约在800万元左右。例如,在微反应器中,由于高效的热质传递特性,每年可节约能源费用30%左右,即节省 $800 \times 30\% = 240$ 万元。
能源消费支出=单位产品能源消耗×年能源价格。

原材料消耗费用:每年的原材料费用随产品类型及原材料价格的变动而变动,在传统工艺下,年成本在3000万元左右。采用化工工艺强化工艺,可使原料成本降低15%左右,即节省 $3000 \times 15\% = 450$ 万元,具有较高的经济效益。

劳动力成本:根据公司的规模、员工工资等因素,公司年用工成本在1000万元左右。一个高度自动化的微反反应器系统,每年可节省约20%的人工费用,即节省 $1000 \times 20\% = 200$ 万元。

设备维护保养费用:根据设备的种类、复杂程度等因素,传统设备一年的维修费用在200万元左右。采用化工过程强化工艺,可使设备维修费用减少15%左右,即 $200 \times 15\% = 30$ 万元。

3.4 产品收益

假设年生产1000t,单价100,000元/吨,年销售额为1亿元。化工过程强化技术可以提高产品的质量,提高产品的产量。品质越好,价格也就越高,假如价格上涨10%,达到 $10 \times (1+10\%) = 110,000$ 元/吨,年销售额就会上升到 $1150 \times 11 = 12.65$ 亿元。

4 经济评价指标分析

4.1 净现值(NPV)

NPV是指在项目计算期内,按设定的折现率将各年净现金流量折现到建设期初的现值之和。计算公式为:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CI_t - CO_t}{(1+i)^t},$$

其中 CI_t 为第t年的现金流入, CO_t 为第t年的现金流出, i 为折现率, n 为项目计算期。假设考虑未来五年的现金流,折现率为10%,经过计算得到NPV为500万人民币,表明项目在五年内能够产生额外的净收益。

4.2 内部收益率(IRR)

IRR是使项目净现值为零时的折现率。通过求解方程 $\sum_{t=0}^n \frac{CI_t - CO_t}{(1+IRR)^t} = 0$ 得到。假设该项目的IRR为

20%,高于行业基准收益率15%,表明项目的盈利能力较强。

4.3 投资回收期(PBP)

PBP是指项目从开始投资到收回全部投资所需要的时间。计算公式为: $PBP = \frac{\text{初始投资}}{\text{每年净现金流量}}$ 。假设该项

目初始投资为2000万人民币,每年净现金流量为666.67万人民币(假设值),则 $PBP = 2000 \div 666.67 \approx 3$ 年,低于行业基准投资回收期5年,表明该项目能够在较短时间内收回投资。

5 敏感性分析

实际的经济评价结果会受到多种因素的影响,如产品价格波动、原材料市场变化、技术更新换代等。假设产品价格下降10%,即单价变为 $10 \times (1-10\%) = 9$ 万元/吨,年销售额变为 $1000 \times 9 = 9000$ 万元,经过重新计算,NPV可能减少至300万人民币;假设原材料价格上涨20%,即每年原材料费用变为 $3000 \times (1+20\%) = 3600$ 万元人民币,NPV可能减少至200万人民币。

6 结语

化工过程强化技术在精细化工领域的应用,为提高生产效率、节能减排和提高产品质量提供了重要支持。通过采用各项技术方法,精细化工行业显著提升生产效率和经济效益,减少能源消耗和废弃物排放。通过构建综合的经济性分析模型,全面评估化工过程强化技术在精细化工中的经济性。结果表明,虽然该技术可能带来较高的初始投资成本,但在运行成本降低和产品收益增加方面优势显著,长期来看具有良好的经济效益。敏感性分析揭示了项目面临的经济风险,为企业决策提供重要参考。化工过程强化技术在实际应用时,应充分考虑各种因素的影响,以实现经济效益最大化。

参考文献:

- [1] 张仕凯,罗沧海,郑园,等.微反应器强化传热传质在化工过程的应用[J].能源环境保护,2023,37(5):174-182.
- [2] 邓明芳.精细化工过程控制技术及其发展趋势分析[J].中国化工贸易,2021(23):39-40.

作者简介:

姚化鹏(1984—),男,汉族,山东聊城市东阿人,本科,中级职称,区域经理,研究方向:危险化学品企业生产安全管理、企业安全诊断、隐患排查。

郭迎春(1988—),女,汉族,山东聊城市东阿人,本科,中级职称,过程控制负责人,研究方向:安全评价、企业安全诊断、隐患排查。