

# 1,4-丁二醇生产工艺的优化研究

金开来

河南开祥精细化工有限公司 河南 三门峡 472300

**摘要:** 本文分析了1,4-丁二醇主流生产工艺,包括Reppe法、丁二烯法、顺酐加氢法、生物法的原理、优势与瓶颈,探讨了工艺优化的关键矛盾,如催化剂活性与寿命平衡等。提出催化剂体系优化、反应工艺改进、过程强化与集成技术等优化策略,并展望了绿色化、低碳化、智能化、集成化等未来技术发展趋势。

**关键词:** 1,4-丁二醇; 生产工艺; 工艺优化; 催化剂体系; 未来趋势

**引言:** 1,4-丁二醇作为重要化工原料,应用广泛。随着市场发展,对其生产工艺优化需求迫切。当前,Reppe法、丁二烯法、顺酐加氢法、生物法等主流工艺各有特点与不足。深入研究各工艺现状,剖析优化关键矛盾,探索有效优化策略,对提升1,4-丁二醇生产效率、降低成本、推动产业可持续发展意义重大。

## 1 1,4-丁二醇生产工艺现状分析

### 1.1 主流生产工艺概述

#### 1.1.1 Reppe法(炔醛法)的原理与瓶颈

Reppe法以乙炔和甲醛为原料,经炔化反应生成1,4-丁炔二醇,再通过加氢转化为1,4-丁二醇。此工艺原料来源广泛,应用历史久。但所用催化剂对杂质敏感,微量硫化物、磷化物即导致活性位点中毒,缩短使用寿命。乙炔易燃易爆,生产中需严格控制温度与压力,高温易引发乙炔分解爆炸,压力失控也会带来安全隐患。

#### 1.1.2 丁二烯法(ACRO法)的技术特点

丁二烯法以丁二烯为起始原料,经卤化、水解、氢化等多步反应制得产品。该工艺反应条件温和,对设备材质要求低,可降低投资成本。丁二烯从石油裂解产物获取,原料供应稳定。然而其工艺流程冗长,中间产物分离困难,需结合精馏、萃取等多种方法,增加设备投资与能耗,操作管理复杂。

#### 1.1.3 顺酐加氢法的工艺优势与挑战

顺酐加氢法以顺丁烯二酸酐为原料,经催化加氢制备1,4-丁二醇。顺酐性质稳定,便于储运,反应原子利用率高,副产物少,产物纯度能满足高端市场需求。但反应需高温高压,设备耐压耐高温要求高,长期运行损耗大,维护成本高。且催化剂在高温下易烧结失活,影响工艺连续性。

#### 1.1.4 生物法(发酵法)的潜在发展方向

生物法利用微生物发酵代谢,以可再生生物质合成1,4-丁二醇,生产绿色环保,能耗低,设备要求低。但目前存在产物浓度低、发酵周期长问题,大规模生产需更大设备与更长时间,成本较高。微生物菌种变异、杂菌污染也影响产量。不过,基因工程改造菌株、优化发酵条件,有望提升生产效率,成为未来重要发展方向。

### 1.2 工艺优化的关键矛盾

#### 1.2.1 催化剂活性与寿命的平衡

催化剂影响1,4-丁二醇生产经济性。高活性催化剂可加快反应速率,但稳定性差,活性组分易团聚流失,导致快速失活,增加更换成本与操作复杂性。若为延长寿命降低活性组分负载或调整配方,又会牺牲活性,难以实现高效生产,平衡两者是工艺优化难题。

#### 1.2.2 反应条件(温度、压力)对产物分布的影响

温度和压力显著影响反应过程。升温虽加快反应速率,但易引发副反应,降低产物选择性,增加分离成本<sup>[1]</sup>。不同反应步骤对压力需求不同,加氢反应中,压力过高影响分离且有安全风险,压力过低则转化率不足,精确调控温度压力对优化产物分布至关重要。

#### 1.2.3 分离纯化过程的能耗与效率

生产后的分离纯化需获取高纯度产品。蒸馏分离需大量热能,产物与杂质沸点相近时,多级蒸馏塔串联进一步增加能耗,且设备投资大、操作复杂。萃取分离中,萃取剂选择困难,部分萃取剂有毒且难回收,多次萃取操作也降低效率,提升分离效率、降低能耗是关键。

#### 1.2.4 副反应的抑制与产物选择性提升

副反应降低原料利用率,增加分离难度与成本。原料杂质、温度波动、催化剂失活都可能引发副反应。优化反应条件可减少副反应,但难以杜绝。现有催化剂难以实现绝对选择性,探索新型催化体系与反应路径,是抑制副反应、提高产物选择性的重要方向。

## 2 工艺优化策略与技术创新

### 2.1 催化剂体系优化

#### 2.1.1 催化剂活性组分设计(金属负载型、复合催化

剂等)

在1,4-丁二醇生产中,催化剂活性组分设计是提升催化性能的核心。金属负载型催化剂通过将活性金属分散于载体表面,可增加活性位点数量。例如将钯、铜等金属负载在氧化铝、二氧化硅等载体上,金属与载体间的相互作用能改变金属的电子结构,优化反应物吸附与转化过程。复合催化剂则结合两种或多种金属或金属氧化物的特性,实现协同催化效果。不同金属活性组分对反应的选择性存在差异,通过合理配比,可使催化剂在提高反应速率的同时,精准抑制副反应,提升1,4-丁二醇的产率与纯度。

### 2.1.2 载体改性对催化性能的影响

载体性能直接影响催化剂活性组分的分散度与稳定性。对载体进行改性可从多方面优化催化性能。通过物理改性,如调整载体的孔径大小与孔隙结构,能控制反应物分子在催化剂内部的扩散路径与停留时间,促进反应充分进行。化学改性则可改变载体表面的酸碱性、电子性质,增强载体与活性组分的相互作用,防止活性组分团聚与流失。例如采用酸碱处理、表面涂层等方式对载体进行改性,可有效改善催化剂的抗中毒能力,延长其使用寿命,使催化剂在复杂反应体系中保持稳定的催化活性。

### 2.1.3 催化剂再生与稳定性提升技术

催化剂在使用过程中会因积碳、中毒等原因失活,催化剂再生技术成为降低成本、维持工艺连续性的关键。常见的再生方法包括热再生、化学再生。热再生通过高温焙烧去除催化剂表面的积碳等杂质,但高温可能影响活性组分结构与载体性能。化学再生则利用特定化学试剂与杂质反应,实现活性位点的恢复。为提升催化剂稳定性,可从活性组分与载体的协同设计入手,开发具有抗烧结、抗中毒特性的新型催化剂材料,通过优化制备工艺,控制活性组分的粒径与分布,增强催化剂在苛刻反应条件下的稳定性,减少再生频率,降低生产综合成本。

## 2.2 反应工艺改进

### 2.2.1 反应器设计优化(固定床、流化床、微反应器等)

不同类型反应器在1,4-丁二醇生产中各有优劣。固定床反应器结构简单,催化剂不易流失,适用于催化反应速率较慢、需要较长反应时间的过程。但其传热性能较差,易出现局部过热现象,影响反应选择性与催化剂寿命。流化床反应器通过气体或液体使催化剂颗粒呈流化状态,强化了传质传热效果,可实现快速反应与连续生

产,但催化剂磨损严重,需频繁补充。微反应器凭借其微小的通道尺寸,极大提升了传质传热效率,能够实现反应条件的精准控制,特别适合对反应温度、压力敏感的反应过程,可有效减少副反应发生,提高产物收率与纯度,但其放大生产存在一定技术挑战。

### 2.2.2 反应条件精准调控(温度梯度、压力动态平衡)

精准调控反应条件是优化1,4-丁二醇生产的重要手段。温度梯度控制可根据反应进程优化反应温度<sup>[2]</sup>。在反应初期,适当提高温度以加快反应速率;随着反应进行,降低温度抑制副反应发生。通过在反应器内设置不同温度区域或采用分段控温技术,实现温度的精准调节。压力动态平衡则需根据反应步骤与物料特性进行调整。加氢反应中,依据氢气消耗速率与产物生成情况,实时调节反应压力,既能保证反应充分进行,又可避免压力过高带来的安全风险与能耗增加,确保反应在高效、安全的条件下运行。

### 2.2.3 反应-分离耦合工艺的探索

反应-分离耦合工艺将反应与分离过程结合,打破传统反应平衡限制,提升生产效率。在1,4-丁二醇生产中,可采用膜反应技术,利用选择性渗透膜将反应生成的产物及时分离出反应体系,促使反应向正反应方向进行,提高原料转化率。也可通过反应精馏技术,在精馏塔内同时进行反应与分离操作,利用精馏过程不断移除低沸点副产物,减少副反应发生,实现反应与分离的协同优化,降低设备投资与能耗,简化工艺流程,提高整体经济效益。

## 2.3 过程强化与集成技术

### 2.3.1 能量集成与余热回收技术

能量集成与余热回收是降低1,4-丁二醇生产能耗的关键。生产过程中存在大量不同品位的热能,通过能量集成技术,可将高温反应产生的热能用于预热原料、驱动其他需热单元,实现能量的梯级利用。余热回收技术则针对反应后排出的高温物料与气体,采用换热器、余热锅炉等设备回收其中的热量,用于产生蒸汽或加热其他介质,减少外部能源消耗。合理设计能量回收网络,优化各单元间的能量匹配关系,可显著降低生产过程的能耗,提高能源利用效率。

### 2.3.2 膜分离、吸附分离等新型分离技术的应用

新型分离技术为1,4-丁二醇分离纯化提供新途径。膜分离技术利用膜的选择性透过特性,实现不同组分的分离。纳滤膜、反渗透膜可在常温下操作,避免传统蒸馏过程的高能耗,且分离效率高,能有效去除小分子杂质与盐分。吸附分离则利用吸附剂对特定组分的吸附特

性,通过选择合适的吸附剂与吸附-脱附工艺,可实现目标产物与杂质的高效分离。与传统分离技术相比,新型分离技术具有能耗低、操作简便、分离效果好等优势,可提高产品质量,降低生产成本与环境污染。

### 2.3.3 工艺流程的模块化与智能化设计

工艺流程的模块化与智能化设计提升生产灵活性与管理效率。模块化设计将生产过程分解为多个功能独立的模块,每个模块可独立运行与维护,方便工艺调整与设备更换。通过组合不同模块,可快速适应原料变化与产品需求调整。智能化设计则借助传感器、自动化控制系统与数据分析技术,实时监测生产过程参数,根据设定目标自动调整反应条件、设备运行状态。利用人工智能算法对生产数据进行分析优化,提前预判设备故障与工艺异常,实现生产过程的精细化管理,提高生产效率与产品质量稳定性。

## 3 未来技术发展趋势展望

### 3.1 绿色化与低碳化方向

#### 3.1.1 生物质基BDO工艺的产业化前景

生物质基1,4-丁二醇(BDO)工艺以可再生生物质为原料,从源头上降低对化石资源的依赖。通过基因工程改造微生物,可构建高效合成BDO的工程菌株,提高发酵过程的产物浓度与转化率。木质纤维素、淀粉等生物质经预处理后,能被微生物有效利用,避免与粮食作物竞争资源。产业化过程中,需突破生物质原料高效转化、发酵液低成本分离纯化等关键技术。开发新型膜过滤与吸附分离组合工艺,可简化下游处理流程;优化发酵罐设计与工艺参数,能提升规模化生产稳定性,推动生物质基BDO工艺从实验室走向工业化。

#### 3.1.2 氢能耦合与电化学生成路径探索

氢能耦合技术为BDO生产提供低碳解决方案。以氢气替代传统还原剂,应用于加氢反应环节,可显著降低碳排放。结合可再生能源制氢技术,实现全流程绿色生产。电化学生成路径则利用电能驱动反应,在温和条件下进行氧化还原过程<sup>[3]</sup>。通过设计新型电极材料与电解液体系,可提高反应选择性与电流效率。电化学反应装置具有模块化、易调控特点,能够灵活调整生产规模,减少中间产物生成,降低分离纯化难度,为BDO绿色生产

开辟新路径。

### 3.2 智能化与集成化方向

#### 3.2.1 过程强化技术(如超临界流体、等离子体)的融合

超临界流体具有独特的物理化学性质,将其应用于BDO生产可强化传质传热过程。超临界二氧化碳作为反应介质,能提高反应物溶解度,加快反应速率,同时降低反应温度与压力。等离子体技术通过产生高能粒子,激发反应物分子,引发自由基反应,可实现传统条件下难以进行的转化。将等离子体与催化反应结合,能活化惰性化学键,提高原料转化率与产物选择性。两种技术的融合,可实现反应过程的高效化与集约化,减少设备体积与能耗。

#### 3.2.2 人工智能在工艺优化中的潜在应用

人工智能技术为BDO工艺优化提供数据驱动解决方案。机器学习算法可对海量生产数据进行深度分析,挖掘反应条件、设备参数与产品质量之间的潜在关联。通过建立预测模型,提前优化反应参数,避免因条件波动导致的产品质量下降与副反应增加。深度学习算法能够模拟复杂反应网络,辅助设计新型催化剂与反应路径。智能控制系统根据实时数据动态调整操作条件,实现生产过程的自适应优化。

## 结束语

1,4-丁二醇生产工艺优化是一个持续的过程,涉及催化剂、反应工艺、过程强化等多方面。通过不断探索催化剂体系优化、改进反应工艺、应用过程强化与集成技术,可提升生产效率与产品质量。未来,绿色化、低碳化以及智能化、集成化将成为重要发展方向,推动1,4-丁二醇生产工艺迈向新高度,为化工行业发展注入新动力。

## 参考文献

- [1]谢君.我国1,4-丁二醇生产技术分析及展望[J].广东化工,2021,48(21):111-113.
- [2]董慧,张欣.浅谈1,4-丁二醇的生产技术及市场分析[J].河南化工,2021,38(7):6-9.
- [3]赵娟,艾宏儒.1,4-丁二醇生产工艺技术评价[J].广东化工,2023,50(22):15-17.