

# 隔壁萃取精馏塔分离戊烷混合物的模拟研究

彭珂, 胡本源, 王克峰\*

(大连理工大学化工系统工程研究所, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**基于环戊烷制取项目,提出了隔壁萃取精馏的新工艺。利用 Aspen Plus 软件的 Multifrac 模块,以 DMF 为萃取剂,对隔壁萃取精馏过程进行了研究。通过灵敏度分析对影响分离的操作参数进行了优化,根据优化后的结果可以得到质量分数为 99.61% 的环戊烷,质量分数为 90.15% 的 2,2-二甲基丁烷,主要原因是隔壁萃取精馏塔能够有效地避免组分返混,提高精馏效率。和常规工艺相比,隔壁萃取精馏节能 18.1%,并减少了相关塔件设备的投资。

**关键词:**环戊烷;萃取精馏;隔壁塔;模拟;节能

中图分类号:TQ028

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2020)10-0221-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn 0253-4320.2020.10.046

## Simulation study on separation of pentane mixture by extractive distillation dividing wall column

PENG Ke, HU Ben-yuan, WANG Ke-feng\*

(Institute of Chemical Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** Based on the cyclopentane production project, a new technology is proposed for preparation of cyclopentane by using extractive distillation dividing wall column. The dividing wall extractive distillation process with DMF as extractant is simulated by means of the MultiFrac module of Aspen Plus software. The sensitivity analysis tool is used to optimize the parameters that affecting the separation effect. According to optimization result, the cyclopentane with a mass fraction of 99.61% and 2,2-dimethylbutane with a mass fraction of 90.15% can be obtained respectively. It is found that the extractive distillation dividing wall column can effectively avoid the backmixing of components and improve the distillation efficiency. Compared with the conventional process, the extractive distillation dividing wall column process can save energy by 18.1% and reduce the investment of related equipment.

**Key words:** cyclopentane; extractive distillation; dividing wall column; simulation; energy conservation

环戊烷是一种重要的化工基础原料,具有清洁、导热系数小、化学性质稳定等优点,常用来代替有害的氯氟烃(CFCs)作为冰箱、冰柜以及其他硬质泡沫的发泡剂<sup>[1]</sup>。戊烷精制产品中,环戊烷有着广阔的应用前景,产品附加值较高。市场中目前多为工业的混合戊烷,应用范围有一定的局限性,影响了企业生产的实际效益,因此环戊烷产品的精制和开发是主要的研究方向<sup>[2]</sup>。

戊烷产品分离精制的过程中,混合原料中 2,2-二甲基丁烷沸点为 49.7℃,环戊烷沸点为 49.3℃,两者不仅是近沸体系,也是共沸体系,采用普通精馏手段难以进行有效分离<sup>[3]</sup>。针对共沸体系,工业上常采用萃取精馏<sup>[4]</sup>、变压精馏<sup>[5]</sup>和盐效精馏<sup>[6]</sup>等特殊精馏方法。

为了实现能源高效、合理的运用,对传统的精馏塔进行结构改造已经成为了一个研究热点。隔壁精馏塔是一种新型的结构塔,主要构造是在传统的精馏塔内加 1 块竖直的隔板,将常规的二塔流程利用

1 个单塔集成来实现<sup>[7]</sup>。采用隔壁塔技术减少了再沸器、冷凝器等相关塔件的数量,能够有效地降低能耗,减少投资成本。目前已有将特殊精馏和隔壁塔进行相关结合的改造,鲍长远等<sup>[8]</sup>进行了异丙醇反应隔壁精馏的研究,和常规反应精馏相比,能够减少 20.4% 的能耗。国内外学者也有少量进行隔壁萃取精馏的研究<sup>[9-11]</sup>,环戊烷和 2,2-二甲基丁烷体系还未见相关报道。

本文中根据某石化企业的环戊烷分离设计项目,以 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)为萃取剂,利用 Aspen Plus 软件进行隔壁萃取精馏塔的模拟和研究。将优化后的结果和传统的常规萃取流程进行对比,得出相关的能耗数据,以期为企业的工业应用提供参考依据。

## 1 流程模拟

### 1.1 常规萃取精馏

戊烷的精制先经过正戊烷塔、异戊烷塔等前序

工段,得到正戊烷、异戊烷产品,分离后的混合物利用萃取精馏工艺制得环戊烷产品。萃取精馏常规流程如图 1,包括萃取塔和溶剂回收塔。该项目设计进料流量为 572 kg/h,进料温度 41.3℃、压力 0.8 MPa,具体组成如表 1 所示,萃取剂进料流量为 5 603 kg/h。根据文献[12],选择 SRKM 物性方法进行流程模拟。

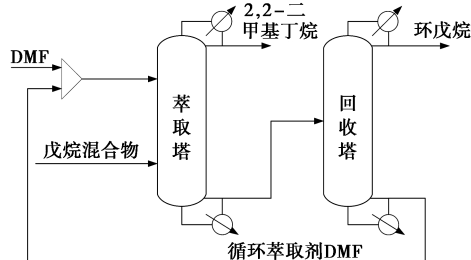


图 1 常规萃取精馏示意图

表 1 环戊烷分离流程进料组成 %

组分	正戊烷	环戊烷	2,2-二甲基丁烷	2-甲基戊烷
质量分数	0.04	91.16	8.69	0.11

按照设计要求,萃取塔塔顶采出 2,2-二甲基丁烷(质量分数  $\geq 90\%$ ),进入罐区储备,塔底混合物作为溶剂回收塔进料。在溶剂回收塔,塔顶采出高纯度的环戊烷产品(质量分数  $\geq 99.6\%$ ),塔底得到萃取剂 DMF(质量分数  $\geq 99.9\%$ )作为循环流股返回萃取精馏塔。

### 1.2 隔壁萃取精馏

隔壁萃取精馏塔是在传统的精馏塔内加 1 个竖直的隔板,将其分为 3 个部分<sup>[13]</sup>,如图 2 所示,实现了常规的萃取精馏塔和溶剂回收塔的合并。I 部分为萃取精馏段,萃取剂和原料经过 I 部分实现萃取精馏,塔顶馏出物为高浓度的 2,2-二甲基丁烷;II 部分为溶剂回收段,塔顶馏出物为高纯度的环戊烷产品;III 部分为公共提馏段,萃取剂 DMF 从塔底采出,作为循环流股返回 I 部分。隔壁萃取精馏塔共

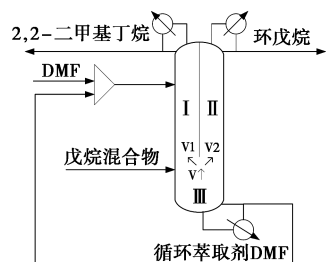


图 2 隔壁萃取精馏塔示意图

用 1 个再沸器,塔内进行能量集成,能够有效地减少能耗。

隔壁萃取精馏塔的等效模型如图 3 所示, I 和 III 部分合并为主塔(C), II 部分为副塔(T)。原料和萃取剂从主塔进入,塔顶采出高浓度的 2,2-二甲基丁烷,副塔塔顶采出环戊烷产品,塔底采出 DMF 循环使用。汪丹峰<sup>[14]</sup>利用 Aspen Plus 中的 Multifrac 模块研究了甲醇-碳酸二甲酯的隔壁萃取精馏,得到了理想的节能效果。本文中同样采用 Multifrac 模块对环戊烷/2,2-二甲基丁烷体系进行模拟和优化。

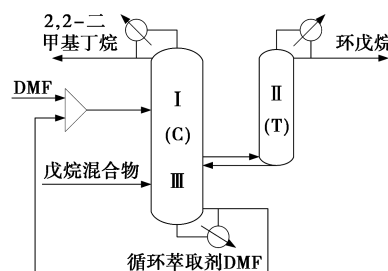


图 3 隔壁萃取精馏塔等效模型

隔壁萃取精馏塔的初始参数一般根据常规萃取精馏的模拟结果进行设置,由 Wu 等<sup>[15]</sup>提出的方法,主板塔板数为 60,副塔板数为 42,原料进料为第 26 块板,萃取剂进料位第 5 块板,主塔塔顶采出量 56 kg/h,副塔塔顶采出量 517 kg/h。对设置的参数进行灵敏度分析,探讨原料进料位置、萃取剂进料位置、溶剂比、回流比、隔板位置以及分配比对分离效果和热负荷的影响,确定优化的操作条件,为工业化应用提供操作参数。

## 2 操作参数的优化

### 2.1 原料进料位置的影响

环戊烷的分离效果和塔釜热负荷受到原料进料位置的影响。在萃取精馏的过程中,原料进料位置需和萃取剂进料位置保持一定的距离以保证分离效果。原料进料位置过于靠下,需要更多的热量维持气相上升,塔釜热负荷增加;进料位置靠上,萃取精馏段过少,分离效果会有所下降,因此需要选择合适的进料位置。

如图 4 所示,在 10~35 块板之间,随着原料进料位置的下移,环戊烷的质量分数先增加后下降,塔釜热负荷先下降后上升。原料进料位置和萃取剂进料位置需要足够的差距保证分离效果,但是进料位置越靠下,距离隔板位置越近,分离效果会变差。由

图形趋势,在15~30块板之间,塔釜热负荷变化不大,第23块板时,环戊烷取得最佳的分离效果。

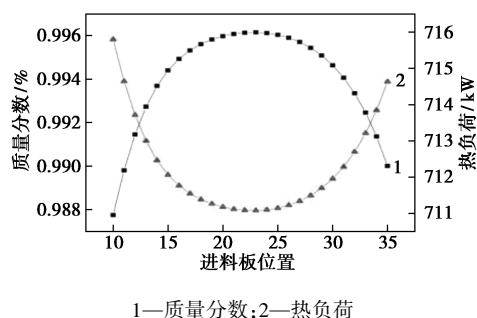


图4 原料进料位置对热负荷和环戊烷质量分数的影响

## 2.2 萃取剂进料位置的影响

萃取剂的进料位置需要在萃取塔的上部,保持一定的浓度。萃取剂进料位置过于靠上,会导致一部分产物和萃取剂从塔顶馏出,影响分离效果;进料位置越靠下,萃取精馏段变少,降低了产品纯度。萃取剂进料位置在和塔顶保持一定距离的同时要考虑到对萃取精馏段的影响。

萃取剂进料位置对环戊烷的纯度和塔釜热负荷的影响如图5所示。在第2块到第10块板变化时,随着进料位置的下移,环戊烷产品的质量分数先增大后减小,塔釜热负荷先下降后上升。第3块板时,环戊烷分离效果最好,且热负荷较低,因此选择第3块板作为萃取剂的最佳进料位置。

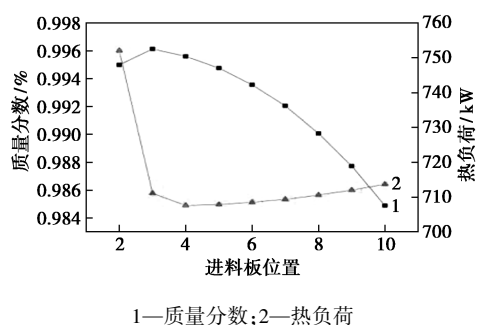


图5 萃取剂进料位置对热负荷和环戊烷质量分数的影响

## 2.3 溶剂比的影响

溶剂比的大小对萃取精馏的分离效果和塔釜热负荷有较大的影响。溶剂比过小,待分离的体系相对挥发度改变较小,分离效果不理想;溶剂比过大,分离程度变化不大,热负荷增加较为显著,因此选择适宜的溶剂比是萃取精馏的关键。

根据图6所示的结果,随着溶剂比的增加,环

戊烷的质量分数先有所增加后基本不变,塔釜热负荷不断增大,结合分离效果和热负荷,选定溶剂比为10。

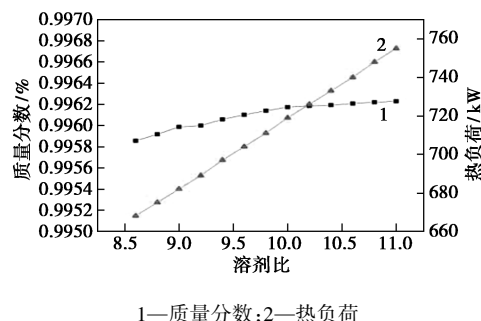


图6 溶剂比对热负荷和环戊烷质量分数的影响

## 2.4 回流比的影响

对于萃取精馏过程,回流比对产品的纯度和热负荷的影响至关重要。在一定范围内,产品的质量分数会随着回流比的增大而增加;当回流比过大时,萃取剂会受到一定程度的稀释,影响了分离效果,从而导致产品质量分数下降,热负荷增大。

环戊烷产品的质量分数和塔釜热负荷随着回流比的变化如图7所示。当回流比处于35~65时,随着回流比的增大,环戊烷的质量分数先增加后减少,塔釜热负荷不断升高。根据图7的变化趋势,回流比为56时,分离效果最佳。

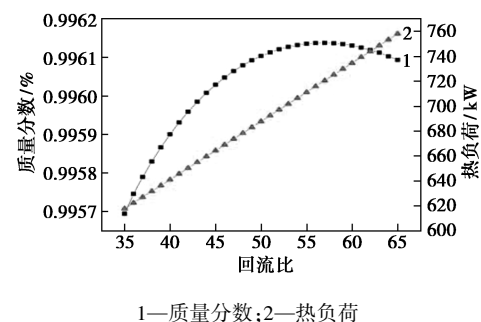


图7 回流比对热负荷和环戊烷质量分数的影响

## 2.5 隔板位置的影响

在隔壁萃取精馏塔内,组分的返混程度受隔板位置的影响较大。隔壁板位置过于靠上或者靠下,都会增加组分返混。因此,需要选择合适的隔板位置,减小隔壁塔内的返混现象,避免能耗的增加。

隔板位置对环戊烷产品的质量分数和塔釜热负荷的影响如图8所示。在42~55块板之间时,随着隔板位置的下移,环戊烷的质量分数先增加后变化不大,塔釜热负荷先基本不变后升高。由图8的显示结果,综合考虑分离效果和负荷,选取最佳隔板位

置为 52 块板。

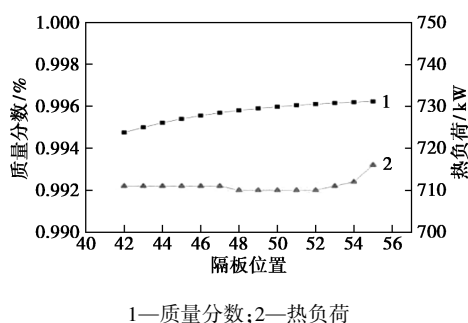


图 8 隔板位置对热负荷和环戊烷质量分数的影响

## 2.6 分配比的影响

隔壁萃取精馏塔利用 1 个再沸器提供所需热量,因此需要考虑隔板两端分配的气相流率,定义分配比为进入副塔气相流率和主塔气相流率的比值( $V_2/V_1$ )。分配比过小,进入副塔的气相流率不够,会出现干板现象;分配比过大,需要再沸器提供更多的热量维持分配比,造成塔釜热负荷不断上升。因此在实际操作中,需要控制一定的气相分配比以维持塔内的正常运行。

如图 9 所示,随着分配比增加,环戊烷产品的质量分数变化不大,塔釜热负荷显著上升。在模拟过程中,分配比不能小于 0.14,否则会出现副塔干板现象。0.14 为分配比的临界点,此时热负荷最低,因此选择最佳分配比 0.14。

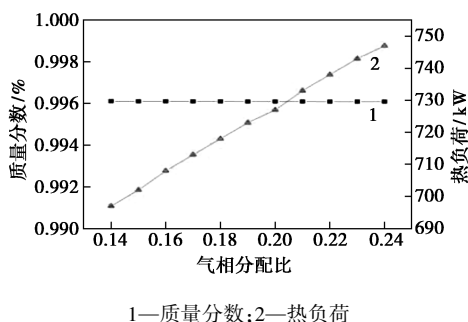


图 9 气相分配比对热负荷和环戊烷质量分数的影响

## 3 优化后 2 种方案的比较

根据某企业的环戊烷分离项目,在相同的分离要求下,进行了常规的萃取精馏和隔壁萃取精馏模拟及其参数优化,2 种工艺的模拟结果见表 2。在相同的环戊烷产品分离设计的前提下,2 种工艺的环戊烷产品质量分数均达到了 99.6%,实现了混合组分的有效分离。隔壁萃取精馏工艺和常规萃取精馏

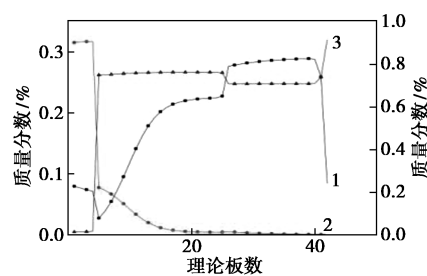
工艺相比,减少了 1 个塔及其相关塔件设备。常规萃取精馏的热负荷为 851 kW,隔壁萃取精馏的热负荷为 697 kW,两者相比,隔壁萃取精馏工艺节能 18.1%。

表 2 常规萃取精馏和隔壁萃取精馏模拟结果比较

参数	常规萃取精馏		隔壁萃取精馏	
	萃取精馏塔	溶剂回收塔	主塔	副塔
理论板数/块	42	36	60	42
回流比	39	5.8	56	
溶剂比	9.8	—	10.0	
环戊烷质量分数/%	—	99.62	—	99.61
2,2-二甲基丁烷质量分数/%	90.24	—	90.15	—
DMF 质量分数/%	—	99.95	99.94	—
热负荷/kW	290	561	697	

## 4 节能分析

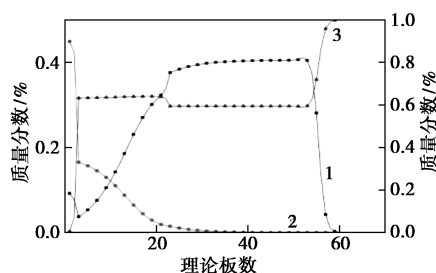
和常规的萃取精馏工艺比较,隔壁萃取精馏可以减少塔内组分的返混,因此在达到相同分离要求的情况下,隔壁萃取精馏塔起到较为显著的节能效果。常规萃取精馏塔内液相组成分布如图 10 所示,随着塔板位置的下移,环戊烷的质量分数不断增加,但是在接近塔釜时,质量分数显著下降,出现了组分返混,致使精馏热力学效率下降,为了达到分离目标需要增加相应的能耗。



1—环戊烷;2—2,2-二甲基丁烷;3—DMF

图 10 常规萃取精馏塔内液相组成分布

隔壁萃取精馏主塔内液相组成分布如图 11 所示,混合物在公共提馏段之后,接近塔釜时,环戊烷和 2,2-二甲基丁烷质量分数基本为 0,DMF 质量分数接近 1。主塔顶端采出 2,2-二甲基丁烷,塔底得到萃取剂 DMF 循环使用,在环戊烷质量分数最高处,52 块板进入副塔,采出环戊烷产品,避免了组分返混,因此隔壁萃取精馏塔具有较佳的节能效果。



1—环戊烷;2—2,2-二甲基丁烷;3—DMF

图 11 隔壁萃取精馏主塔内液相组成分布

## 5 结论

(1) 根据某石化企业的环戊烷分离项目,利用 Aspen Plus 软件对常规萃取精馏和隔壁萃取精馏进行了模拟及其参数优化。最终的操作条件为:主塔塔板数为 60,副塔板数为 42,原料进料位置为 23 块板,萃取剂进料位置为 3 块板,回流比为 56,溶剂比为 10,隔板位置 52,分配比为 0.14。根据优化的参数,得到质量分数为 99.61% 的环戊烷产品和质量分数为 90.15% 的 2,2-二甲基丁烷。

(2) 结合文中具体的优化参数,分析了隔壁萃取精馏塔节能的主要原因。和常规的萃取精馏相比,隔壁萃取精馏有效地减少了分离时出现的返混现象,提高了分离效率,因而节能效果显著。

(3) 在分离要求相同的情况下,隔壁萃取精馏节能 18.1%,相关设备投资有所减少,具有广阔的应用前景,为环戊烷隔壁萃取精馏的实际应用提供了一定的参考依据。

## 参考文献

- [1] 张冬梅,傅建松.环戊烷分离的流程模拟和优化[J].石油化工,2005,34(S1):819-820.
- [2] 李宏洋.环戊烷脱硫精制工艺技术研究[J].化工设计通讯,2019,45(6):68-69.
- [3] 孙彦波,赵清民,高志茹,等.环戊烷/2,2-甲基丁烷萃取精馏技术开发[J].化学工程师,2012,(6):17-19.
- [4] 过良,李东风,王金福.国内裂解碳五馏分分离技术的研究进展[J].石油化工,2015,44(2):252-260.
- [5] Luyben, William L. Methanol/trimethoxysilane azeotrope separation using pressure-swing distillation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(13): 5590-5597.
- [6] 潘晓梅,肖国民,杨志才.精馏与盐析萃取耦合过程[J].高校化学工程学报,2005,19(5):598-602.
- [7] 孙兰义,李军,李青松.隔壁塔技术进展[J].现代化工,2008,28(9):38-41.
- [8] 鲍长远,林美虹,蔡璇,等.隔壁塔反应精馏合成异丙醇模拟及节能效益研究[J].计算机与应用化学,2016,33(3):325-329.
- [9] Cristófer Bravo-Bravo, Juan Gabriel Segovia-Hernández, Claudia Gutiérrez-Antonio, et al. Extractive dividing wall column: Design and optimization [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010, 49(8): 3672-3688.
- [10] Ulises Miguel García-Ventura, Fabricio Omar Barroso-Muñoz, Salvador Hernández, et al. Experimental study of the production of high purity ethanol using a semi-continuous extractive batch dividing wall distillation column [J]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification, 2016, 7(14): 74-77.
- [11] 索潇萌,戴昕,虞昊,等.分隔壁萃取精馏塔分离乙酸乙酯-异丙醇[J].石油学报:石油加工,2016,32(1):111-118.
- [12] 杨东刚.大庆油田环戊烷精制萃取工艺研发[D].长春:吉林大学,2013.
- [13] 赵云鹏,张健,白金,等.萃取精馏隔壁塔精制含水乙腈流程模拟与优化[J].现代化工,2017,37(12):186-189.
- [14] 汪丹峰.分壁式精馏塔的模拟和实验研究[D].上海:华东理工大学,2011.
- [15] Wu Yi Chang, Hsu Paul Hen-Chia, Chien I-Lung. Critical assessment of the energy-saving potential of an extractive dividing-wall column [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(15): 5383-5399. ■

## 巴斯夫完成对化学建材业务的剥离

2020年9月30日(欧洲中部时间午夜起生效)巴斯夫完成对其化学建材业务的剥离,将该业务出售给全球私募股权公司 Lone Star 的关联公司。现金和无债务的收购价格为 31.7 亿欧元。化学建材业务部现已成立 MBCC 集团,总部位于德国曼海姆。

巴斯夫化学建材业务部资产和负债的剥离以及相关的出售收益都将反映在巴斯夫 2020 年第四季度的财报中。

截至 9 月 30 日收到与交易相关的付款将计入 2020 年第三季度现金流量表中的投资活动产生的现金流量项下。

2019 年 12 月 21 日,巴斯夫与 Lone Star 的关联公司签署了巴斯夫化学建材事业部的收购协议。巴斯夫化学建材业务部拥有超过 7 500 名员工,在 60 多个国家设有生产基地和销售办公室,2019 年销售额约为 26 亿欧元。

(马存宇)