

# 重庆第二师范学院

## 2023 届全日制本科生毕业论文

# 异丙醇-正丙醇-叠合油精馏过程的模拟与优化

教学学院 生物与化学工程学院

专业年级                      2019 级应用化学

学生姓名 雷涛 学号 1910703264

指导教师 邓朝芳 职称 副教授

2023 年 5 月

# 异丙醇-正丙醇-叠合油精馏过程的模拟与优化

生物与化学工程学院 应用化学专业 2019 级 雷涛

**摘 要：**异丙醇是良好的极性溶剂，它被广泛用作有机溶剂和清洗剂。然而丙烯水合法制备异丙醇的过程中会副产正丙醇和叠合油，影响异丙醇的纯度，因此，本文采用 Aspen Plus 软件对异丙醇-正丙醇-叠合油三元体系进行了研究，本次模拟在规定的分离对象与分离要求（99.99wt%）的情况下对精馏塔的参数进行优化，最终精馏塔优化结果为：理论板数为 37 块（包括冷凝器和再沸器）。通过两个设计规定优化得到塔的回流比为 1.479，优化后的加料板为第 18 块板（包括冷凝器），此时塔顶异丙醇纯度为 99.99%（ $\geq 99.9\%$ ），达到了优等品要求。

**关键词：**异丙醇；正丙醇；精馏；流程模拟

**Abstract:** Isopropyl alcohol is a good polar solvent, and it is widely used as an organic solvent and cleaning agent. However, the preparation of isopropanol by propylene hydration method will produce n-propanol and stacked oil by-products, which affects the purity of isopropanol. Therefore, this paper used Aspen Plus software to study the ternary system of isopropanol-n-propanol-stacked oil, and this simulation optimized the parameters of the distillation column under the specified separation object and separation requirements (99.99wt%), and the final distillation column optimization results were: The theoretical number of plates is 37 (including condenser and reboiler). The reflux ratio of the tower is 1.479 obtained through the optimization of the two design provisions, and the optimized refilling plate is the 18th plate (including the condenser), at which time the purity of isopropanol at the top of the tower is 99.99% ( $\geq 99.9\%$ ), which meets the requirement of superior quality.

**Keywords:** Isopropanol; n-propanol; distillation; process simulation

## 目 录

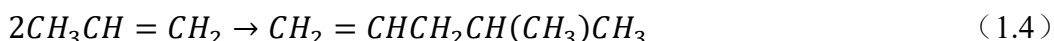
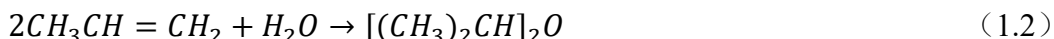
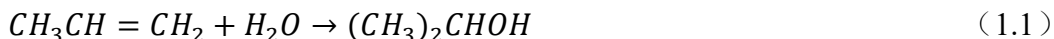
1	前言.....	1
1.1	概述.....	1
1.2	精馏原理.....	2
2	方法模型.....	2
2.1	Aspen Plus V11 软件介绍.....	2
2.2	模块和分析工具.....	3
2.3	热力学模型选择.....	3
3	流程模拟和优化.....	4
3.1	塔板数、回流比的初步确定.....	4
3.2	加料板、回流比和理论塔板数的优化.....	6
3.3	正交实验.....	10
4	结论.....	13
	参考文献.....	13
	致谢.....	15

# 1 前言

## 1.1 概述

在化工生产过程中通常需要对含有多组分混合物进行分离操作,用于原料的预处理、产品分离、产品提纯以及废料处理等<sup>[1,2]</sup>。随着模拟技术的不断发展,绝大多数工艺、优化都可以用模拟技术完成,而无需进行小试或中试,它可以大大节约实验成本。而精馏工艺因其操作简单、分离高效、产能大而列为首选<sup>[3,4]</sup>,然而对于精馏工艺设计与操作中,会涉及到多个参数的优化,识别多参数中最优组合是一个重要问题。

异丙醇是“气机”中燃油添加剂的主要成分,在实验室应用中可作为生物试样防腐剂,另外异丙醇作为一个具有广泛溶解范围的极性化合物,相比于其它同类型的溶剂,异丙醇在使用后会很快挥发掉,并且相对于其他溶剂毒性较小,因此,作为清洗剂它被广泛使用,作为溶剂也被广泛使用,尤其是用于溶解油。工业制备异丙醇的方法主要有间接水合法、直接水合法和丙酮加氢法,其中因直接水合法工艺流程简单被广泛使用,直接水合法是丙烯和水在催化剂存在的条件下加温、加压进行水合反应<sup>[5,6]</sup>,主反应方程式见式(1.1),在反应过程中会有正丙醇等副产物产生,副反应方程式见式(1.2)(1.3),并且因其反应条件存在高压、低温,有利于丙烯二聚,会产生其他的副产物,其反应方程式为式(1.4)(1.5)。



在石油化工中将这产生的副产物统称为叠合油,叠合油的组成十分复杂,常见的叠合油组分多达几十种<sup>[7]</sup>。因异丙醇是良好的溶剂,叠合油会溶解在异丙

醇中，需要将其进行高效分离。本次模拟过程中使用丙酮、2-甲基-1-戊烯、2-甲基-2-戊烯、3-甲基-2-戊烯和 2,3-二甲基-2-丁烯的混合组分代替叠合油对精馏过程的影响，并对精馏塔基本参数：理论塔板、回流比和进料位置进行优化。在此之前，对精馏工艺设计与操作中的基本参数最优组合的选取并没有一个明确的流程，因此本文结合此次流程优化的结果总结并提出一个简洁的优化流程模型。

## 1.2 精馏原理

蒸馏是利用进料混合物组分的相对挥发性的差异，通常，对于两种或多种化合物，在给定的压力和温度下，由于组分分压，在平衡状态下，蒸气和液体成分会有所不同。上行蒸汽与下降液体逆流接触，在此过程中，由于气相的温度比液相的温度高，上行蒸汽会进行部分冷凝，同时，由于下降的液体接触到高温蒸汽会有部分气化，因此，容易挥发（通常为较低沸点）的组分将进入气相，而难以挥发（通常为高沸点）的组分进入液相。精馏塔可以使用塔盘或填充床使气体和液体接触。对于使用塔板的精馏塔，我们可以考虑进入和离开单个塔板的气相和液相组成的变化，进入塔盘的液体将与离开塔盘的气体接触，较热的气相会在进入的液相通过塔板鼓泡时冷凝进入液相，此过程会蒸发液相中轻质组分，然后与气相一起离开塔板，从塔顶馏出。相反地，通过液相冷却气相将导致气相中较重的组分冷凝并与液相一起离开塔盘，从塔底馏出<sup>[4,8-10]</sup>。

综上所述，异丙醇是一种非常重要的有机溶剂，直接水合法工艺流程简单，然而，该过程会副产正丙醇和叠合油。本文采用精馏单元操作对异丙醇-正丙醇-叠合油三元体系进行了分离，采用 Aspen Plus 软件对精馏过程的塔板数、回流比等参数进行了优化。这些优化结果可以为异丙醇-正丙醇-叠合油三元体系精馏塔的设计提供理论参考。

## 2 方法模型

### 2.1 Aspen Plus V11 软件介绍

Aspen Plus 是一个市场领先的过程建模工具，是市场上领先的工艺模型工具，

用于概念设计、优化和性能监测，适用于化工、聚合物、特种化工、金属和矿物以及煤电行业。软件主要由物理数据库、单元操作模块和系统实现策略三个部分组成。该软件有一个完整的物性系统，在工业生产中有很高的适用性，其中包含有机、无机、固体与水溶性电解质的基本物性参数。软件在进行模拟时会调用对应的传递与热力学性质进行计算，另外它还提供超过 50 种单元操作模块，当我们进行不同的化工流程设计时，可以将不同的模块与模型组合。因此，Aspen Plus V11 软件适用于模拟各种化工过程，可以减少装置的设计时间，并且其模拟结果可直接用于实际生产中<sup>[3]</sup>。

## 2.2 模块和分析工具

多个组分混合体系的精馏简捷设计模块 DSTWU, 通过模拟计算可以得到理论板数、进料位置、回流比等精馏塔参数, 这些参数主要通过 Winn-Underwood-Gilliland 捷算法计算得到, 由于 DSTWU 简捷塔模拟使用的是经验关联式, 因此其的计算结果无法直接使用, 只能作为参考值, 为严格精馏 RadFrac 计算提供精馏塔基本参数。在严格计算模块 RadFrac 中可以设置任意的塔板数、回流比与进料位置等精馏塔参数, 用户可以查看任意塔板的流量、组成和热力学状态。灵敏度分析工具可以对回流比、理论板数与进料位置的参数进行优化。灵敏度分析是研究与分析一个系统(或模型)的状态或输出变化对系统参数或周围条件变化的敏感程度的方法<sup>[11-13]</sup>。在精馏塔最优结果的确定中需要利用灵敏度分析工具来研究塔数据在不确定或动态变化时的稳定性, 如何确定精馏塔的哪些参数对系统模型有不可忽略的影响也需要用到灵敏度分析工具, 因此, 灵敏度分析是进行研究的必要工具之一。

## 2.3 热力学模型选择

Aspen Plus V11 软件提供的活度系数模型中, NRTL 模型是基于威尔逊假说, 描述化合物活性系数与液相摩尔分率关系的活性系数模型<sup>[14]</sup>。NRTL 模型对含烃、醇、酮、醚、氰、酯类以及含水、硫、卤类的互溶溶液均能获得良好结果,

也能够描述部分互溶体系的液液平衡。在本次流程中只含有烃、酮类组分，因此采用的物性方法 NRTL 尤为合适<sup>[3]</sup>，本次模拟流程全局采用 SI-CBAR 单位集。

本文以 Aspen Plus V11 软件为工具对异丙醇、正丙醇和叠合油的精馏分离工艺的参数优化进行了研究，常压情况下，异丙醇、正丙醇、叠合油、的沸点见表 2.1 所示，可以看出异丙醇与重组分的沸点插值在 10℃ 以上，通过普通精馏技术对其进行分离，实现异丙醇的分离。

表 2.1 主要成分沸点

物质	异丙醇	正丙醇	叠合油
沸点/℃	82.05	97.2	73.21

3 流程模拟和优化

3.1 塔板数、回流比的初步确定

为了初步探索异丙醇-正丙醇-叠合油三元体系的分离条件，本文首先采用简捷计算模块 DSTWU 进行了流程模拟。如图 3-1 是本次精馏分离异丙醇-正丙醇-叠合油的具体工艺流程图。本次模拟的组分及摩尔流量见表 3.1。根据文献可知，丙烯二聚产生的叠合油含量较少<sup>[5]</sup>，因此主要成分为异丙醇和正丙醇，具体组成如表 3.1 所示。组成成分输入确定后，进行模拟流程图的条件输入，本流程的初始条件见表 3.2，表中 DSTWU 模型有四组模型设定参数，塔规范、关键组分回收率、压力和冷凝器规范<sup>[3,13]</sup>。

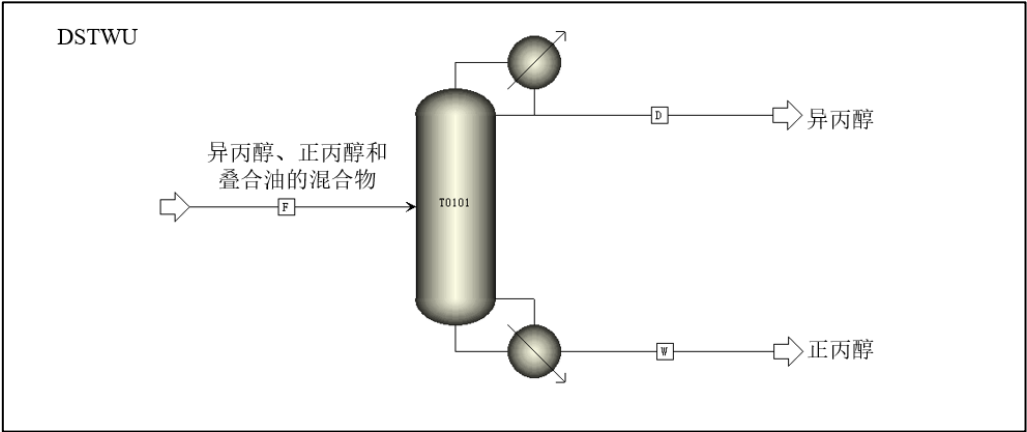


图 3-1 Aspen Plus V11 简携计算模拟流程图

表 3.1 各组分规定及进料摩尔流量

组分 ID	组分名称	别名	摩尔流量 (Kmol hr <sup>-1</sup> )
ISOPR-01	ISOPROPYL-ALCOHOL	C3H8O-2	87
1-PRO-01	1-PROPANOL	C3H8O-1	0.23
2:3-D-01	2,3-DIMETHYL-2-BUTENE	C6H12-14	1.40E-06
ACETO-01	ACETONE	C3H6O-1	3.70E-06
2-MET-01	2-METHYL-1-PENTENE	C6H12-D2	4.90E-11
2-MET-02	2-METHYL-2-PENTENE	C6H12-8	1.80E-08
3-MET-01	3-METHYL-2-PENTENE	C6H12-N2	5.50E-07

表 3.2 DSTWU 简携模型流程模拟的初始塔参数

精馏塔 T0101 参数						
流通股进料状态			冷凝器压力	再沸器压力	回流比	
	轻组分回收率	重组分回收率	(bar)	(bar)		
压力 (bar)	1.02	0.999	0.001	1	1	-1.3
温度 (℃)	82.46	-	-	-	-	-
Kmol hr <sup>-1</sup>	87.23	-	-	-	-	-

精馏塔 T0101 相关参数确认之后，即可对整个流程进行模拟运行。模拟实验结果表明异丙醇的纯度为 0.99999（质量分率），达到了要求纯度 0.9999（质量分率）。简携计算模块下得到回流比、理论塔板数和进料塔板等精馏塔重要参数见表 3.3，为严格计算模块提供了参考数据。

表 3.3 简携计算参数及其值

项目	数值
最小回流比	1.21662
实际回流比	1.58161
最小塔板数	21.6549



表 3.3（续）

项目	数值
实际塔板数	40.8156
进料塔板编号	20.8621

回流比随理论板数变化表对选取合理的理论塔板数有很大的参考价值<sup>[3]</sup>。根据得到的最小塔板数和实际塔板数，在实际回流比与理论板数表格一栏中输入理论板数的初值 22 与终值 42，塔板数的增量大小为 2，运行模拟可以计算出不同理论板数下的回流比，并绘制回流比-理论板数关系曲线图，见图 3-2。其中横坐标为理论塔板数（Param Nstage），纵坐标为摩尔回流比（Mole Reflux Ratio）。根据图 3-2，最终选择理论塔板数为 38 块（包括冷凝器和再沸器），此时回流比为 1.808，在该点理论塔板数对回流比影响已进入平缓下降区，再继续增加塔板数并不能明显减小精馏塔的操作费用，因此确定最终理论板数为 38 块。

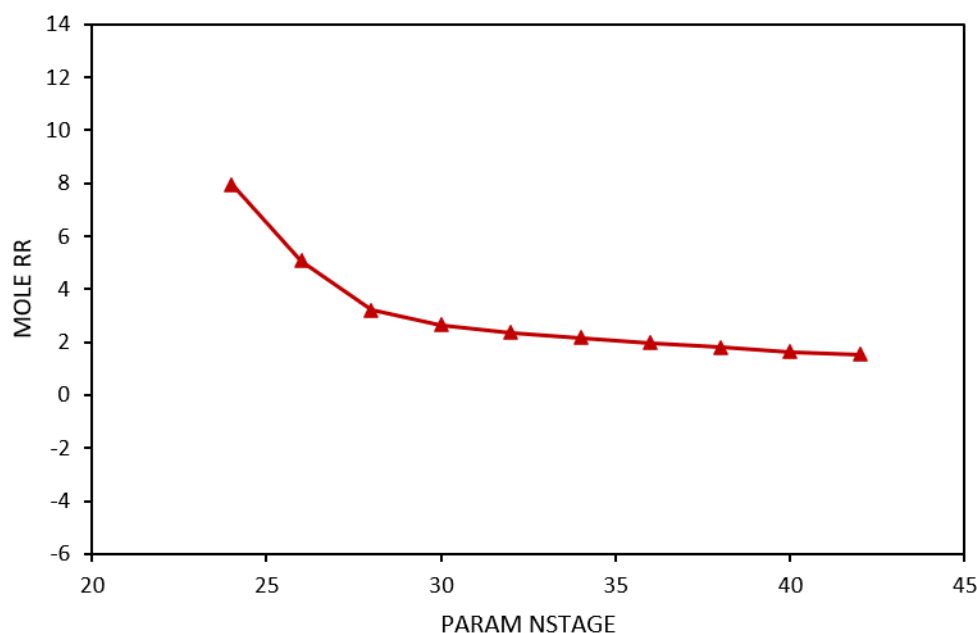


图 3-2 回流比-理论板数关系曲线图

## 3.2 加料板、回流比和理论塔板数的优化

### 3.2.1 严格模块初步计算

采用简捷塔模拟得到精馏过程的初步参数之后，本文采用严格塔 RadFrac

模块进一步对加料板、回流比进行优化，以保证得到可靠的精馏结果。

如图 3-3 所示，T0101 精馏塔顶端是轻组分异丙醇流出，根据简携计算模块 DSTWU 中的模拟结果，得到初步满足塔顶产物异丙醇质量浓度要求的塔板数、回流比和进料位置的参考值，将其输入 RadFRac 严格模块中进行模拟计算。塔参数设定理论塔板数为 38（包括冷凝器和再沸器），此时回流比为 1.808，进料塔板编号为 21 进行模拟运行。严格计数模块模拟得到的异丙醇精馏塔参数项目及值见表 3.4。由表 3.4 可以得出，异丙醇精馏塔回流比为 1.808；理论塔板数为 38；异丙醇精馏塔进料位置第 21 块，这时的异丙醇的质量分数为 0.9999478，规定的质量分数为 0.9999，可以发现异丙醇质量分数存在 0.0000478 的冗余，因此回流比、理论塔板数和进料塔板有一段优化空间<sup>[15,16]</sup>。优化过程使用的模型分析工具为灵敏度分析工具，在满足塔顶异丙醇浓度的条件下，将初步的回流比、进料位置和理论塔板数进行单因素优化。

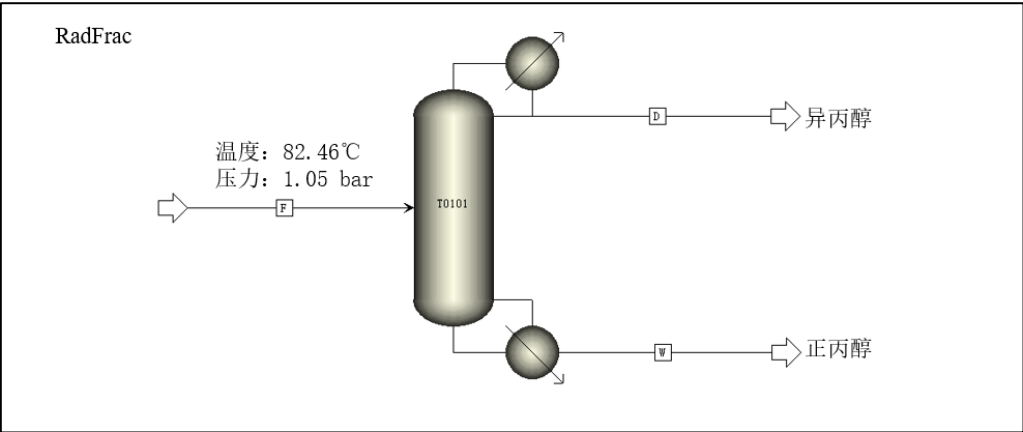


图 3-3 Aspen Plus V11 严格计算模拟流程图

表 3.4 RadFrac 严格计算参数及其值

项目	值
回流比	1.808
理论塔板数	38
进料位置	21
异丙醇质量分率	0.9999478

3.2.2 灵敏度单因素分析

灵敏度单因素分析法可以研究进料塔板位置对塔顶馏出物的纯度的影响，利用此分析方法可以研究进料板位置对异丙醇质量分率的影响。本次分析中，进料位置选择第 10 块塔板到第 30 块塔板作为研究区间，考察进料位置对塔顶异丙醇质量纯度的影响，其变化趋势见图 3-4，其中图中的横坐标为进料位置（Feeds Stage），纵坐标为质量分数（Mass Fraction）与再沸器热负荷（Kilowatt）。根据图 3-4 中曲线得知，当进料塔板编号为 18 时，塔顶异丙醇的质量分数为 0.999955，此时再沸器的热负荷最小。

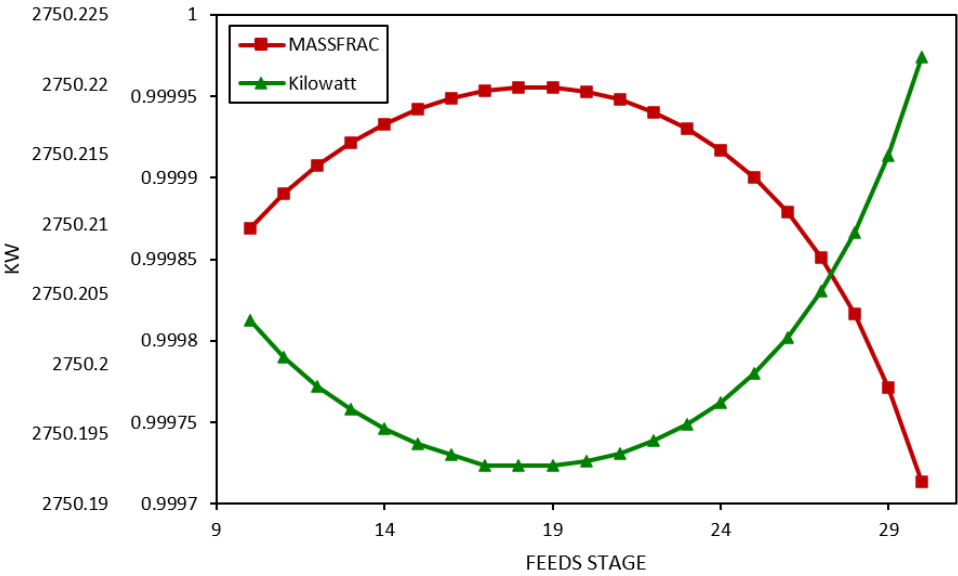


图 3-4 进料位置与质量分率和再沸器热负荷关系曲线图

对于精馏段操作，生产中经常用回流比来调节、控制产品的质量。回流比是精馏塔中直接影响产品质量和塔分离效果的重要因素，改变回流量是精馏塔操作中重要的和有效的操作手段<sup>[17-19]</sup>。利用灵敏度分析工具，将回流比的分析区间设为 1.6 到 1.808，模拟后的具体数据见表 3.5，此时异丙醇的质量分率为 0.99993，还可以缩小范围；将回流比区间设置为 1.4 到 1.6，模拟后的结果见表 3.5，当回流比为 1.453 时，此时塔顶异丙醇质量纯度为 0.9999，到达了规定的异丙醇的质量纯度 0.9999。

表 3.5 回流比与质量分率的关系

区间 1		区间 2	
回流比	质量分率	回流比	质量分率
1.6	0.99993	1.4	0.999885
1.610947	0.999932	1.41052632	0.999888
1.621895	0.999934	1.42105263	0.999891
1.632842	0.999935	1.43157895	0.999894
1.643789	0.999937	1.44210526	0.999897
1.654737	0.999939	1.45263158	0.9999
1.665684	0.99994	1.46315789	0.999902
1.676632	0.999941	1.47368421	0.999905
1.687579	0.999943	1.48421053	0.999907
1.698526	0.999944	1.49473684	0.99991
1.709474	0.999946	1.50526316	0.999912
1.720421	0.999947	1.51578947	0.999915
1.731368	0.999948	1.52631579	0.999917
1.742316	0.999949	1.53684211	0.999919
1.753263	0.99995	1.54736842	0.999921
1.764211	0.999951	1.55789474	0.999923
1.775158	0.999953	1.56842105	0.999925
1.786105	0.999954	1.57894737	0.999927
1.797053	0.999955	1.58947368	0.999929
1.808	0.999956	1.6	0.99993

理论塔板数越多，分离效果越好，但随着塔板数的增加塔体高度增加而精馏塔塔径、冷凝器、重沸器、回流罐、回流泵、中间泵及相应管道阀门等规格尺寸减小引起设备费用发生变化，因此需要对其进行优化，尽量减少塔板数<sup>[20,21]</sup>。利

用灵敏度分析，将理论塔板数的变化区间设置为 25 到 45，模拟后的结果见图 3-5，其中横坐标为理论塔板数（Pram Nstage），坐标为质量分数（Mass Fraction），当理论塔板数为 34 时，已经能够达到分离规定。

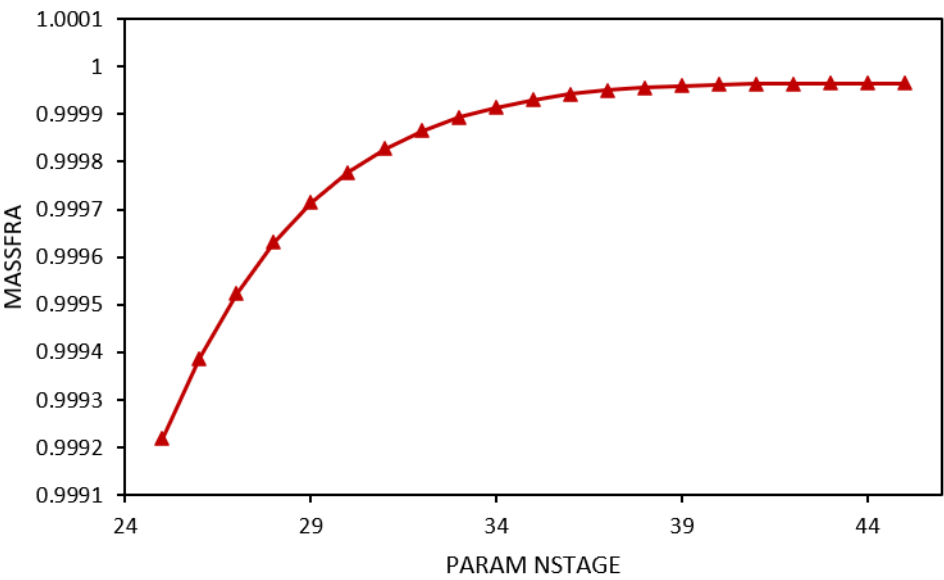


图 3-5 理论塔板数-质量分率关系曲线图

3.3 正交实验

为综合考察多因素对本流程异丙醇质量纯度（ $\omega$ ）的影响，对异丙醇精馏塔进行了正交实验，选择 4 因素 3 水平实验，共计 9 组实验，按  $L_9(3^4)$  正交表安排实验，其中 4 因素所指的工艺参数及 3 水平对应的数值列于表 4.1 中，以异丙醇的质量纯度（ $\omega$ ）为目标纯度进行优化分析<sup>[22]</sup>，正交实验所得的结果及结果分析列于表 4.2 和表 4.3 中<sup>[23,24]</sup>。

表 4.1 正交实验因素水平表

因素（4 因素）	水平（3 水平）		
	1	2	3
A（异丙醇精馏塔塔板数）	34	37	40
B（异丙醇精馏塔进料位置）	16	18	20
C（异丙醇精馏塔回流比）	1.3	1.5	1.7
D（空白）	—	—	—

表 4.2 正交实验条件和结果

序号	因素				$\omega$
	A	B	C	D	
1	1 (34)	1 (16)	1 (1.3)	1	0.999813
2	1 (34)	2 (18)	2 (1.5)	2	0.99986
3	1 (34)	3 (20)	3 (1.7)	3	0.999866
4	2 (37)	1 (16)	2 (1.5)	3	0.999897
5	2 (37)	2 (18)	3 (1.7)	1	0.999938
6	2 (37)	3 (20)	1 (1.3)	2	0.999833
7	3 (40)	1 (16)	3 (1.7)	2	0.999938
8	3 (40)	2 (18)	1 (1.3)	3	0.999855
9	3 (40)	3 (20)	2 (1.5)	1	0.999925

表 4.3 正交表实验结果分析

项目	因素			
	A	B	C	D
$K_1$	2.999539	2.999648	2.999501	2.999676
$K_2$	2.999668	2.999653	2.999682	2.999631
$K_3$	2.999718	2.999624	2.999742	2.999618
$\omega$ $k_1$	0.999846	0.999883	0.999834	0.999892
$k_2$	0.999889	0.999884	0.999894	0.999877
$k_3$	0.999906	0.999875	0.999914	0.999873
R	5.96667E-05	9.66667E-06	8.03333E-05	1.93333E-05
因素主→次	C A B			
最优水平	$A_3$	$B_2$	$C_3$	$D_1$
最优组合	$A_3B_2C_3$			

由表 4.3 得出，极差比较结果为：异丙醇精馏塔回流比影响最大，接着是异

丙醇精馏塔塔板数，最后是异丙醇精馏塔进料位置。通过对实验结果的分析可以得知，本次模拟流程对异丙醇质量浓度影响最大的是精馏塔回流比，由此应该在最终的参数选取时因优先考虑回流比。

综上所述，利用 Aspen Plus V11 进行初步优化后，精馏塔的进料塔板确定为 18，回流比为 1.453，理论塔板数为 34。将优化的结果输入精馏塔 T0101 进行模拟，塔顶异丙醇的回收率为 99.98%，质量分率为 0.999847，最终的结果并没有达到预期的期望值，需要权衡设备费用与操作费用，在达到分离规定的前提下确定最适宜的回流比、理论塔板数和进料位置。根据实验和生产数据统计总结出了最适宜回流比与最小回流比的关系，见式（3.1）。

$$R_{opt} = (1.1 - 2)R_{min} \quad (3.1)$$

精馏过程中的能量消耗多少与两个因素有关，首先是塔底再沸器的加热蒸汽量，其次是塔顶冷凝器冷却水的使用量。从具体的实验分析来看，加热蒸汽与冷却水用量的多少与塔内上升的蒸汽量有关。在塔顶产品流量保持不变的情况下，上升蒸汽量与摩尔气体常数  $R$  为成正比关系，则回流增大。此时，不管是蒸汽加热量还是冷却水的使用量均会呈现明显的增加状态，同时，操作费用也会增加。就实践来讲，回流比越小，能耗便会越低，所以在精馏塔的工作实践中，需要在保证质量的条件下尽可能减小回流比。目前的实践结果显示，在系统回流比处于最小状态时技能效果会比较显著，但塔设备费用会显著增加，进而导致整个精馏过程的费用增加。再者，在不断减小回流比时，塔系统的具体操作会变得更加复杂，要求也会更多，这不符合节能的初衷，所以需要改善这种情况。通过不断的实验分析发现，确定最优回流比对节能而言意义显著，而最优回流比实际上就是强调设备费用与操作费用的平衡<sup>[25-28]</sup>。

异丙醇精馏塔 T0101 主要用以分离原料中的异丙醇，使塔顶异丙醇的质量纯度达到 99.99%。在优先考虑回流比的前提下权衡设备投资费用和操作费用后，在满足分离要求的前提下优化得到塔的理论板数为 37 块（包括冷凝器和再沸器），通过两个设计规定优化得到塔的回流比为 1.479，优化后的加料板为第 18 块板

（包括冷凝器）。在此优化条件下，塔顶异丙醇流股信息如表 5.1 所示，异丙醇产物中异丙醇含量和异丙醇在塔顶的回收率均符合要求。

表 5.1 塔顶异丙醇流股信息

组分	单位	流量	质量分率
异丙醇	Kg hr <sup>-1</sup>	5227.821076	0.9999
正丙醇	Kg hr <sup>-1</sup>	0.523623497	0.000100151
2,3-二甲基-2-丁烯	Kg hr <sup>-1</sup>	0.000117826	2.25E-08
丙酮	Kg hr <sup>-1</sup>	0.000214896	4.11E-08
2-甲基-1-戊烯	Kg hr <sup>-1</sup>	4.1239E-09	7.89E-13
2-甲基-2-戊烯	Kg hr <sup>-1</sup>	1.5149E-06	2.90E-10
3-甲基-2-戊烯	Kg hr <sup>-1</sup>	4.62887E-05	8.85E-09

4 结论

本文通过 Aspen Plus V11 软件对异丙醇的精馏回收进行了全流程的模拟和优化，通过灵敏度分析对异丙醇精馏塔的工艺参数进行了优化与分析，得出异丙醇精馏塔的最优工艺参数为塔板数 37 块，回流比 1.479，进料位置第 18 块，此时塔顶异丙醇的纯度为 0.9999（Mass Fraction）达到了优等品要求，国家标准 GB/T 7814-2017 异丙醇含量（质量分数）%≥99.9 为优等品。本文所采用的优化方法和结果可以为多元醇混合物的精馏分离工艺的设计提供了理论参考。

参考文献

[1] 叔宝祺.精馏塔控制和节能优化路径探析[J].化工管理，2023，45–47.

[2] 杨太飞,王海提,左启军,等.异丙醇、正丙醇和丁醇三元混合物分离工艺研究[J].山东化工，2022，7–9.

[3] 孙兰义.化工过程模拟实训—Aspen Plus 教程[M].2017.

[4] 司稳琴.精馏技术研究进展与工业应用[J].化工管理，2017，104.

[5] 吴建民,孙起文,张宗森.丙烯二聚合成 4-甲基-1-戊烯反应的热力学研究[J].天然气化工(C1 化学与化工)，2014，392：20–24.

[6] 刘银川.丙烯水合制异丙醇工艺的全流程模拟[D].北京化工大学，2011.



- [7] 单秀杰,管浩.从异丙醇副产叠合油中提取高纯度异丙醚[J].辽宁化工, 2011, 40796–799.
- [8] 昞彬,杨向东,曾兆强.精馏塔釜立式热虹吸再沸器的模拟与优化设计[J].能源化工, 2022, 4379–82.
- [9] 卢健.精馏塔工艺操作影响因素分析[J].化工设计通讯, 2019, 86+138.
- [10] 王洪元.用 ASPENPLUS 模拟分析石油化工流程[J].江苏石油化工学院学报, 1996.
- [11] 侯卫锋,苏宏业,胡永有,et al.基于 ASPEN PLUS 用户模型技术的催化重整全流程模拟[J].化工学报, 2005, 1714–1720.
- [12] 张治山,杨超龙.Aspen Plus 在化工中的应用[J].广东化工, 2012, 3977–78.
- [13] 赵琛琛.工业系统流程模拟利器——ASPENPLUS[J].电站系统工程, 2003, 56–58.
- [14] 马金亮.AspenPlus 软件模拟计算空分设备流程的修正[J].深冷技术, 2005, 19–21.
- [15] 林号然.化工精馏高效节能技术开发及应用分析[J].中国石油和化工标准与质量, 2022, 162–164.
- [16] 陈婷.AspenPlus 模拟甲烷氯化物氯化单元过程与优化[J].化学工程与装备, 2019, 22–23.
- [17] 侯延杰.环氧乙烷精制塔的模拟与分析[J].安徽化工, 2011, 3743–45.
- [18] 阎观亮.大型常规丙烯精馏塔塔板数的优化[J].炼油设计, 2000, 20–22.
- [19] 陈明.含异戊醇、乙醇废水的精馏分离模拟研究[J].化工设计通讯, 2022, 4885–87.
- [20] 祝建章,吴蕾,杨嵘晟.精馏塔控制和节能优化研究[J].当代化工研究, 2021, 155–157.
- [21] 陈珺.基于反应精馏的工业乙醇除水工艺及其过程模拟研究[D].中国海洋大学, 2011.
- [22] 刘星伟,贾胜坤,罗祎青,等.基于信赖域算法的精馏塔优化[J].化工学报, 2022, 732031–2038.
- [23] SHALABY S M,GADALLA M A,EL SAYED A R,et al.Aspen Plus simulation of a low capacity organic Rankine cycle heated by solar energy[J].Energy Reports, Elsevier Ltd, 2022, 8: 416–421.
- [24] ZEBERT T L,LOKHAT D,KURELLA S,et al.Modeling and simulation of ethane cracker reactor using Aspen Plus[J].South African Journal of Chemical Engineering, Elsevier B.V., 2023, 43October 2022: 204–214.
- [25] 雷杨,张冰剑,陈清林.基于 MINLP 的精馏塔进料板位置优化[J].化工进展, 2011, 80–84.
- [26] 汪嘉杨,伍绍贵.回流比对精馏塔理论塔板数的影响:计算机辅助计算在化工原理课程中的应用[J].化学教育(中英文), 2020, 80–84.
- [27] 杨德明,王新兵,孙磊.热集成变压精馏分离甲苯-异丙醇的模拟[J].化学工程, 2011, 10–13.
- [28] 张皓翔.正丁醇-异丙醇-乙醇-水体系精馏分离过程的节能研究[D].常州大学, 2021.

## 致谢

首先感谢我的论文指导邓朝芳老师。邓老师治学严谨，一丝不苟，从选题到开题再到初稿等多次指导修改，都离不开邓老师的耐心指导，给予我莫大的帮助。师恩铭记，望师珍重。

其次我要感谢我的家人和朋友。他们一直以来对我的支持和鼓励让我能够坚定的走完这段研究之路。没有他们的陪伴和支持，我无法想象自己会走得如此远。

予尝求古仁人之心，夙夜思索人生的意义。朝菌不知晦朔，蟪蛄不知春秋，古往今来王侯布衣亦不过弹指百年之间。大江东去，浪涛腾跃成千古。本科四年一晃眼就到了尽头，至此即将踏上新的旅途。且祝阅者平安喜乐，万事胜意。