

中国矿业大学“十三五”品牌专业建设工程资助  
化学工程与工艺“卓越计划”系列教材

# 化工原理课程设计

刘建周 主编

Huagong Yuanli Kecheng Sheji

China University of Mining and Technology Press

中国矿业大学出版社

中国矿业大学“十三五”品牌专业建设工程资助  
化学工程与工艺“卓越计划”系列教材

# 化工原理课程设计

主 编 刘建周

副主编 丁 玉 褚睿智

孟献梁 秦志红

中国矿业大学出版社

## 内 容 提 要

本书结合化工原理课程设计的教学任务及工程系列培养方案的要求,以精馏塔(浮阀塔)分离苯-甲苯物系为设计任务,介绍了精馏工艺流程设计原则,精馏塔流程方案,板式精馏塔设计计算的一般原则、内容和步骤,换热器的工艺计算及选型等精馏单元操作的基本内容。

本书可作为化工类及相近专业化工原理课程设计教学的指导书,也可供化工类专业学生作为毕业设计参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理课程设计/刘建周主编. —徐州:中国矿业大学出版社, 2019. 3  
ISBN 978 - 7 - 5646 - 4290 - 7

I. ①化… II. ①刘… III. ①化工原理—课程设计—高等学校—教材 IV. ①TQ02—41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 006488 号

书 名 化工原理课程设计  
主 编 刘建周  
责任编辑 周 红  
出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司  
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)  
营销热线 (0516)83884103 83885105  
出版服务 (0516)83995789 83884920  
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com  
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司  
开 本 787×960 1/16 印张 6.75 字数 121 千字  
版次印次 2019年3月第1版 2019年3月第1次印刷  
定 价 28.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

## 前 言

化工原理课程设计是化工原理教学的一个重要实践环节,是理论联系实际解决工程实际复杂问题的一次设计实践。通过课程设计使学生能够综合运用化工原理课程的基础知识、基本原理和基本计算,掌握化工设计的基本程序和方法,在查阅技术资料、选用公式和数据、用简洁文字和图表表达设计结果、制图以及计算机辅助计算等方面得到一次基本训练,具有初步进行工程设计的能力。

精馏是化工生产中典型的单元操作之一,被广泛应用于液体均相混合物系的分离。精馏塔应用历史悠久,是化工、石油化工、生物、制药等生产过程中广泛采用的气液传质设备。本书主要编写了板式精馏塔的工艺设计,对工艺设计的方法及步骤、设计方案的确定、精馏塔设计计算、塔板结构设计和换热器等附属设备的选型进行了详细介绍,附有设计所需的公式、图表、数据以供查用。附录提供设计任务书供课程设计时参考。

本书在编写中力图体现化工原理课程设计的教学任务及工程系列培养方案的要求,吸收了中国矿业大学化工原理教学团队多年的教学实践经验和教学研究成果,参阅了国内外高等院校化工原理经典教材和相关化工设计资料的内容等。全书共分4章,包括绪论、化工生产工艺流程设计简介、精馏塔工艺设计及计算、精馏塔板结构设计、附属设备及选择,书后附有精馏塔设计实例。在本书的编写过程中,化工原理教学团队的秦志红教授、丁玉教授、孟献梁教授、褚睿智教授、万永周副教授等十几位教师针对书稿内容组织了多次的研讨,本校王茜茜等同学参与了精馏塔设计实例一章设计计算。

全书着力拓宽基础理论和应用实践,有较强的通用性。内容编写力求概

念清晰,层次分明,简洁易懂,力争做到便于学生自学和培养自我获取知识的能力。本书可作为化工原理课程设计课程的教材或教学参考书,适用于化学工程与工艺、能源化工和环境化工等专业的本科学生,也可为本科毕业设计和从事工业应用的技术人员提供参考。

本书得到了中国矿业大学“十三五”品牌专业建设工程资助,是化学工程与工艺“卓越计划”系列教材之一。

由于编者水平有限,书中多有不妥之处,恳请专家学者及读者赐教指正,以利于教学和后续工作水平的提高,编者在此表示衷心感谢。

**编 者**

2018年9月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第 1 章 化工生产工艺流程设计简介 .....</b>	<b>3</b>
1.1 化工生产工艺流程设计的准备 .....	4
1.2 化工生产工艺流程设计的三个阶段 .....	4
1.3 化工生产工艺流程图的设计程序 .....	6
<b>第 2 章 精馏塔工艺设计及计算 .....</b>	<b>8</b>
2.1 精馏塔工艺设计 .....	8
2.2 精馏塔工艺计算 .....	11
<b>第 3 章 精馏塔板结构设计 .....</b>	<b>22</b>
3.1 精馏塔板类型及特点 .....	22
3.2 塔板结构 .....	27
3.3 塔板间距的选定 .....	28
3.4 塔径的确定与空塔气速核算 .....	29
3.5 塔高确定 .....	31
3.6 塔板布置 .....	33
3.7 流体力学验算 .....	41
3.8 气液负荷性能图 .....	44
<b>第 4 章 附属设备及选择 .....</b>	<b>45</b>
4.1 换热器 .....	45
4.2 泵的选择 .....	57

附录 精馏塔设计实例 .....	58
精馏塔设计任务书 .....	58
0 精馏塔设计说明书 .....	60
1 精馏工艺流程及说明 .....	61
2 精馏塔的全塔物料衡算 .....	62
2.1 原料液、塔顶及塔底物料组成单位换算 .....	62
2.2 原料液、塔顶及塔底出料的平均摩尔质量 .....	62
2.3 全塔物料衡算 .....	63
3 塔板数的计算 .....	64
3.1 苯-甲苯物系的气液平衡关系 .....	64
3.2 理论塔板数 $N_T$ 确定 .....	66
3.3 全塔效率 $E_T$ 计算 .....	67
3.4 全塔实际板数 $N_p$ 确定 .....	70
4 精馏塔有关物性参数及工艺条件的计算 .....	72
4.1 操作压强计算 .....	72
4.2 操作温度计算 .....	72
4.3 平均摩尔质量计算 .....	72
4.4 平均密度计算 .....	74
4.5 液相平均表面张力计算 .....	75
4.6 液相平均黏度计算 .....	76
4.7 塔的气液负荷计算 .....	76
5 精馏塔塔体工艺尺寸计算 .....	78
5.1 塔径计算 .....	78
5.2 精馏塔高度计算 .....	80
6 塔板主要工艺尺寸的计算 .....	81
6.1 溢流装置计算 .....	81
6.2 塔板布置 .....	82
6.3 浮阀塔流体力学验算 .....	84
6.4 塔板负荷性能图 .....	87
6.5 操作弹性 .....	91
6.6 浮阀塔工艺设计计算结果总表 .....	91

## 目 录

---

7 换热器选型和塔釜加热蒸气消耗量的计算 .....	93
7.1 设计方案确定 .....	93
7.2 混合气体定性温度下的物性参数 .....	93
7.3 原料液在平均温度 50 ℃ 下的物性参数 .....	94
7.4 试算和初选换热器规程 .....	94
7.5 核算总传热系数 .....	95
7.6 核算压力降 .....	96
7.7 再沸器加热蒸气消耗量计算 .....	98
<b>参考文献</b> .....	<b>99</b>

## 绪 论

蒸馏是分离液体均相混合物最常用的一种单元操作。蒸馏过程即是在气液两相之间同时进行传热和传质的过程。液体均相混合物通过加热而形成气液两相体系,利用各组分相对挥发度的差异,轻质组分更多地进入气相而重质组分更多地进入液相,从而达到各组分的分离。

蒸馏过程按操作方式可分为间歇蒸馏和连续蒸馏。间歇蒸馏是一个非稳态过程,蒸馏过程中气相馏出物轻质组分浓度逐渐减小,釜内液相中重质组分浓度逐渐增加,釜内气液两相平衡温度逐渐增大。连续蒸馏可视为稳态的连续过程,连续蒸馏过程中各组分浓度以及蒸馏过程中气液两相的温度不随时间变化。间歇蒸馏多应用于批量生产或有特殊要求的场合,连续蒸馏是化工生产常用的方法。

蒸馏按蒸馏方式可分为简单蒸馏、平衡蒸馏、精馏以及萃取精馏、共沸精馏等。平衡蒸馏又称闪蒸,常以稳态的连续操作方式进行。蒸馏和平衡蒸馏多用于容易分离的物系或分离要求不高的情况。对于较难分离的物系和分离要求较高的情况,应采用精馏操作。若分离的物系中存在共沸物系或组分的相对挥发度接近的情况,可采用特殊精馏。特殊精馏采用在分离的物系中加入第三种组分,改变分离组分的活度系数,增加组分间的相对挥发度,从而达到有效分离的目的。

精馏塔是实现精馏操作的主要装置。精馏塔内上升蒸汽和下降液体逐级在塔内充分接触进行传热和传质过程。在上升蒸气和下降液体的接触中,气液两相经历多次部分冷凝和多次部分汽化,利用混合物中各组分挥发度的不同,轻质组分更多地转移至气相,重质组分则更多地转移至液相,使混合物中各组分较大程度地分离。塔顶得到较为纯净的轻质组分,塔底得到重质组分。

精馏塔按结构可分为板式塔和填料塔。板式塔按塔板结构又分为浮阀塔、筛板塔、喷射塔、泡罩塔等。塔板结构是板式塔性能的主要决定因素。填料塔内填料的表面提供了气液接触的场所,各式填料决定着填料塔的性能。对精馏塔的基本要求如下:在较大的生产负荷下仍具有好的操作稳定性和较大的操作弹性,塔板上返混现象小,分离效率高;气液流动阻力小,操作费用低;结构简单,操作方便,容易安装和维修等。

浮阀塔具有结构简单、造价低、板上液面落差小、单板压强低、生产能力较大、气体分散均匀、传质效率较高的特点,是广泛应用于生产的精馏塔设备之一。

化工原理课程设计是化工原理教学的一个综合性教学环节,其目的是综合应用所学知识完成以单元操作为主的设计工作。通过化工原理课程设计,初步掌握化工设计的基本方法,并在查阅技术资料的基础上合理选取计算式和数据,能够用简洁的文字和图表表达设计结果。在课程设计过程中应体现出技术的先进性和可行性,经济的合理性,同时体现出安全、环保、节能和高效的理念。

## 第1章 化工生产工艺流程设计简介

工业生产中,从原料到产品各项工序安排的程序称为工艺流程,工艺流程一般用直观的工艺流程图表达。化工生产工艺流程设计是以流程图的形式表示出由物料到产品整个生产过程中物料被加工的顺序及各股物料的流向,同时也表示出生产中采用的化工操作单元及其设备,据此可进一步制定化工管道流程和计量,即控制流程。

化工生产工艺流程设计是化工工艺设计的核心。在整个工艺设计中,设备选型、工艺计算、设备布置等几乎所有的设计项目都与工艺流程的设计直接相关。生产工艺流程在所有设计项目中是最先着手的工作,只有在工艺流程确定后,其他各项设计工作才能依次开展,如根据工艺流程的安排进行工艺计算和车间布置设计等。初步规划和设计的工艺流程,在经历工艺计算和设备设计等工作后,往往需要进行必要的调整和优化,最后使生产工艺流程确定下来。从这个意义上说,生产工艺流程的设计贯穿了整个化工工艺设计的始终,工艺流程最先开始设计,几乎最后才能确定和完成。在化工设计中,从原料到产品的一个典型的工艺流程包括六个单元:原料储存、进料预处理、反应、产品分离、产品精制和包装贮存。

工艺流程的设计可分为多个阶段,由浅入深,由定性到定量,最后得以完成。工艺流程设计前首先应进行工艺路线的选择和论证,绘出工艺流程草图。根据工艺流程的初步设计,进行物料衡算、能量衡算、设备的工艺设计或选型等工作,必要时对工艺流程草图进行修改和调整,绘出物料流程图。最后阶段的设计由工艺专业人员根据工艺流程图(PFD)、工艺控制图(PCD)、物料平衡表及工艺操作要求等资料绘制出相关的管道及仪表流程图(PID)。

## 1.1 化工生产工艺流程设计的准备

化工生产工艺流程设计的准备工作包括:资料收集,分析对比和设计方案比较。

资料收集的内容主要包括:① 基本建设投资,产品成本,占地面积;② 国内外生产情况,各种生产方法及工艺流程;③ 原料来源及产品市场调查;④ 设备的选型,制造,运输情况;⑤ 安全技术及劳动保护措施;⑥ 综合利用,节能减排,清洁生产;⑦ 环境保护方法及措施;⑧ 厂址,地质,水文,气象等资料;⑨ 水、电、气、燃料的供应情况;⑩ 车间的生产环境。

分析对比内容包括:① 几种工艺路线在国内外被采用的具体情况及发展趋势;② 产品的质量情况;③ 生产能力与产品规格;④ 原材料及能力消耗情况;⑤ 建设费用及产品成本;⑥ 三废的产生及治理情况;⑦ 其他需要注意的情况。

方案比较是指从原料到产品可以规划若干个不同的工艺流程方案,应从安全的、环保的及经济的等观点对各个工艺流程方案加以分析和比较,确定一个优化方案。

## 1.2 化工生产工艺流程设计的三个阶段

化工生产工艺流程设计过程一般要经历三个阶段:即生产工艺流程示意图、生产工艺流程草图和生产工艺流程图。

当生产方法确定后,即可开始设计生产工艺流程示意图,根据生产流程示意图进行物料衡算及能量衡算,并进行部分设备的设计或选型。在设备设计的基础上,经过对工艺流程示意图的修改和补充形成生产工艺流程草图。根据流程草图进行全部设备的设计或选型,初步进行车间布置设计。根据车间布置设计情况再对流程草图进行修改,待全部设计和车间布置确定后最后形成生产工艺流程图。在具体的设计工作中,往往根据设计项目的成熟度以及设计人员的经验对设计的程序作相应的简化。

### 1.2.1 生产工艺流程示意图

生产工艺流程示意图由物料流程、图例和设备一览表三部分组成。

物料流程包括:① 设备示意图。由于在此阶段未进行物料衡算和设备设计,不可能按比例绘出设备示意图,只须按照设备的大致几何形状绘出,甚至画出方框图即可。对设备相对位置高低的表示也无严格的要求。② 设备流程号。③ 全部管线及部分动力(水、汽、压缩空气等)管线及流向箭头。④ 必要的文字注解。

图例,只要求绘出管线的图例,管线上的阀门和仪表则无须绘出。

设备一览表包括:① 序号;② 流程号;③ 设备名称;④ 备注。

### 1.2.2 生产工艺流程草图

生产工艺流程草图由物料流程、图例、设备一览表、图签和图框五部分组成。工艺流程草图的各组成部分和工艺流程示意图中的相应部分,在内容要求上是截然不同的。前者是定量的,而后者只需定性即可以。工艺流程草图中各组成部分的具体要求如下。

物料流程包括:① 厂房各层地平线及标高;② 设备示意图(设备的外形尺寸需要按比例画出,并标明设备各管口);③ 设备流程号;④ 物流及动力(水、汽、真空、压缩空气、冷冻盐水等)管线及流向箭头;⑤ 管线上主要的阀门;⑥ 必要的设备及管道附件,如阻火器、管道过滤器、冷凝水排除器等;⑦ 必要的计量及控制仪表,如转子流量计、玻璃液位计、压力表、真空表等;⑧ 必要的文字注解,如废水去向、半成品去向等。

图例,是将物料流程中画出的有关管线、阀门、设备附件、计量与控制仪表等图形用文字予以对照。

图签,是写出图名,设计单位,设计、制图和审核人员(签名),图纸的比例尺,图号等项目的一份表格,其位置一般在流程草图的右下角。

图框,采用粗线条给整个流程草图(包括物料流程、图例、设备一览表和图签)以框界。

### 1.2.3 生产工艺流程图

当设备设计和生产工艺流程草图设计结束后,便可着手车间布置设计。

在进行车间布置设计时,可能发现生产工艺流程草图设计中某些设备的空间位置不妥,或个别设备的型式和主要尺寸决定不当等问题,此时可作部分的修改。最后得出生产工艺流程图,作为正式的设计成品。

生产工艺流程示意图的画法采用由左至右展开的形式,先画出物料的流程,再画出图例,最后是设备一览表。应当注意,对于技术路线的确定,一定要慎重考虑和反复推敲。

### 1.3 化工生产工艺流程图的设计程序

化工生产工艺流程图的设计程序包括流程框图、方案流程图、物料流程图(PFD图)和带控制点的工艺流程图(PID图)。

工艺流程图是一种示意性的图样,把各个生产单元按照一定的目的和要求有机地组合起来,形成一个完整的生产工艺过程,并用图形描述出来。化工生产工艺流程图是以图形、符号、代号表示出化工设备、管路、附件、仪表和自控等,以表达一个化工生产过程中物料和能量的变化始末。

#### 1.3.1 流程框图

在前期规划及初步方案确定时,一般采用流程框图来说明技术路线。流程框图是采用方框及文字来表示主要的工艺过程及设备,以箭头表示物料的流动方向,从原料开始到最终产品所经历的生产步骤以图示的方式表达出来。流程框图是一种示意性的展开图,一个方框可代表一个设备、一个工序或工段、一个生产车间或系统。在图上也可以加注必要的文字说明,如原料来源、中间产物、废物去向等,也可以在物料流程线旁标注出物料在流程中的某些参数(如温度、压力、流量等)。

#### 1.3.2 方案流程图

方案流程图又称流程示意图或流程简图,是一种示意性的展开图,在流程框图的基础上,自左至右把流程及设备展开在同一平面上,用图例表示出主要工艺设备的位号和名称,用箭头表示出物流的方向。方案流程图包括由原理到产品的工艺流程线和采用的各种设备。

### 1.3.3 物料流程图(PDF图)

物料流程图是在初步设计阶段为完成物流衡算和能量衡算时而绘制的。它是在方案流程图的基础上,采用图形与表格相结合的方式反映设计中物流衡算与能量衡算的结果;表示出主要工艺设备、关键辅助设备及物流的方向;标注工艺设备的位号和名称,以表格表示出各物流的流量计含量,在有热量变化的过程及设备旁标注出热量值。

在设备的位号及名称下方标注一些特性参数或数据。如换热器的换热面积、塔设备的直径及高度、储罐的容积及机器的型号等。

在物料的起始部位和物料产生变化的设备后列表注明物料产生变化之后组分的名称、流量、组成等参数,按项目依据具体情况增减。

物料在流程图中的某些工艺参数(如温度、压力等)可以在流程线旁标出。

### 1.3.4 带控制点的工艺流程图(PID图)

带控制点的工艺流程图,又称工艺管道或仪表流程图,是在工艺方案流程图和物料流程图的基础上,借助规定的统一符号和文字代号,用图示的方法把化工生产过程中所需要的设备、管道、仪表、阀门及主要管件按其功能和工艺要求组合起来,以描述工艺装置的结构和功能。

通常以工艺装置的主项(车间或工段)为单元来绘制,也可以装置为单元绘制。按工艺流程次序把设备、管道流程自左至右展开在同一平面上。

带控制点的工艺流程图应包括的内容有:

(1) 图形。按规定的图形符号和文字代号,将各设备的简单形状按工艺流程次序,配以连接的主辅管线及管件、阀门、仪表和控制方法等展示在同一平面上。

(2) 标注。对图形内容进行编号和标注,标注设备位号及名称,必要的参数和尺寸,管道的代号,管径和材料,保温,控制点代号等信息。

(3) 图例。包括代号、符号及其他标注的说明,设备位号的索引等。标题栏,注写图名、图号、设计阶段等,有些图中还加入备注栏、详图和表格等项。

## 第2章 精馏塔工艺设计及计算

### 2.1 精馏塔工艺设计

精馏塔的初步工艺设计包括:精馏设计方案及流程的选择,操作压力的确定,进料热状况与加热方式的选择,回流比的选择,塔盘类型选择及塔板效率的估算。

#### 2.1.1 精馏流程

精馏装置由精馏塔、再沸器、冷凝器等设备组合而成。从热量交换的角度看,精馏装置中各部分都属于热交换设备。精馏塔在运行过程中消耗大量的热量,其中大部分热量用于反复地蒸发回流的液体,其余部分热量则被馏出液及釜残液带走。因此,在确定精馏流程时应充分考虑节能这一重要的问题。从经济方面看,应尽可能地充分利用整个系统的热能,以降低操作费用。在综合利用系统热能时须考虑到操作的稳定性,以保证产品的质量。

例如,从节能的角度,可利用塔顶蒸汽的冷凝和冷却所放出的热量预热料液,但应注意塔顶的蒸汽量的波动将会影响料液预热后的温度及塔顶的回流量,这将可能破坏整个塔的稳定操作。若利用釜残液冷却所放出的热量预热料液,虽然釜残液有较高的温度,但其液液换热过程,传热系数小,所需换热面积往往很大,这将使换热设备的投资增大。由此可见,在确定流程时应全面合理地考虑到经济和操作控制两方面的因素。

#### 2.1.2 精馏塔操作压力

一般情况下,凡是能通过常压精馏操作实现分离要求的系统,都应采用常

压精馏。若常压下混合液的沸点过低,可采用加压精馏。若常压下混合液的沸点过高,则宜采用减压精馏。组分的特性也决定着操作压力的选择。例如,对苯乙烯的精馏来说,由于苯乙烯加热到 $102\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上时会发生聚合,而常压下苯乙烯的沸点为 $145.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此必须采用减压操作,使塔釜的温度低于苯乙烯的聚合温度。在石油气分离中,脱丙烯丙烷塔的压力取决于冷凝器的稳定,操作压力为 $1.8\text{ MPa}$ 时,冷凝温度近 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,此时可用江河水来冷凝,而不须用深井水或冷冻盐水,运转费用显著降低。

### 2.1.3 进料热状况

进料液的热状况与所需的塔板数目、加料位置及塔径的大小有密切关系。进料液的热状况有五种,其中以接近泡点进料最为常见,如此精馏段与提馏段可采用相同的塔径,在设计和制造上均较方便,但需要增设进料液预热器。在选择进料状况时需要综合考虑操作控制、操作费用与设备投资等因素。

### 2.1.4 加热方式

蒸馏釜的加热方式通常采用间接蒸汽加热。如果釜残液中的主要组分是水,而且在低浓度下轻组分的相对挥发度较大时,如乙醇与水的混合液精馏分离,可采用直接蒸汽加热的方式。采用直接蒸汽加热时,可以采用较低的加热蒸汽压力,从而节省操作费用,同时省去的间接加热设备,也可以减少大量金属材料的消耗。

由于直接蒸汽的不断加入,对釜内的溶液起到了一定的稀释作用。在进料条件、产品纯度及轻组分收率一定的前提下,釜液浓度指标相应降低,通常需在提馏段多加几块塔板,才能达到原来的生产要求。

采用直接蒸汽加热时,加热蒸汽的压强应略高于釜中的压强,以克服蒸汽喷出小孔的阻力及釜中液柱静压强。在釜中安装一蒸汽喷出器,使加热蒸汽能均匀地分布于残液中。蒸汽喷出器多为环形管,管子上适当开一些小孔,使加热蒸汽由这些小孔喷出,成为气泡在液相中上升。孔径较小时,便于蒸汽分散得更细,更均匀。但孔径过小时,不仅增加阻力,而且容易出现堵塞现象。孔径一般为 $3\sim 10\text{ mm}$ 。小孔中心距 $t$ 一般为小孔直径的 $5\sim 10$ 倍。小孔总面积应为加热蒸汽管横截面积的 $1.2\sim 1.5$ 倍,管内蒸汽速度为 $20\sim 25\text{ m/s}$ 。为增大蒸汽与溶液的接触机会,小孔应开在管子的下方或侧面,而不应该朝上