



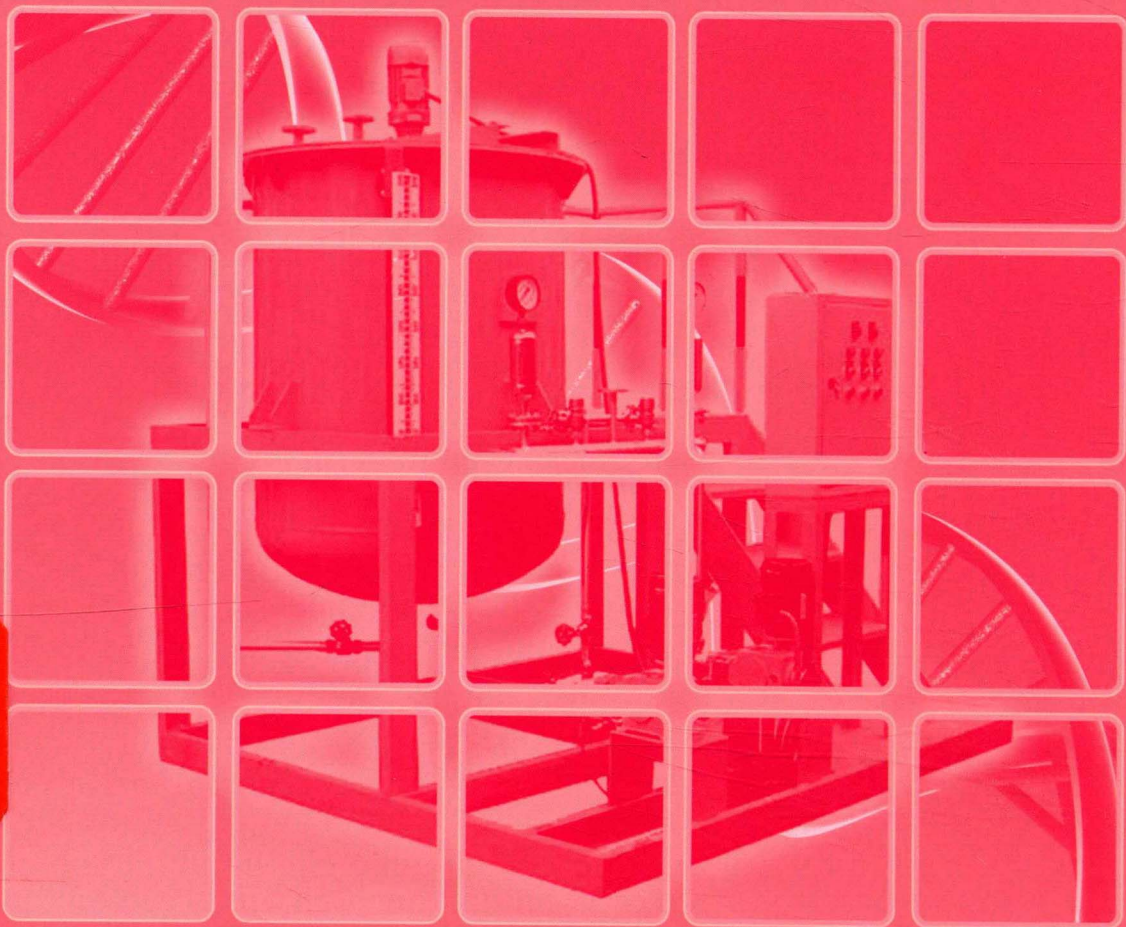
普通高等教育“十二五”部委级规划教材（高职高专）


# 化工单元

HUAGONG DANYUAN  
GUOCHENG YU CAOZUO

## 过程与操作

◎ 孙琪娟 编写



 中国纺织出版社



普通高等教育“十二五”部委级规划教材(高职高专)

# 化工单元过程与操作

孙琪娟 编写



中国纺织出版社

## 内 容 提 要

本书是高等职业教育“十二五”部委级规划教材,教材编排以化工单元操作过程为载体,以“三传”理论为主线,分为四个教学模块:流体输送技术、传热操作技术、分离操作技术及其他单元操作技术。分离操作技术包括非均相物系分离技术、吸收操作技术、蒸馏操作技术、干燥操作技术;其他单元操作技术主要是引进膜分离及冷冻等新型单元操作技术。每个模块均编有阅读资料以拓展知识面,模块之始提出学习要求,明确需达到的知识目标、能力目标,模块之末附有复习与思考题、计算题,方便学习者自我检测与总结提高。

本书理论结合岗位实际,既坚持必要而实用的工程基础,又重点面向工程实际,在阐明基本原理的基础上,结合化工单元操作典型案例,重点介绍其应用、生产原理、设备结构与选型、操作与维护等实用知识与操作技能。同时引入单元操作新技术。

本书可作为高等职业教育化工类专业教材,也可作为相关企业的培训教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工单元过程与操作/孙琪娟编写. —北京:中国纺织出版社, 2014. 1

普通高等教育“十二五”部委级规划教材. 高职高专  
ISBN 978-7-5064-9856-2

I. ①化… II. ①孙… III. ①化工单元操作—高等  
职业教育—教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第140458号

---

策划编辑:朱萍萍 范雨昕 责任编辑:张晓蕾  
责任校对:余静雯 责任设计:何建 责任印制:何艳

---

中国纺织出版社出版发行

地址:北京市朝阳区百子湾东里A407号楼 邮政编码:100124

邮购电话:010—87155894 传真:010—87155801

http://www.c-textilep.com

E-mail: faxing@c-textilep.com

三河市华丰印刷厂印刷 各地新华书店经销

2014年1月第1版第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:16.75

字数:341千字 定价:40.00元

---

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社图书营销中心调换

## 出版者的话

《国家中长期教育改革和发展规划纲要》（简称《纲要》）中提出“要大力发展职业教育”。职业教育要“把提高质量作为重点。以服务为宗旨，以就业为导向，推进教育教学改革。实行工学结合、校企合作、顶岗实习的人才培养模式”。为全面贯彻落实《纲要》，中国纺织服装教育学会协同中国纺织出版社，认真组织制订“十二五”部委级教材规划，组织专家对各院校上报的“十二五”规划教材选题进行认真评选，力求使教材出版与教学改革和课程建设发展相适应，并对项目式教学模式的配套教材进行了探索，充分体现职业技能培养的特点。在教材的编写上重视实践和实训环节内容，使教材内容具有以下三个特点：

（1）围绕一个核心——育人目标。根据教育规律和课程设置特点，从培养学生学习兴趣和提高职业技能入手，教材内容围绕生产实际和教学需要展开，形式上力求突出重点，强调实践。附有课程设置指导，并于章首介绍本章知识点、重点、难点及专业技能，章后附形式多样的思考题等，提高教材的可读性，增加学生学习兴趣和自学能力。

（2）突出一个环节——实践环节。教材出版突出高职教育和应用性学科的特点，注重理论与实践的结合，有针对性地设置教材内容，增加实践、实验内容，并通过多媒体等形式，直观反映生产实践的最新成果。

（3）实现一个立体——开发立体化教材体系。充分利用现代教育技术手段，构建数字教育资源平台，开发教学课件、音像制品、素材库、试题库等多种立体化的配套教材，以直观的形式和丰富的表达充分展现教学内容。

教材出版是教育发展中的重要组成部分，为出版高质量的教材，出版社严格甄选作者，组织专家评审，并对出版全过程进行跟踪，及时了解教材编写进度、编写质量，力求做到作者权威、编辑专业、审读严格、精品出版。我们愿与院校一起，共同探讨、完善教材出版，不断推出精品教材，以适应我国职业教育的发展要求。

中国纺织出版社  
教材出版中心

# 前言

本书是根据高职高专化工技术专业高技能、高素质人才培养目标的要求编写的。遵循国家职业标准与生产岗位需求相结合的原则，围绕高等职业教育的基本特征和职业教育的特点，突出职业技能，强调化工单元操作与设备维护。

本书内容包括四个教学模块：动量传递过程与操作、热量传递过程与操作、质量传递过程与操作以及其他单元过程与操作。动量传递过程与操作包括流体输送过程与操作、非均相物系分离过程与操作；质量传递过程与操作包括吸收过程与操作、蒸馏过程与操作、干燥过程与操作；其他单元过程与操作主要是引进膜分离及冷冻等新型单元操作技术。教材在内容编排上，选择化工生产过程典型单元操作为载体，以“三传”理论为主线，每个模块按照先整体认识单元操作系统，然后通过解析整个单元操作系统生产流程，即基于工作过程，并按学生的认知规律，划分为若干工作任务。先整体后部分，由单一到综合，教材内容模块化，模块内容任务化。同时结合化工行业发展对一线技术人员的要求，补充化工设备与装置的实用操作与维护技术内容，并引入化工单元操作新技术。

本书理论结合岗位实际，既坚持必要而实用的工程基础，又重点面向工程实际，结合化工单元操作典型案例，重点介绍其应用、生产原理、设备结构与选型、操作与维护等实用知识与操作技能。

本书可作为高等职业教育化工类及相关专业（化工、石油、生物、制药、轻纺、食品、环保、冶金、材料等）教材，也可作为相关企业的培训教材以及供从事化工生产和管理的工程技术人员参考。

由于编者水平有限，书中不妥之处恳请读者批评指正。

编者

2013年6月

## 课程设置指导

**课程名称** 化工单元过程与操作

**适用专业** 化工类及相关专业

**总学时** 96

**课程性质** 本课程为化工类及相关专业的专业核心课程，是必修课。

### 课程目的

本课程是完成化工生产中化工单元操作岗位工作任务而设置的工作项目。通过本课程教学，主要达到以下目的：

1. 学会化工生产中常见单元操作的工作原理和生产操作方法。
2. 掌握典型设备的结构特点、选型设计方法、检修技术及岗位操作。

### 课程教学的基本要求

本课程为理论与实践一体化教学。教学环节包括布置任务、分组讨论、任务实施、过程评价、总结提升。通过各教学环节，重点培养学生运用各单元操作理论知识解决实际问题的能力。

1. 布置任务 布置工作任务，明确其工业背景，需要达到的目标。
2. 分组讨论 在明确工作任务的基础上，分组讨论，确定工作方法及步骤。
3. 任务实施 根据确定的工作方法及步骤，分组实施。
4. 过程评价 对各组完成任务情况进行评价。
5. 总结提升 在对本次任务总结的基础上，对任务进行拓展、提升。

### 教学学时分配

教学模块	教学任务	学时分配
模块一	动量传递过程与操作	28
模块二	热量传递过程与操作	16
模块三	质量传递过程与操作	50
模块四	其他单元过程与操作	2
合 计		96



# 目录

绪论——认识化工生产过程与单元操作 .....	001
模块一 动量传递过程与操作 .....	005
项目一 流体输送过程与操作 .....	005
任务一 认识流体 .....	005
一、流体的物性参数及获取 .....	006
二、流体输送任务的表达 .....	008
任务二 化工管路的组成与管径的选择 .....	009
一、管路的分类 .....	009
二、管路的基本构成 .....	009
三、管子的选用 .....	013
四、管路的布置与安装原则 .....	014
技能训练一 管路拆装训练 .....	014
任务三 流体压力及液位的测量 .....	015
一、流体静力学基本方程式 .....	015
二、流体静力学基本方程的应用——流体压差及液位测量 .....	017
任务四 流体流动过程遵循的规律 .....	019
一、稳定流动和非稳定流动 .....	019
二、流体稳定流动过程的物料衡算——连续性方程 .....	019
三、流体稳定流动过程的能量衡算——柏努利方程 .....	020
任务五 流体在圆形管内的流动规律 .....	024
一、流体的流动类型 .....	024
二、流体流动类型的判定 .....	026
三、湍流流体中的层流内层 .....	027
任务六 流体输送过程的阻力 .....	027
一、流体流动阻力的类型及表示 .....	027

二、流体流动阻力的产生 .....	027
三、流体流动阻力的计算 .....	028
任务七 流体流量的测量与控制 .....	035
一、测速管（皮托管） .....	035
二、孔板流量计 .....	036
三、文丘里流量计 .....	038
四、转子流量计 .....	039
任务八 离心泵的结构、原理及性能 .....	041
一、离心泵的结构 .....	041
二、离心泵的工作原理 .....	043
三、离心泵的主要性能参数和特性曲线 .....	043
任务九 离心泵安装高度的确定 .....	045
一、离心泵的气蚀现象 .....	045
二、离心泵的允许安装高度 .....	046
三、离心泵安装高度的计算 .....	046
任务十 离心泵的类型与选用 .....	048
一、离心泵的类型 .....	048
二、离心泵的选用 .....	049
任务十一 离心泵的操作与维护 .....	050
一、离心泵的流量调节 .....	050
二、离心泵的开、停车操作 .....	052
三、离心泵的日常运行与维护 .....	053
四、离心泵常见事故的处理 .....	054
技能训练二 离心泵操作训练 .....	055
任务十二 认识气体输送机械 .....	055
一、离心式通风机 .....	056
二、离心式压缩机 .....	058
复习与思考 .....	060
计算题 .....	061
项目二 非均相物系分离过程与操作 .....	062
任务一 认识非均相物系分离系统 .....	062
一、非均相物系分离在化工生产中的应用 .....	062



二、常见非均相物系的分离方法 .....	063
任务二 沉降分离 .....	063
一、重力沉降及设备 .....	063
二、离心沉降及设备 .....	066
任务三 过滤操作 .....	068
一、过滤操作分类 .....	069
二、过滤介质 .....	069
三、助滤剂 .....	069
四、过滤速率及其影响因素 .....	070
五、过滤设备 .....	071
复习与思考 .....	073
计算题 .....	073
模块二 热量传递过程与操作 .....	075
任务一 认识传热系统 .....	075
一、换热器的分类 .....	075
二、间壁式换热器的结构型式 .....	077
任务二 工业传热过程分析 .....	083
一、热传导 .....	083
二、对流传热 .....	086
任务三 换热器传热面积的确定 .....	090
一、传热基本方程 .....	090
二、换热器的热负荷 .....	090
三、传热平均温度差 .....	092
四、总传热系数 .....	096
五、换热器的传热面积的确定 .....	100
任务四 列管式换热器的选型 .....	100
一、列管式换热器选型时应考虑的问题 .....	100
二、列管式换热器选型的步骤 .....	103
三、列管式换热器的型号与规格 .....	103
任务五 换热器的操作 .....	107
一、传热速率影响因素分析 .....	107

二、换热器的开停车操作 .....	108
三、换热器的异常现象及处理方法 .....	109
复习与思考 .....	110
计算题 .....	110
<b>模块三 质量传递过程与操作</b> .....	<b>112</b>
<b>项目一 吸收过程与操作</b> .....	<b>112</b>
<b>任务一 认识吸收系统</b> .....	<b>112</b>
一、工业吸收过程 .....	112
二、吸收在工业生产中的应用 .....	113
三、吸收的分类 .....	114
四、吸收剂的选择 .....	114
<b>任务二 吸收相平衡关系</b> .....	<b>115</b>
一、吸收相平衡关系——亨利定律 .....	115
二、相平衡关系在吸收过程中的应用 .....	116
<b>任务三 吸收机理与吸收速率</b> .....	<b>118</b>
一、吸收机理 .....	118
二、双膜理论 .....	119
三、吸收阻力的控制 .....	120
<b>任务四 吸收剂用量的确定</b> .....	<b>122</b>
一、物料衡算与操作线方程 .....	122
二、吸收剂用量 .....	124
<b>任务五 填料吸收塔塔径和塔高的确定</b> .....	<b>126</b>
一、塔径的确定 .....	126
二、填料层高度的计算 .....	126
<b>任务六 认识吸收设备</b> .....	<b>129</b>
一、填料塔的结构与特点 .....	129
二、填料塔的流体力学性能 .....	134
<b>任务七 吸收塔的操作</b> .....	<b>136</b>
一、工艺操作指标的调节 .....	136
二、开停车操作 .....	137
<b>技能训练三 吸收操作训练</b> .....	<b>137</b>

复习与思考 .....	139
计算题 .....	139
<b>项目二 精馏过程与操作</b> .....	140
<b>任务一 认识蒸馏系统</b> .....	140
一、蒸馏操作的依据 .....	140
二、蒸馏过程的分类 .....	141
三、蒸馏操作的方法 .....	141
<b>任务二 双组分理想溶液的气液相平衡</b> .....	142
一、双组分气液相平衡图 .....	143
二、相对挥发度 .....	144
三、相平衡方程 .....	144
四、精馏原理 .....	144
五、精馏操作流程 .....	146
<b>任务三 双组分连续精馏的计算</b> .....	147
一、全塔物料衡算 .....	147
二、操作线方程 .....	148
三、进料状况的影响 .....	150
<b>任务四 塔板数的确定</b> .....	153
一、理论塔板数的求法 .....	153
二、确定最优进料位置 .....	155
三、塔板效率与实际塔板数 .....	156
四、回流比的影响与选择 .....	157
<b>任务五 精馏塔的结构及应用</b> .....	159
一、精馏塔的分类及工业应用 .....	159
二、板式塔的结构类型及性能评价 .....	160
<b>任务六 精馏塔的操作</b> .....	164
一、影响精馏操作的主要因素 .....	164
二、板式塔的操作特性 .....	166
三、精馏塔的开车、停车操作 .....	169
<b>技能训练四 精馏塔操作训练</b> .....	170
复习与思考 .....	173
计算题 .....	173

项目三 干燥过程与操作 .....	174
任务一 认识干燥系统 .....	174
一、认识对流干燥 (干燥介质: 热空气; 湿分: 水分) .....	174
二、干燥器的结构及性能特点 .....	175
任务二 认识湿空气的性质 .....	178
任务三 干燥过程的物料衡算与能量衡算 .....	184
一、物料中所含水分的性质 .....	184
二、物料中含水量的表示方法 .....	185
三、干燥过程的物料衡算 .....	186
四、干燥过程的热量衡算 .....	187
任务四 干燥过程中的平衡关系与速率关系 .....	191
一、干燥速率 .....	191
二、干燥曲线与干燥速率曲线 .....	191
三、恒定干燥条件下干燥时间的计算 .....	192
任务五 干燥器的操作 .....	194
一、干燥操作条件的确定 .....	194
二、典型干燥器的操作 .....	195
技能训练五 干燥操作训练 .....	196
复习与思考 .....	198
计算题 .....	198
模块四 其他单元过程与操作 .....	200
任务一 膜分离技术 .....	200
一、膜分离技术基础知识 .....	200
二、膜组件 .....	201
任务二 冷冻技术 .....	209
一、制冷的分类 .....	209
二、制冷基本原理 .....	210
三、操作温度的选择 .....	211
四、制冷能力 .....	213
五、制冷剂与载冷体 .....	214
六、压缩蒸汽制冷设备 .....	216

复习与思考 .....	217
参考文献 .....	218
附录 .....	219
附录一 法定计量单位及单位换算 .....	219
附录二 某些气体的重要物理性质 .....	222
附录三 某些液体的重要物理性质 .....	223
附录四 空气的重要物理性质 .....	225
附录五 水的重要物理性质 .....	226
附录六 水在不同温度下的黏度 .....	227
附录七 饱和水蒸气表 .....	228
附录八 液体黏度共线图和密度 .....	232
附录九 气体黏度共线图 .....	234
附录十 管子规格 .....	236
附录十一 常用离心泵规格 (摘录) .....	238
附录十二 4-72-11 型离心式通风机的规格 .....	246
附录十三 列管式换热器规格 .....	247
附录十四 某些二元物系的气液平衡曲线 .....	249
附录十五 几种冷冻剂的物理性质 .....	251

# 绪论

## ——认识化工生产过程与单元操作

### 一、化工生产过程

以化学手段将原料加工成有用产品的生产过程被称为化工生产过程,其中以化学反应为核心,并辅助大量的物理操作步骤。所得化工产品不仅是工业、农业和国防的重要生产资料,同时也是人们日常生活中的重要生活资料。近年来,传统化学工业向石油化工、精细化工、生物化工、环境、医药、食品、冶金等工业领域延伸与结合,并出现“化工及其相近过程工业”的提法,更显见其在国民经济中的重要地位。

化工产品种类繁多,每种产品的生产过程都有各自的工艺特点,加工过程也形态各异。但加以归纳,均可视为由原料的预处理过程、化学反应过程和反应产物后处理过程三个基本环节组成。例如,乙烯催化氧化制取聚乙烯的生产过程是以乙烯为原料,在高温、高压及过氧化物为催化剂等条件下反应,制取聚乙烯。在反应前,乙烯需经压缩机压缩、预热器预热等原料预处理过程,以满足化学反应所需条件。反应后产物中除反应产物外,还有未反应的乙烯,须经后处理过程,将产物与未反应乙烯分离,并经造粒、压缩而获得聚乙烯。其生产过程简图如图0-1所示。

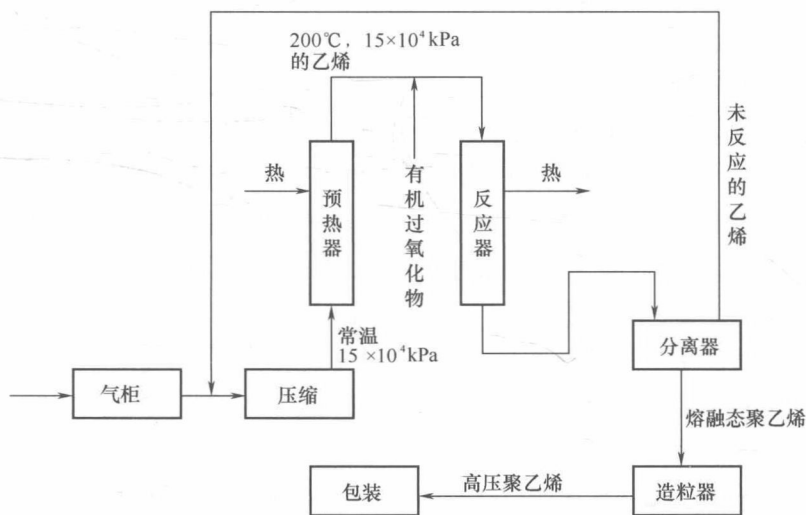


图0-1 聚乙烯的生产过程

由图0-1可以看出,上述生产过程中除乙烯聚合过程属化学反应过程外,原料和反应后产物的提纯、精制等前、后处理过程,包括为使反应过程维持一定的温度、压力而进行的加热、冷却、压缩等均为物理加工过程。这些前后处理步骤在化工生产中的地位是非常重要的,它们可归纳为若干种基本的物理过程,称为单元操作。化工单元操作技术就是研究这些单元操作的课程。



## 二、单元操作

### (一) 单元操作的定义及分类

通常,一种产品从原料到成品的生产过程中,往往需要几个、十几个甚至几十个物理加工过程。但研究化工生产诸多物理过程后发现,根据它们的操作原理,可以归纳为若干个基本单元操作过程。这些基本的单元操作过程具有共同的基本原理并各有其通用的典型设备。例如,合成氨、硝酸和硫酸的生产过程中,都是采用吸收操作分离气体混合物,而且都遵循亨利定律及相平衡原理,所以吸收是一个基本单元操作,且都是在吸收塔内进行的。又如尿素、聚氯乙烯的生产过程中,都采用干燥操作除去固体中的水分,所以干燥也是一个基本单元操作,且均是在干燥器内进行的。再如乙醇、乙烯及石油加工等生产过程中,都采用蒸馏操作分离液体混合物,达到提纯产品的目的,所以蒸馏也为一基本单元操作,其原理都遵循相平衡和两相间扩散传质规律,且都是在蒸馏设备中进行。

我们将这些具有共性的基本操作称为单元操作。化工生产过程是由若干单元操作与化学反应串联组合而成。

各单元操作并不是孤立的,经过分析研究,按照各单元操作遵循的基本规律,可把它们归纳为如下几类:

- (1) 动量传递过程:包括遵循流体力学基本规律的单元操作,如流体的输送、搅拌、沉降、过滤等。
- (2) 热量传递过程:包括遵循传热基本规律的单元操作,如加热、冷却、蒸发和冷凝等。
- (3) 质量传递过程:包括遵循传质基本规律的单元操作,如蒸馏、吸收、干燥、膜分离、萃取、结晶等。

化工单元操作技术课程以单元操作作为研究对象,内容包括单元操作基本理论、单元操作设备、工艺计算和操作训练。主要研究相关单元操作的基本原理和规律,熟悉掌握实现这些操作的设备结构、工作原理、操作调控方法、主要性能和有关技术问题,并具有一定的运算、选型能力,运用这些知识分析和解决工程实践中的实际问题;学会单元操作过程的操作和调节,在操作发生故障时,能够查找故障原因,提出排除故障的措施,解决操作中的实际问题,使各项操作在最优化条件下进行。

### (二) 单元操作中常用的基本概念和观点

在分析各单元操作原理及设备计算中,都是以物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率这四种基本计算为依据。

**1. 物料衡算** 根据质量守恒定律,在任何一个稳定的化工生产系统中,输入系统的物料质量必等于从系统中输出的物料质量与在系统中积累的物料质量之和,即:

$$\sum F = \sum D + A$$

式中:  $\sum F$  —— 输入系统物料总量, kg;

$\sum D$  —— 输出系统物料总量, kg;

$A$  —— 积累物料总量, kg。

上式是物料衡算的通式,该式不仅适用于整个生产系统的计算,也适用于生产系统中某一工序或某一设备的计算;既可对系统作总的物料衡算,也可对混合物中的某一组分进行物料衡算。

进行物料衡算时,首先要确定衡算的范围,明确是对整个生产系统作衡算,还是对某一工序或某一设备作衡算;是对总物料进行衡算,还是对物料中某一组分作衡算。其次是确定衡算基准,对于间歇生产,一般以每一生产周期为基准进行衡算;对于连续生产则以 kg/h 或 kg/s 为基准进行衡算。

【例 0-1】已知条件如图 0-2 所示,求产量( $D$ )和残液量( $W$ )。

解:计算基准为 1h,列出虚线内总物料和易挥发组分的物料衡算式。

$$\text{总物料: } F = D + W$$

$$\text{易挥发组分: } Fx_F = Dx_D + x_W W$$

将已知条件代入,解得:

$$D = 6229.5 \text{ kg/h}$$

$$W = 8770.5 \text{ kg/h}$$

物料衡算是化工计算中的重要内容之一,它对设备尺寸的设计和生产过程的分析,具有重要意义。

**2. 能量衡算** 根据能量守恒定律,在任何一個稳定的化工生产系统中,输入系统的能量必等于从系统中输出的能量与在系统中损失的能量之和。能量衡算应包括与该过程有关的各种形式的能:热能,机械能,电能,化学能等,但在许多化工生产中所涉及的能量仅为热能,所以本书中能量衡算简化为热量衡算,即:

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_L$$

式中:  $\sum Q_i$  ——输入系统的各物料带入的总热量, kJ;

$\sum Q_o$  ——输出系统的各物料带出的总热量, kJ;

$Q_L$  ——系统损失的热量, kJ。

进行能量衡算时,也要先确定衡算的范围,明确是对整个生产系统作衡算,还是对某一工序或某一设备作衡算;然后确定衡算基准,对于间歇生产,一般以每一生产周期为基准进行衡算;对于连续生产则以 kJ/h 或 kJ/s 为基准进行衡算。

【例 0-2】已知条件如图 0-3 所示,对该换热器进行热量衡算。

解:根据能量守恒定律,列出虚线内热量衡算式

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_L$$

通过热量衡算,可以检验在生产操作中热量的利用及损失情况;而在生产工艺与设备设计

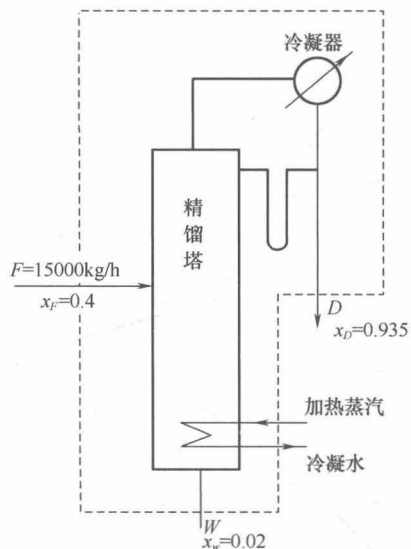


图 0-2

时,通过热量衡算可以确定是否需要从外界引入热量或向外界输出热量。

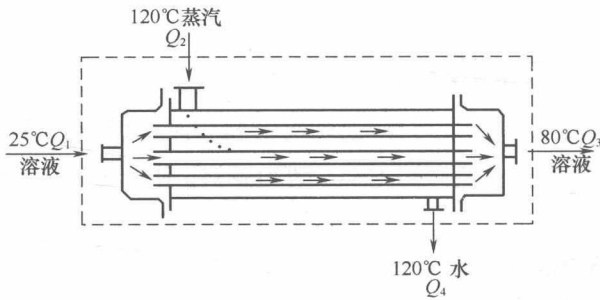


图 0-3

**3. 平衡关系** 物系在自然界发生变化时,其变化必趋于一定方向,如果任其发展,结果必达到平衡关系为止。

平衡状态表示的就是各种自然发生的过程可能达到的极限程度,除非影响物系的情况有变化,否则其变化的极限是不会改变的。一般平衡关系则为各种定律所表明,如热力学第二定律、拉乌尔定律等。在化工生产过程中,可以从物系平衡关系来推知其能否进行以及进行到何种程度。平衡关系也为设备尺寸的设计提供了理论依据。

**4. 过程速率** 任何一个不处于平衡状态的物系,必然发生使物系趋向平衡的过程,但过程是以什么速率趋向平衡,这不决定于平衡关系,而是受多方面的因素影响的,由于对这些因素有些还不清楚,目前过程速率近似地采用推动力除以阻力表示。

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

这里的过程推动力,可依据具体过程而有不同的理解,但必要的条件是物系在平衡状态时推动力必须等于零。至于过程的阻力则较为复杂,要具体情况具体分析。

上述四个基本概念,在讨论单元操作时,常被引用来反映过程中物料的变化规律,此外,在具体解决化学工业建设和生产问题时,它们也是制订技术经济比较方案的重要依据。