

高职高专教材

化工原理

第二版
上册

陆美娟 张浩勤 主编
朱士亮 主审



化学工业出版社
职业教育教材出版中心

高 职 高 专 教 材

化 工 原 理

第 二 版

上 册

陆美娟 张浩勤 主编

朱士亮 主审



化 学 工 业 出 版 社
职 业 教 育 教 材 出 版 中 心

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理. 上册/陆美娟, 张浩勤主编. —2 版. —北京:
化学工业出版社, 2006. 4
ISBN 7-5025-8528-1

I. 化… II. ①陆…②张… III. 化工原理 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 034597 号

高职高专教材

化工原理

第二版

上册

陆美娟 张浩勤 主编

朱士亮 主审

责任编辑: 蔡洪伟 骆文敏

责任校对: 战河红

封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社

出版发行
职业教育教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 15½ 字数 378 千字

2006 年 7 月第 2 版 2006 年 7 月北京第 11 次印刷

ISBN 7-5025-8528-1

定价: 25.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

第二版前言

本教材是按照原化学工业部的要求,为满足高职高专化工类专业《化工原理》教学需要而编写的。本教材于1995年出版,2001年进行过简单的修改。多年教学实践证明,本教材的体系、内容基本能够满足教学需要,适于自学,受到了广大师生的欢迎。但随着化工技术的发展,本教材的部分内容需要更新,故进行本次修订。

本教材主要介绍化工单元操作的基本原理、计算方法、典型设备以及有关的化工工程实用知识。其编写原则是,从便于自学和实际应用出发,以必需、够用为度,加强运用基本概念和工程观点分析解决化工实际问题的训练。上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、非均相混合物的分离、传热、蒸发和附录;下册包括吸收、蒸馏、气液传质设备、萃取、干燥和膜分离技术。

本次修订保留了原教材的特点,教材内容仍然按照“熟练掌握”、“理解”和“了解”三个层次编写,并通过例题、思考题和习题的反复练习达到理解和熟练掌握的要求;为了突出高等职业教育的应用特色,对理论推导部分进行了必要的简化,删去了工程上已较少使用的内容和计算方法;删去了部分难度大的例题和习题;适当增加了新型设备应用和最新研究成果的内容;并增加膜分离技术一章,简要介绍膜分离技术的基本概念和应用。另外,为了照顾不同类型学制和不同专业的需要,本书部分章节内容列为选学,用“*”号标出(包括部分习题)。

自本教材问世以来,得到了许多读者和同行的支持和鼓励。在本次修订过程中,开封大学王方林、平原大学徐绍红等提出了许多宝贵的建议,在此表示感谢。

同时十分感谢第一版教材的编审;特别感谢朱士亮教授再次为本书再版审稿并提出了许多宝贵的意见。感谢郑州大学各级领导、有关负责同志及化工原理教研室的同事所给予的支持和帮助。

本次修订主要由郑州大学陆美娟和张浩勤负责,刘金盾编写了膜分离技术一章,谭翎燕对习题进行了校正。

由于编者学识和水平有限,不当之处,敬请指正。

编者
2006年2月

第一版前言

根据化学工业部(93)化人培便字184号文件,化工部属院校成人教育协作组将陆续组织编写一套适合函授大学、职工大学、业余大学等以自学为主的各化工类专业通用的成人教育教材,本书就是其中的一种。

《化工原理》是化工类专业极为重要的专业基础课程,根据本教材编写大纲,主要介绍化工单元操作的基本原理、计算方法、典型设备以及有关的化工工程实用知识。其编写原则是,从便于自学和实际应用出发,以必需、够用为度,加强运用基本概念和工程观点分析解决化工实际问题的训练。

为了便于自学,教材内容按“熟练掌握”、“理解”和“了解”三个层次编写,在每章开始的“本章学习要求”中都有明确的说明以分清主次,并通过例题、思考题和习题的反复练习达到理解和熟练掌握的要求。有些地方增加了思考内容或小结;增加了不同层次的实用性的例题和对例题的分析;指出了随学习进度所应完成的习题号并给出习题答案;章末的思考题大多供复习使用,包括必须掌握的概念和专用名词的定义和内涵、研究对象的各种影响因素的分析等方面的内容,有的概念要通过对比以深入理解其意义和作用,有助于训练分析和归纳问题的能力。

本书的计量单位统一使用我国法定计量单位,但根据当前工程实际,学生还应熟悉各种物理量,特别是压强、黏度、能量、传热系数等在不同单位制之间的换算。化工原理教材中历来使用符号较多,本书试图在GB 3100~3102规定的基础上力求符号的统一。在各章后仍有“本章主要符号说明”,但与前章通用的符号不再重复列出。设备、材料的规格型号尽量采用最新的国标或部颁标准,以利于实际应用。鉴于化工工程计算中有效数字3~4位已经足够,对附录中的部分物性数据作了简化。

为了照顾不同类型学制和不同专业的需要,本书部分章节内容列为选学,用“*”号标出(包括部分习题)。因此本书既可作为各种成人高等教育化(轻)工类专业的教材,也可作为全日制化工类专业的大专教材。

本书分上、下两册出版,由郑州工学院陆美娟主编。参加编写人员有:陆美娟(绪论、第一、二、五、九、十章)、叶学军(第三章)、张浩勤(第四、六章)、王红(第七、八章)、赵继红(附录及部分习题的选校)。本书上册由郑州工学院朱士亮教授主审,下册由北京化工大学李云倩教授、黄大铨副教授主审。

本书编写过程中,得到了北京化工大学、青岛化工学院、郑州工学院各级领导以及各校成人教育学院的有关负责同志的大力支持和协助,化工部属院校的化工原理教研室的老师们对编写大纲提出了许多宝贵意见,在此向他们表示深切的谢意。

由于编者水平有限,错误不当之处在所难免,敬希指正。

编者

1995年3月

目 录

绪论	1
学习要求	1
一、《化工原理》课程的性质、地位和作用	1
二、化工过程与单元操作	1
三、单元操作的物料衡算与热量衡算	6
四、量纲一致性与单位一致性	10
思考题	11
习题	12
第一章 流体流动	13
学习要求	13
第一节 概述	13
一、流体的连续介质模型	13
二、流体的密度与比体积	13
三、流体的黏性	15
* 四、流体的压缩性与膨胀性	17
第二节 流体静力学	18
一、流体的压强	18
二、流体静力学基本方程	19
第三节 流体动力学	24
一、流量与流速	25
二、流体定常流动过程的物料衡算——连续性方程	27
三、流体定常流动过程的机械能衡算——柏努利方程	28
四、实际流体的基本流动现象	35
第四节 管内流动阻力	39
一、化工管路的构成	39
二、直管内的流动阻力	43
三、局部阻力	52
四、流体在管内流动的总阻力计算	55
第五节 管路计算	57
一、简单管路 with 复杂管路	57
二、简单管路的计算	58
第六节 流量的测定	61
一、皮托测速管 (简称皮托管)	61
二、孔板流量计	63

三、文氏流量计 (或称文丘里流量计)	65
四、转子流量计	66
思考题	68
习题	69
本章主要符号说明	72
第二章 流体输送机械	73
学习要求	73
第一节 概述	73
一、流体输送机械的作用	73
二、流体输送机械的分类	73
第二节 离心泵	74
一、离心泵的工作原理与主要部件的结构	74
二、离心泵的主要性能参数	76
三、离心泵的特性曲线及其影响因素分析	78
四、离心泵的工作点与流量调节	80
五、离心泵的汽蚀现象与安装高度	82
六、离心泵的安装、运转、类型与选用	84
第三节 其他类型的化工用泵	89
一、往复泵	89
二、旋转泵	91
三、旋涡泵	92
第四节 气体输送机械	92
一、离心式通风机	93
二、鼓风机	95
三、压缩机	95
四、真空泵	96
思考题	97
习题	97
本章主要符号说明	98
第三章 非均相混合物的分离	100
学习要求	100
第一节 沉降	101
一、重力沉降	101
二、离心沉降	104
三、沉降分离设备	105
第二节 过滤	110
一、概述	110
二、恒压过滤	112
三、过滤设备	116
第三节 分离设备的选择	120

思考题.....	121
习题.....	121
本章主要符号说明.....	122
第四章 传热	124
学习要求.....	124
第一节 概述.....	124
一、传热在化工生产中的应用.....	124
二、传热的基本方式.....	124
三、间壁式换热器传热过程简述.....	125
第二节 热传导.....	126
一、热传导的基本定律.....	126
二、通过平壁的定常热传导.....	128
三、通过圆筒壁的定常热传导.....	130
第三节 对流传热.....	133
一、对流传热基本方程和对流传热系数.....	133
二、影响对流传热系数的因素.....	135
三、量纲分析法在对流传热中的应用.....	135
四、流体无相变时的对流传热系数.....	137
五、流体有相变化时的对流传热系数.....	141
六、对流传热小结.....	146
第四节 传热计算.....	147
一、热量衡算.....	147
二、传热速率方程.....	148
三、传热平均温度差.....	149
四、传热系数.....	154
五、传热计算示例与分析.....	157
六、工业热源与冷源.....	161
* 第五节 热辐射.....	163
一、热辐射的基本概念.....	163
二、两固体间的热辐射.....	164
三、辐射对流联合传热.....	166
第六节 换热器.....	167
一、间壁式换热器的类型.....	167
二、列管式换热器的工艺设计和选用.....	173
三、传热过程的强化.....	179
思考题.....	180
习题.....	181
本章主要符号说明.....	184
* 第五章 蒸发	186
学习要求.....	186

第一节 概述.....	186
一、蒸发过程及其特点.....	186
二、蒸发过程的分类.....	187
第二节 单效蒸发过程.....	187
一、单效蒸发流程.....	187
二、单效蒸发过程的计算.....	188
三、蒸发器的生产能力和生产强度.....	193
第三节 多效蒸发过程.....	194
一、多效蒸发的操作流程.....	194
二、多效蒸发的最佳效数.....	195
* 三、多效蒸发过程的计算.....	196
第四节 蒸发装置及其选型.....	196
一、蒸发器.....	196
二、蒸发器的选用.....	200
三、蒸发装置的附属设备.....	201
思考题.....	202
习题.....	202
本章主要符号说明.....	202
附录	204
附录一 化工常用法定计量单位及单位换算.....	204
附录二 某些液体的重要物理性质.....	207
附录三 常用固体材料的密度和比热容.....	208
附录四 干空气的重要物理性质 (101.33kPa)	208
附录五 水的重要物理性质.....	209
附录六 水在不同温度下的黏度.....	210
附录七 饱和水蒸气表 (按温度排列)	211
附录八 饱和水蒸气表 (按压强排列)	212
附录九 液体黏度共线图.....	213
附录十 气体黏度共线图 (常压下用)	214
附录十一 液体比热容共线图.....	216
附录十二 气体比热容共线图 (常压下用)	217
附录十三 气体导热系数共线图 (常压下用)	218
附录十四 液体比汽化焓 (蒸发潜热) 共线图.....	220
附录十五 液体表面张力共线图.....	222
附录十六 无机溶液在大气压下的沸点.....	224
附录十七 管子规格.....	224
附录十八 泵规格 (摘录)	225
附录十九 4-72-11 型离心通风机规格 (摘录)	230
附录二十 热交换器系列标准 (摘录)	230
参考文献	237

绪 论

学 习 要 求

1. 熟练掌握的内容

化工过程的物料衡算与能量衡算的基本概念与计算步骤。

2. 理解的内容

化工生产过程的构成与分类特征；单元操作的概念、单元操作计算的一般内容及其依据的基本规律与基本关系；量纲与量纲一致性、单位与单位一致性。

3. 了解的内容

《化工原理》课程的性质、地位和作用；单元操作与“三传”过程。

一、《化工原理》课程的性质、地位和作用

《化工原理》是化工类及其相近专业的一门基础技术课程和主干课程，它在整个专业培养过程中有以下特殊的地位和作用。

① 在教学计划中，这门课程是承前启后、由理及工的桥梁，又是各种化工专业课程的基础。先行的数学、物理、化学等课程主要是了解自然界的普遍规律，属于自然科学的范畴，而《化工原理》则属于工程技术科学的范畴，学生将从本课程开始运用这些普遍规律，进入化工专业领域的学习。

② 从学科性质看，《化工原理》是化学工程学的的一个分支，主要研究化工过程中各种单元操作，它来自化工生产实践，又面向化工生产实践。可以毫不夸张地说，化工技术工作者无论是从事化工过程的开发、设计还是生产，都必然而且经常会遇到各种单元操作问题，这就必须熟练掌握《化工原理》的基本概念、基本知识和基本方法。

③ 《化工原理》课程具有显著的工程性，要解决的问题是多因素、多变量的综合性的工业实际问题。因此，分析和处理问题的观点和方法也就与理科课程不同。同时，它又是一门计算性较强的课程，要通过一定数量的习题和课程设计以得到工程计算的 actual 训练。

二、化工过程与单元操作

(一) 化工过程的特征与构成

化工过程可以看成是由原料预处理过程、反应过程和反应产物后处理过程三个基本环节构成的。其中，反应过程是在各种反应器中进行的，它是化工过程的中心环节。

反应过程必须在某种适宜条件下进行，例如，反应物料要有适宜的组成、结构和状态，化学反应要在一定的温度、压强和反应器内的适宜流动状况下进行等。而进入化工过程的初始原料通常都会有各种杂质并处于环境状态下，必须通过原料预处理过程使之满足反应所需要的条件。同样，反应器出口的产物通常都是处于反应温度、压强和一定的相状态下的混合

物，必须经过反应产物的后处理过程，从中分离出符合质量要求的、处于某种环境状态下的目的产品，并使排放到环境中去的废料达到环保的规定要求；后处理过程的另一任务是回收未反应完的反应物、催化剂或其他有用的物料重新加以利用。

由此可见，在原料预处理和反应产物后处理过程中都要进行一系列的物理变化过程，如加热、冷却、增减压、使物料发生相变化（如汽化、冷凝、结晶、溶解等）、使均相物料中各组分进行分离、使不同相态的物料彼此分离等。即使在反应器中，为了维持适宜的反应条件，也需组织一系列物理过程，如加入或移走热量、混合、搅拌等。经过长期的化工生产实践发现，各种化工产品的生产过程所涉及的各种物理变化过程都可归纳成为数不多的若干个单元操作。

图 0-1 表示氢氰酸的生产过程。天然气（主要含甲烷）、氧气分别经过滤稳压，液氨经汽化、过滤后，三者以一定配比混合进入反应器，这一部分属于原料预处理阶段。在反应器中进行甲烷部分燃烧反应和 HCN 的合成反应：

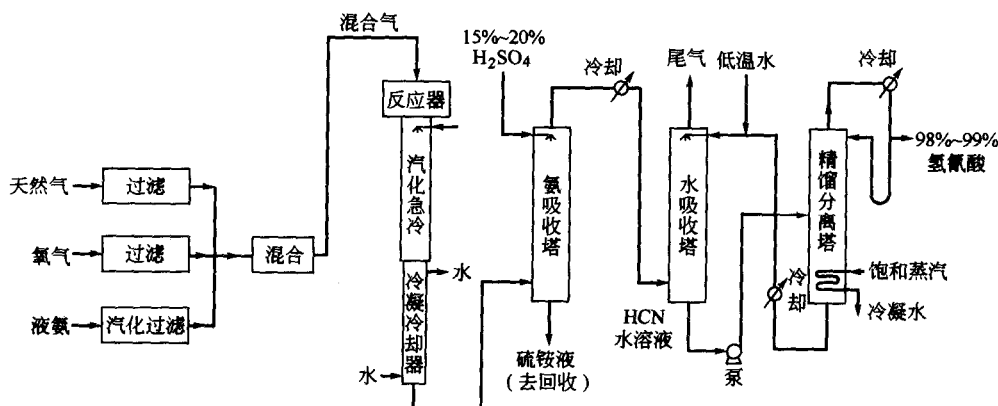
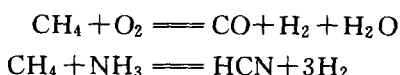


图 0-1 氢氰酸生产流程示意图

反应器出口产物是 1500℃ 左右的含 HCN、CO、H₂O、H₂ 以及未反应完的 CH₄、NH₃、O₂ 的高温气体混合物，先经喷水急冷，利用水的汽化快速降低反应产物的温度以中止反应；然后经冷凝冷却器进入氨吸收塔，用稀硫酸吸收混合气中的氨；脱氨后的气体再经冷却降温进入水吸收塔，用低温水吸收其中的 HCN；吸收后的尾气经碱液洗涤（图中未画出）脱除其中残余的 HCN 后供进一步利用；水吸收塔底得到的 1.5% HCN 水溶液经泵加压输送到精馏塔，在塔底加热使溶液部分汽化，利用 HCN 和水的挥发性的差异，富含 HCN 的蒸汽从塔顶排出经冷凝冷却后得到浓度为 98%~99% 的氢氰酸，塔底排出的含少量 HCN 的水经冷却后回到水吸收塔循环使用。这一部分属于产物的后处理阶段（流程中，原料与产品贮槽、尾气贮柜以及各种中间贮槽均未画出）。

由图 0-1 可见，除反应器中的反应过程外，流程中包括了流体流动、流体输送、过滤、混合、汽化、冷凝冷却、加热、吸收、精馏等物理过程，这些过程都是在特定的设备中进行的。因此也可以说，任何一个化工生产过程都是由若干种完成特定任务的设备（包括反应器、完成各单元操作的设备和贮料设备）按一定顺序、由各种管道和输料装置连接起来的组合体。

(二) 单元操作的研究内容与分类

各种单元操作都是依据一定的物理或物理化学原理，在某些特定的设备中进行的特定的过程。过程和设备是相互依存的，因此《化工原理》也曾称为《化工过程与设备》课程，其研究内容主要是各种单元操作的基本原理与单元操作过程计算、典型单元操作设备的合理结构及其工艺尺寸的设计与计算、设备操作性能的分析以及组织工程性实验以取得必要的设计数据，找出强化过程、改进设备的途径。

一些主要的单元操作按其基本原理和作用分类列表，如表 0-1 所示。这些单元操作在其他工业过程中，也有广泛的应用。在本课程中，主要学习以流体动力过程、传热过程和传质过程（包括热、质同时传递过程）为基本过程的一些主要的单元操作。

表 0-1 单元操作的名称及分类

基本过程	单元操作名称	原 理 及 作 用
流体动力过程 (动量传递过程)	流体输送	利用外力做功将一定量流体由一处输送到另一处
	沉降	对由流体(气体或液体)与悬浮物(液体或固体)组成的悬浮体系,利用其密度差在力场中发生的非均相分离操作
	过滤	使液固或气固混合体系中的流体强制通过多孔性过滤介质,将悬浮的固体物截留而实现的非均相分离过程
	搅拌	搅动物料使之发生某种方式的循环流动,使物料混合均匀或使过程加速
	混合 流态化	使两种或两种以上的物料相互分散,以达到一定的均匀程度的操作 利用流体运动使固体粒子群发生悬浮并使之带有某些流体的表现特征,以实现某种生产过程的操作
传热过程 (热量传递过程)	换热	使冷热物料间由于温度差而发生热量传递,以改变物料的温度或相态的操作
	蒸发	使溶液中的溶剂受热汽化而与不挥发的溶质分离,从而得到高浓度溶液的操作
传质分离过程 (质量传递过程)	吸收	利用气体组分在液体溶剂中的溶解度不同以实现气体混合物分离的操作
	蒸馏	利用均相液体混合物中各组分的挥发度不同使液体混合物分离的操作
	萃取	利用液体混合物中各组分在液体萃取剂中的溶解度不同而分离液体混合物的操作
	浸取	用溶剂浸渍固体物料,将其中的可溶组分与固体残渣分离
	吸附	利用流体中各组分对固体吸附剂表面分子结合力的不同,将其中一种或几种组分进行吸附分离的操作
	离子交换 膜分离	用离子交换剂从稀溶液中提取或除去某种离子 利用流体中各组分对膜的渗透能力的差别,用固体膜或液体膜分离气体、液体混合物
热、质传递过程	干燥 增(减)湿	加热湿固体物料,使所含湿分(水分)汽化而得到干固体物料的操作 通过热量传递以及水分在液相与气相间的传递,以控制气体中的水汽含量的操作
	结晶	从气体或液体(溶液或熔融物)混合物中析出晶态物质的操作
热力过程	制冷	加入功使热量从低温物体向高温物体转移的热力学过程
粉体工程	颗粒分级	将固体颗粒分成大小不同的部分
	粉碎	在外力作用下使固体物料变成尺寸更小的颗粒

根据操作方式，又可将单元操作分为连续操作和间歇操作两类。

在连续操作中，物料与能量连续地进入设备，并连续地排出设备。过程的各个阶段是在同一时间、在设备的不同空间位置上进行的。例如图 0-1 中的水吸收塔，塔底进入的气体中 HCN 的浓度最高，随着气体在塔内上升，HCN 逐渐溶解到下降的低温水中而使其浓度逐渐降低，在塔的不同高度处吸收处于不同的阶段。

间歇操作的特点是操作的周期性。物料在某一时刻加入设备进行某种过程，过程完成后将物料一次卸出，然后开始新的周期。间歇过程的各个阶段是在同一设备空间而在不同时间进行的。如水壶中烧开水是间歇操作，而工业锅炉中产生水蒸气则是连续操作。连续操作适于大规模生产，其原料消耗、能量损失和劳动力投入都相对较少，因而操作成本也相应较低，同时也较易实现操作控制与生产自动化。间歇操作的设备比较简单，因而设备的投资较低，操作灵活性较大，适于小批量规模的生产以及某些原料或产品品种与组成多变的场合。

根据设备中各种操作参数随时间的关系，又可将单元操作分为不定常操作与定常操作两类。在不定常操作中，设备中各部分的操作参数随时间而不断变化。这种情况通常是由于同一时间内进入和离开设备的物料量和能量并不相同，且随时间而变化，因而导致设备内部发生物料和能量的正的或负的积累。定常操作时，设备内各种操作参数统计地不随时间而变。对定常操作的物理过程，进、出设备的物料量或能量应相等，且不随时间而变，设备内部也不发生物料或能量的积累。

间歇操作和连续操作设备的开、停工阶段或处理量变化时都属于不定常操作。定常操作的计算比较简单，在本书中不作特殊说明时，讨论对象均为定常操作。

(三) 单元操作与工程观点

《化工原理》的内容是从许多具体的化工生产过程中抽象概括出来的，本课程的学习目的就是应用这些具有一般性的基本概念和知识，针对不同场合和不同生产对象，具体地去解决某个特定的化工实际过程中需要配置的各种单元操作过程和设备的开发、设计与操作问题。这些问题都具有强烈的工程性，具体表现在以下几点。

(1) 过程影响因素多 对于每一种单元操作，其影响因素通常可划分为物性因素、操作因素和结构因素三类。

① 物性因素。同一类单元设备可用于不同的物系，物料的物理性质（如密度、黏度、表面张力、热导率等）和化学性质必对过程发生影响。在很多情况下，物系的物性对于单元设备的选型与设备的操作性能有决定性的影响。

② 操作因素。设备的各种操作条件，如温度、压强、流量、流速、物料组成等，在工业实际过程中，它们经常会发生变化并影响过程的结果。

③ 结构因素。是指单元设备内部与物料接触的各种构件的形状、尺寸和相对位置等因素，它们首先对物料在设备内的流动状况发生影响，并直接或间接地影响传热和传质过程的进行。

(2) 过程制约条件多 在工业上要实现一个具体的化工生产过程，客观上存在许多制约条件，如原料来源、冷却水的来源与水温、可供应的设备的结构材料的质量和规格、当地的气温和气压变化范围等。同时，单元设备在流程中的位置也制约了设备的进、出口条件。此外，还受安全防火、环保、设备加工、安装以及维修等条件的制约。

(3) 效益是评价工程合理性的最终判据 自然科学研究的目的是发现规律，而进行工业过程的目的是为了最大限度地取得经济效益和社会效益，这是合理地组织一个工业过程的出发点，也是评价过程是否成功的标志。

(4) 理论分析、工业性试验与经验数据并重 由于工业过程的复杂性，许多情况下，单纯依靠理论分析有时只能给出定性的判断，往往要结合工业性试验、半工业性试验（也称中间试验）才能得出定量的结果。在过程设计与操作分析中也广泛使用各种经验数据，它们是

在长期的生产实践中总结出来的，熟练地运用这些经验数据，做到心中有“数”，对提高工作效率和可靠性将是非常有益的。

综上所述，要做到灵活地运用书本知识去解决工程实际问题，需要了解工程实际问题的特点，从工程实际出发，学会从经济角度去考虑技术问题，这是《化工原理》课程教学过程的一项重要任务。

(四) 单元操作计算的基本内容

各种单元操作的计算可以分为设计型计算与操作型计算两类。为完成规定的设计任务（一定的处理能力、产品规格和操作要求），计算过程需要的时间、设备的工艺尺寸（如设备的直径、高度等）、外加功率和热量等，属于设计型计算，它是进一步完成设备的机械设计或选型所必需的。对于已有的操作设备（即设备的工艺尺寸一定），核算其在不同情况（操作因素、物性因素变化时）下对操作结果的影响或完成特定任务的能力，都属于操作型计算，它对确定适宜的操作条件、分析操作故障、了解设备性能以及保证设备正常操作都是十分重要的。

尽管各种单元操作的任务与计算要求各不相同，处理对象与设备型式各异，但一般都要涉及以下基本计算，即物料衡算、能量衡算、过程速率、过程的极限以及物性计算。

(1) 物料衡算 它是以质量守恒定律为基础的计算。用来确定进、出单元设备（过程）的物料量和组成间的相互数量关系，了解过程中物料的分布与损耗情况，是进行单元设备的其他计算的依据。

(2) 能量衡算 它是以热力学第一定律即能量守恒定律为基础的计算。用来确定进、出单元设备（过程）的各项能量间的相互数量关系（包括各种机械能形式的相互转化关系），为完成指定任务需要加入或移走的功量和热量、设备的热量损失、各项物流的焓值等。

(3) 传递过程速率的计算 由表 0-1 可知，在各种单元操作中进行的基本过程主要是动量传递过程、热量传递过程和质量传递过程，俗称为“三传”。这三种传递过程往往是同时进行并相互影响的。通常把流体流动过程看成是动量传递过程，而大部分单元操作都涉及流体系统，显然，流体的流动情况对热量传递和质量传递的速率以及流动过程中的能量损耗都有显著影响。因此，在各类单元操作设备中，合理地组织这三种传递过程，达到适宜的传递速率，是使这些设备高效而经济地完成特定任务的关键所在，也是改进设备、强化过程的关键所在。

传递过程速率的大小决定过程进行的快慢，其通用表示式如下：

$$\text{传递过程速率} = \frac{\text{传递过程的推动力}}{\text{传递过程的阻力}} \quad (0-1)$$

对于不同的传递过程，其速率、推动力和阻力的内涵及其具体表达式是不同的。例如在传热过程中，传热速率是用单位时间传递的热量来表示，而传热推动力则用温度差来表示。

各种单元操作中传递速率的计算是本课程要解决的重要内容，将在有关章节逐一讨论。实际上，物料衡算、能量衡算和过程速率计算三者的结合构成了各种单元操作工艺计算的主要部分。

(4) 过程的热力学极限与临界点的计算 当设备或系统内过程达到热力学平衡时，过程就停止了，平衡状态是过程进行的热力学极限。

处于平衡状态的单相物流，其内部各处的热力学强度性质均一，不再存在温度、浓度与压强的差异，宏观的传递过程不再进行。平衡状态下的气相，可以用状态方程来表达其热力

学性质间的关系。

两相物流间达到平衡时，一般地有：平衡两相的温度和压强必定相同；平衡两相各组分的组成间存在确定的相平衡函数关系。这时两相间不发生宏观的质量传递与热量传递。

在传质分离过程和热、质传递过程的各单元操作计算中，相间平衡关系计算是十分重要的。对于理想体系的相平衡关系计算，要用到物理化学中熟知的理想气体状态方程、相律、拉乌尔定律、亨利定律等基本定律和关系式。

过程的临界点是指当过程的操作条件发生变化达到某个临界条件时，过程的状态和行为以及所遵循的动力学规律都将发生质的变化，有时甚至无法进行正常操作。这种临界点也可看成是原过程的一种动力学极限。如在气液逆流流动的吸收塔中，气体自下而上、液体依靠重力自上而下流动，当气体或液体量逐渐增加到某一程度时，液体将被气体托住而停止下流，并在设备内迅速积累，甚至向上溢出，原来的逆流流动被破坏，吸收过程无法再正常进行。因此，了解并预测各类单元操作中过程的临界点（动力学极限），对于正确进行过程计算、保证过程在正常范围内操作也是十分重要的。

(5) 物性计算 上述各项计算中都会涉及物系的某些物理和物理化学性质，它们既随不同物系而变化，又随物系的相状态、温度、压强而变化。不同物系的物性，有的可从有关手册上查得（参见本书部分附录），有的需用各种物性关系式来进行估算。一般在进行单元操作计算时，应先将各已知操作条件范围内的有关物性查算出来。

三、单元操作的物料衡算与热量衡算

(一) 物料衡算要点

(1) 选定适当的衡算系统作为衡算对象 衡算系统可以是一个单元设备或若干个单元设备的组合，也可以是设备的某一部分或设备的微分单元（如图 0-2）。

(2) 选定物料衡算基准 选定基准包括选定一股基准物流及其数量，它是物料衡算的出发点，其目的是为了保证物料衡算计算的一致性。对于间歇操作，常取一批原料或单位质量（或物质的量）原料为基准；对于连续操作，通常取单位时间（如 1h、1min 等）内处理的物料量为基准。基准的选择有一定的任意性，其原则是使计算尽量简化。

(3) 列出物料衡算式 单元操作涉及的是物理过程，不发生化学反应。根据质量守恒定律可以直接写出物理过程物料衡算的文字表达式：

进入系统的各股物流量 - 离开系统的各股物流量 = 系统中物料的积累量 (0-2)

上式可以用质量单位（如 kg 或 kg/s 等），也可用物质的量单位（如 kmol 或 kmol/s 等），但必须注意保持式中各项的单位一致。

由于物流常常是多组分的混合物，因此可以按进、出衡算系统的各物流的总物料量列出总衡算式，也可按各物流中的各组分分别列出组分衡算式。此外，物流中各组分的质量分数 w_i 和摩尔分数 x_i 之和均等于 1，即有 $\sum w_i = 1$ ， $\sum x_i = 1$ ，这称为组成归一性方程，在物料衡算中也经常要用到。

对于定常操作过程，系统中物料的积累量为零。

【例 0-1】 两股物流 A 和 B 混合得到产品 C。每股物流均由两个组分（代号 1、2）组成。物流 A 的质量流量为 $G_A = 6160 \text{ kg/h}$ ，其中组分 1 的质量百分数 $w_{A1} = 80\%$ ；物流 B 中组分 1 的质量百分数 $w_{B1} = 20\%$ ；要求混合后产品 C 中组分 1 的质量百分数 $w_{C1} = 40\%$ 。试求：需要加入物流 B 的量 G_B ，kg/h；产品量 G_C ，kg/h。

解 ① 按题意, 画出混合过程示意图, 标出各物流的箭头、已知量与未知量, 用闭合虚线框出衡算系统 (见图 0-2)。

② 过程为连续定常, 故取 1h 为衡算基准。

③ 列出衡算式:

总物料衡算 $G_A + G_B = G_C$, 代入已知数据得

$$6160 + G_B = G_C \quad (A)$$

组分 1 的衡算式 $G_A w_{A1} + G_B w_{B1} = G_C w_{C1}$, 代入已知数据得

$$6160 \times 0.80 + G_B \times 0.20 = G_C \times 0.40 \quad (B)$$

联解式 (A)、式 (B) 得

$$G_B = 12320 \text{ kg/h}, G_C = 18480 \text{ kg/h}$$

据组成归一性方程, 物流组分质量分数之和为 1, 即 $w_{A1} + w_{A2} = 1$, $w_{B1} + w_{B2} = 1$, $w_{C1} + w_{C2} = 1$, 因此也可列出组分 2 的衡算式:

$$G_A (1 - w_{A1}) + G_B (1 - w_{B1}) = G_C (1 - w_{C1}) \quad (C)$$

在 (A)、(B)、(C) 三个衡算式中, 只有两个方程是独立的。例如, 由式 (B) 与式 (C) 相加即可得到式 (A)。多余的一个衡算式可以用来检验计算结果是否正确。由此可以推得: 对于组分数为 k 的系统, 可以列出 k 个组分衡算式和一个总衡算式, 即有 $k+1$ 个物料衡算方程, 其中只有 k 个方程是独立的。

【例 0-2】 在连续干燥器中, 用热空气将含水 10% 的湿固体物料干燥到含水 1% (均为质量分数)。进口热空气中含有水汽量为 0.01kg 水汽/kg 干空气, 若要求出口废气中的水汽量不超过 0.12kg 水汽/kg 干空气, 求空气的单耗, kg 空气/kg 湿物料。

解 ① 题意分析: a. 过程是定常的; b. 衡算目的是求算每干燥 1kg 湿物料所消耗的原始空气量, 而不需求出各股物流的实际量; c. 固体物料中水分含量是用质量分数表示的, 而空气中的水汽含量是用质量比表示的。

② 具体计算

a. 画出衡算系统的示意图, 标出各物流的箭头、已知量和未知量 (图 0-3)。

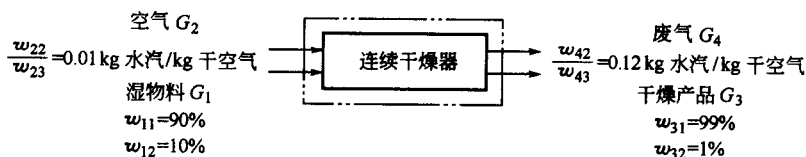


图 0-3 例 0-2 附图

系统中共有四股物流, 分别用第一下标 1、2、3、4 代表; 共有三个组分, 即干物料、水分、干空气, 分别用第二下标 1、2、3 代表。如 w_{12} 表示湿物料 (第 1 股物流) 中含有水分 (第二组分) 的质量分数 w_{31} 则表示干燥产品中含有水分的质量分数。

已知用质量比表示的空气中水汽含量, 即每千克干空气带有的水分量, 它也就是空气中水汽的质量分数与干空气的质量分数之比。对于入口热空气, $\frac{w_{22}}{w_{23}} = 0.01 \text{ kg 水汽/kg 干空气}$, 而对出口废气 $\frac{w_{42}}{w_{43}} = 0.12 \text{ kg 水汽/kg 干空气}$ 。

b. 选取衡算基准, 以虚线框为衡算系统, 列出衡算式。

解法一: 本题只要求算空气单耗, 而干空气在过程中为不变量, 因此可选取 100kg 干空气量为衡算基准, 即 $G_{23}=100\text{kg}$, 则

$$G_{23}=G_{43}, G_{22}=G_{23}\frac{w_{22}}{w_{23}}$$

而
$$G_2=G_{22}+G_{23}=G_{23}\frac{w_{22}}{w_{23}}+G_{23}=G_{23}\left(\frac{w_{22}}{w_{23}}+1\right)=100\times(0.01+1)=101\text{kg}$$

令空气单耗为 $B\text{ kg 空气/kg 湿物料}$, 即有 $B=\frac{G_2}{G_1}$, $G_1=\frac{101}{B}$ 。

列出干物料衡算式 (注意: 干物料也是不变量)

$$G_1 w_{11}=G_3 w_{31} \quad (\text{A})$$

即
$$G_3=\frac{w_{11}}{w_{31}}G_1=\frac{0.90}{0.99}\times\frac{101}{B}$$

空气经干燥器增加的水分量为

$$G_{43}\frac{w_{42}}{w_{43}}-G_{23}\frac{w_{22}}{w_{23}}=100\times(0.12-0.01)=11\text{kg}$$

列出水衡算式:

空气中增加的水分量 = 物料中减少的水分量

即
$$G_1 w_{12}-G_3 w_{32}=\frac{101}{B}\times 0.10-\frac{0.90}{0.99}\times\frac{101}{B}\times 0.01=11 \quad (\text{B})$$

由式 (B) 解得: $B=0.8347\text{kg 空气/kg 湿物料}$ 。

解法二: 也可选取 $G_1=100\text{kg}$ 作为基准物流量, 分别列出水分、干空气和干物料的组分衡算式, 并利用组分归一性方程作为练习, 将所有物流的组成统一用质量分数求解。读者可自行列出方程计算其结果。

两种解法的结果基本相同, 误差很小, 但解法一计算比较简练。由此可见: a. 存在于一股进料物流中且完整不变地转入一股流出物流中的组分称为不变组分, 故不变组分衡算式只有两项, 计算比较简便。在物料衡算时, 可先观察一下是否存在不变组分, 并选用不变组分衡算式。b. 选用衡算基准有一定的灵活性, 应根据题意选择适当的基准以简化计算。解法二要列出三个独立衡算式, 并需联立求解全部未知物流量; 由于本题只需求空气单耗, 用解法一就只需列出两个独立衡算式, 且可顺序求解。c. 题意中, 各物流的组成表示可能并不相同, 但在计算过程中必须保证各衡算式中每一项的单位一致, 以避免出错。d. 在工程计算中不要追求过多的有效数字位数, 物料衡算时一般可取三至四位。

物料衡算基本步骤小结如下。

① 针对提出的实际问题, 首先弄清楚衡算目的、已知量和未知量。

② 根据问题的类型和性质, 确定需要补充哪些数据, 并设法从各种渠道去得到这些数据。例如, 了解原料或产品的数量、规格和组成, 查算有关的物性数据和相平衡关系数据, 根据生产经验或工业试验结果选定某些操作条件等。

③ 用流程示意图表示衡算对象, 即将问题的文字描述转化为图形描述。用闭合线框出衡算系统, 注明进、出系统各物流及其组分的名称或代号、相状态、流量和组成 (包括已知量和未知量, 必要时将它们换算为统一单位)。