

化工原理

HUAGONG YUANLI

主 编 刘天成 王红斌 唐光阳
副主编 李宏利 周 强



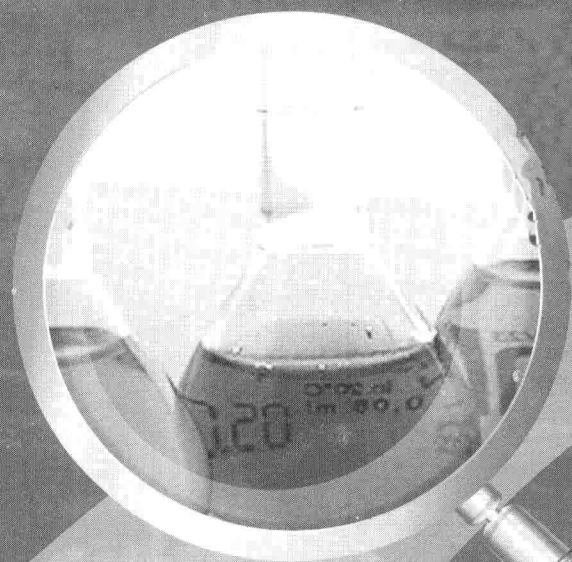
中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

化工原理

HUAGONG YUANLI

主 编 刘天成 王红斌 唐光阳

副主编 李宏利 周 强



中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书重点介绍单元操作的基本原理和相应的设备计算,基本的单元操作过程主要有物系分离、液体搅拌、传热、传质、蒸发、蒸馏、液液萃取、固体干燥等,开篇就重点介绍了流体流动现象与相应计算的基础理论知识。另外,还简要介绍了单元操作时用到的设备,如流体输送机械、搅拌器、蒸发器、吸收塔、气液传质设备、萃取设备、干燥器等。教材内容力求由浅入深,重点突出,注重实践。既可作为化学工程、石油化工、食品工程、制药工程等学科的参考教材,也可供从事化工及相关领域的教学、科研、生产等人进行参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 刘天成, 王红斌, 唐光阳主编. — 北京:
中国水利水电出版社, 2013. 10
ISBN 978-7-5170-1333-4
I. ①化… II. ①刘… ②王… ③唐… III. ①化工原
理 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 249828 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:杨元泓 封面设计:崔 蕾

书 名	化工原理
作 者	主 编 刘天成 王红斌 唐光阳
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www. waterpub. com. cn E-mail:mchannel@263. net(万水) sales@waterpub. com. cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	170mm×240mm 16 开本 25.75 印张 659 千字
版 次	2014 年 1 月第 1 版 2014 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	52.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

化工原理是化学工程学科最重要的核心课程之一。化工原理也称为化工单元操作,具有很强的理论性和工程实践性。随着化学工程学与其他学科的交叉渗透,出现了许多新的学科和边缘学科。化工单元操作越来越与其他学科如生物工程、食品工程、制药工程、环境能源工程、材料科学与工程、精细化工及应用化学等领域互相交叉,这些学科都离不开化工原理的基础知识。

本教材重点介绍化工单元操作的基本原理和工艺计算、设备的主要型式和选择等内容。对基本概念的阐述力求严谨,注重理论与实际的关联;编写格局由浅入深、循序渐进,便于学生接受;各个单元操作的广度与深度相当,配有典型例题,帮助学生阅读理解。

本教材的编写力图体现以下特点:

1. 结构安排合理,语言精简易懂;
2. 选取经典材料加以分析,结合新的内容来探讨;
3. 重点突出,理论与实践紧密结合;
4. 根据科学发展和认识规律,循序渐进,深入浅出地讲解。

本教材可作为化学工程、石油化工、食品工程、制药工程等学科的参考教材,也可供从事化工及相关领域的教学、科研、生产等人进行参考。

本教材以化工过程中的基本理论和工程方法为主,突出工程学的特点,系统而简明地阐述了化工单元操作的基本原理、过程计算、典型设备的结构特点及性能、过程或设备的强化途径等。全书共有 12 章。第 1 章绪论,分别是对化工原理的基本内容、三大守恒定律和研究方法等内容的介绍。第 2 章和第 3 章讲的是流体流动和流体输送机械。第 4 章到第 10 章讲的是化工中重要的单元操作,如非均相物系的分离、液体搅拌、传热、蒸发、传质分离过程、气体吸收、蒸馏等。第 11 章介绍了气液传质设备。第 12 章对萃取和干燥进行研究分析。

本教材在编写过程中得到了众多同行研究者的支持与帮助,在此表示衷心的感谢;编写时参考了大量的相关著作和文献资料,选用了其中的部分内容与素材,在此向有关作者表示感谢。

全书由刘天成、王红斌、唐光阳担任主编,李宏利、周强担任副主编,并由刘天成、王红斌、唐光阳负责统稿,具体分工如下:

- 第 2 章、第 5 章、第 6 章、第 9 章:刘天成(云南民族大学);
第 3 章、第 11 章:王红斌(云南民族大学);
第 1 章、第 12 章:唐光阳(云南民族大学);
第 8 章、第 10 章:李宏利(云南民族大学);

第4章、第7章:周强(云南民族大学)。

由于编写时间仓促,且编者水平有限,书中难免会出现一些错误和不妥之处,恳请广大师生批评指正,使本教材在使用过程中不断得到完善。

编 者

2013年6月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 化工原理基本内容	1
1.2 化工原理三大守恒定律	2
1.3 单元操作的研究方法	3
1.4 课程性质和任务	4
1.5 基本单位及换算	5
习题	8
第 2 章 流体流动	9
2.1 概述	9
2.2 流体静力学	14
2.3 流体流动中的守恒原理	20
2.4 流体流动现象	26
2.5 阻力损失	32
2.6 管路计算	40
2.7 流速和流量的测定	45
2.8 非牛顿流体的流动	50
习题	52
第 3 章 流体输送机械	61
3.1 概述	61
3.2 离心泵	63
3.3 往复泵	75
3.4 齿轮泵与旋涡泵	78
3.5 气体输送机械	80
习题	87
第 4 章 非均相物系的分离	92
4.1 概述	92
4.2 筛分	93
4.3 沉降分离	97
4.4 过滤	106

4.5 离心分离	119
习题	122
第 5 章 液体搅拌	125
5.1 搅拌设备	125
5.2 搅拌功率	128
5.3 搅拌器放大	132
习题	133
第 6 章 传热	135
6.1 概述	135
6.2 热传导	140
6.3 对流传热	146
6.4 两流体间传热过程的计算	153
6.5 热辐射	160
6.6 传热设备	165
习题	175
第 7 章 蒸发	178
7.1 概述	178
7.2 单效蒸发	181
7.3 多效蒸发	185
7.4 蒸发设备	191
习题	200
第 8 章 传质分离过程概论	202
8.1 概述	202
8.2 扩散原理	206
8.3 流体与界面间的传质	212
8.4 质量、热量、动量传递之间的联系	216
习题	216
第 9 章 气体吸收	218
9.1 概述	218
9.2 气液相平衡	224
9.3 吸收传质速率	231
9.4 吸收塔的计算	238
9.5 其他类型的吸收	250
9.6 传质系数和传质理论	253
习题	259
第 10 章 蒸馏	262
10.1 概述	262
10.2 双组分溶液的气液相平衡	263

10.3	蒸馏方式	270
10.4	二元连续精馏的分析和计算	276
10.5	多元蒸馏	292
	习题	298
第 11 章	气液传质设备	303
11.1	板式塔	303
11.2	填料塔	318
	习题	332
第 12 章	萃取和干燥	334
12.1	萃取	334
12.2	干燥	358
	习题	382
	主要符号说明	385
	附录	391
	参考文献	403

第1章 绪 论

1.1 化工原理基本内容

化工生产过程泛指对原料进行化学加工,最终获得有价值产品的生产过程。由于原料、产品的多样性及生产过程的复杂性,形成了数以万计的化工生产工艺。纵观纷杂众多的化工生产过程都是由化学反应及若干物理操作有机组合而成,其操作步骤多,原料在个步骤中依次通过若干设备,经历相应的处理方式后方能成品。由于化学工业中不同行业所用的原料与所的产品不同,所以各种化工过程的差别很大。

一个化工过程所包含的操作步骤可分为两大类:一类以进行化学反应为主,通常是在反应器中进行;另一类则为不进行化学反应的物理过程,包括原料预处理过程和反应产物后处理过程。虽然反应过程是生产的核心,但它在工厂的设备投资和操作费用中通常并不占据主要比例,实际上起决定作用的往往是众多的物理过程,它们决定了整个生产的经济效益。构成多种化工产品生产的物理过程按其原理都可归纳为几个基本过程。这些基本的物理操作统称为化工单元操作,简称为单元操作。只有对各种不同的化工生产中的单元操作进行研究,才能揭示其共性的本质、原理和规律。化工原理的基本内容就是阐述各单元操作的基本原理、过程计算及典型设备。

各种单元操作依据不同的物理化学原理,采用相应的设备,达到各自的工艺目的。对于单元操作,可从不同角度加以分类。根据各单元操作所遵循的基本规律,将其划分为如下几种类型。

- (1) 遵循流体动力学基本规律的单元操作,包括流体输送、沉降、过滤、搅拌等。
 - (2) 遵循热量传递基本规律的单元操作,包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。
 - (3) 遵循质量传递基本规律的单元操作,包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、膜分离等。从工程目的来看,这些操作都可将混合物进行分离,故又称之为分离操作。
 - (4) 遵循热质传递规律的单元操作,包括气体的增湿与减湿、结晶、干燥等。
- 另外,还有热力过程、粉体工程等单元操作。

单元操作有下列特点:①它们都是物理性操作,即只改变物料的状态或其物理性质,而不改变其化学性质;②它们都是化工过程中共有的操作,但不同的化工过程中所包含的单元操作数目、名称与排列顺序各异;③某单元操作用于不同的化工过程,其基本原理并无不同,进行该操作的设备往往也是通用的。当然,具体运用时也要结合各化工过程的特点来考虑。

随着化工的发展,单元操作也不断发展。随着新产品、新工艺的开发或为实现以低碳、可持续发展为目标的绿色化工生产,对物理过程提出了一些特殊要求,又不断地发展出新的单元操作或化工技术,如膜分离、参数泵分离、电磁分离、超临界技术等。同时,以节约能耗、提高效率、洁净无污染生产为特点的集成化工艺将是未来的发展趋势。

随着对单元操作研究的不断深入,人们逐渐发现若干个单元操作之间存在着共性。从本质上讲,所有的单元操作都可分解为动量传递、热量传递、质量传递这 3 种传递过程或它们的结合。前述的四大类单元操作可分别用动量、热量、质量传递的理论进行研究。3 种传递现象中存在着类似的规律和内在联系,可用相类似的数学模型进行描述,并可归结为速率问题进行综合研究。三传(传质、传热、传速)理论的建立,是单元操作在理论上的进一步发展和深化,构成了联系各种单元操作的一条主线。

1.2 化工原理三大守恒定律

1.2.1 质量守恒定律

质量守恒定律是物料衡算的依据,物料衡算反映化工生产过程中各种物料之间的量的关系,是分析生产过程与设备的操作情况,进行过程与设备设计的基础。物质既不会产生,也不会消失,参与任何化工生产过程的物料质量是守恒的。根据质量守恒定律,则在任何一个化工生产过程中,一定时间内向系统输入的物料质量,必等于从该系统输出的物料质量与积累在该系统中的物料质量之和,即:

$$\sum F = \sum D + A \quad (1-1)$$

式中, $\sum F$ 为输入物料质量总和; $\sum D$ 为输出物料质量总和; A 为积累的物质质量。

式(1-1)是物料衡算的通式,既适用于连续操作,也适用于间歇操作。由此式可对总物料或其中某一组分列出物料衡算式,然后进行求解。对于操作参数不随时间变化的连续定态过程,积累的物料质量为零,则式(1-1)可以化简为:

$$\sum F = \sum D$$

1.2.2 能量守恒定律

能量一般包括机械能、热能、磁能、化学能、电能、原子能等,各种能量之间可以相互转化。化工计算时遇到的不是能量转化问题,而是总能量衡算,有时可以简化为热能或热量衡算。化工生产过程中一般只涉及机械能和热能。

能量衡算的依据是能量守恒定律,能量衡算的步骤与质量衡算的基本相同。能量衡算可写成如下等式:

$$\sum Q_{\text{in}} = \sum Q_{\text{out}} + Q_{\Delta} \quad (1-2)$$

式中, $\sum Q_{\text{in}}$ 为随物料进入系统的总能量; $\sum Q_{\text{out}}$ 为随物料离开系统的总能量; Q_{Δ} 为系统累积的能量。

对于定态过程,系统内无能量累积,即 $Q_{\Delta}=0$,所以能量衡算关系为:

$$\sum Q_{\text{in}} = \sum Q_{\text{out}}$$

式(1-2)也可以写成:

$$\sum (\omega H)_{\text{in}} = \sum (\omega H)_{\text{out}} + Q_{\Delta} \quad (1-3)$$

式中, ω 为物料的质量; H 为物料的焓。

能量衡算等式既适用于间歇过程,也适用于连续过程。作热量衡算时也和物料衡算一样,要规定出衡算基准和范围。此外,由于焓是相对值,与从哪一个温度算起有关,所以进行热量衡算时还要指明基准温度,简称基温。习惯上选 0°C 为基温,并规定 0°C 时液态的焓为零,这一点在计算中可以不指明。有时为了方便,要以其他温度作基准,这时应加以说明。

1.2.3 动量守恒定律

动量守恒定律是动量衡算的理论依据,是研究动量随时间而变化的速率,即牛顿第二定律。

任何一个过程,如果不是处于平衡状态,那么此过程就趋于平衡。过程所处的状态间的距离通常称为过程的推动力,与推动力相应的成为过程阻力,它是各种因素对过程速率影响的总体现,较为复杂,通常与操作条件及物性有关。过程速率通常表示为:

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

不同过程的传递速率不同,其推动力、阻力和比例系数的表达方式都取决于过程的传递机理。过程速率的大小直接影响到设备的大小与经济效益等。

1.3 单元操作的研究方法

化工原理属于工程学科,它的对象是现实的、复杂的生产过程。除少数简单问题可以直接求解以外,由于设备结构各异,影响因素繁多,单纯从理论上建立数学模型进行描述、求解,往往很困难,甚至根本行不通,因此,单元操作目前主要的研究方法是实验研究法和数学模型法(又称半理论半经验法)。

1. 实验研究法

化工过程十分复杂,除极少数简单的问题可以用理论分析的办法解决以外,都需要依靠实验研究加以解决。化工研究的任务和目的是通过小型实验、中间试验揭示过程的本质和规律,然后用于指导生产实际,进行实际生产过程与设备的设计与改进。实验研究方法直接用实验寻求各变量之间的联系,避免了方程的建立。但是,如果实验工作必须遍历各种规格的设备和各种不同的物料,那么,这样的实验将不胜其烦,而且失去了指导意义,因此必须建立实验研究的方法论。为此,实验研究方法一般以量纲分析和相似论为指导,依靠试验确定过程变量之间的关系,把各种因素的影响表示成为由若干个有关因素组成的、具有一定物理意义的无量纲数群的影响,以使实验结果在几何尺寸上能由小见大,在物料品种方面能由此及彼,具有指导意义。

2. 数学模型法

数学模型法需要对实际问题的机理做深入分析,并在抓住过程本质的前提下做出某些合理的简化,得出能基本反映过程机理的物理模型。通常,数学模型法所得结果包括反映过程特性的模型参数,其值须通过实验才能确定,并以实验检验模型的可靠性。因而它是一种半理论、半经验的方法。

随着计算机及计算技术的发展,复杂数学模型的求解已成为可能,所以数学模型法将逐步成为单元操作中的主要研究方法。

1.4 课程性质和任务

本书是在学习数学、物理、化学的基础上,运用质量与能量守恒定律及平衡关系等,来研究化工生产中内在的共同规律,讨论生产过程中单元操作的基本原理与计算方法,是化工及其相关专业教学计划中具有承上启下作用的重要技术基础课,它是化工类各门专业课的基础。

按照各个单元操作所遵循的基本规律,其内容归并为流体动力、传热、传质三个过程的基本理论及其应用。

学习本课程的基本任务是掌握各个单元操作的基本规律及基本计算方法,熟悉典型设备的构造、性能及操作原理,并将这些知识应用于生产实践和研究中,寻求适宜的操作条件,探索强化生产方向及改进设备的途径,以降低生产成本,提高生产效率,从而最大限度的获得经济效益。

1.5 基本单位及换算

1. 法定基本单位

量的名称	名称	符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
热力学温度	开尔文	K
物质的量	摩尔	mol

2. 导出物理量及单位

量的名称	单位名称	单位符号	量的名称	单位名称	单位符号
力	牛顿	N	黏度	帕斯卡·秒	Pa·s
压强(压力)	帕斯卡	Pa	运动黏度	平方米每秒	m ² /s
能、功、热量	焦耳	J	表面张力	牛顿每米	N/m
密度	千克每立方米	kg/m ³	功率	瓦特	W(J/s)

3. 单位换算

(1)质量

千克(kg)	吨(t)	磅(lb)
1000	1	2204.62
0.4536	4.536×10 ⁻⁴	1

(2)长度

米(m)	市尺	英尺(ft)	英寸(in)	日尺
1	3	3.2808	39.3701	3.3000
0.3333	1	1.0936	13.1234	1.1000
0.3048	0.9144	1	12	1.0058
0.0254	0.0762	0.0833	1	0.08381
0.3030	0.9091	0.9939	11.9268	1

(3)力

牛(N)	公斤(力)(kgf)	磅(lb)	达因(dyn)	磅达(pdl)
4.448	0.4536	1	444.8	32.17
10^{-3}	1.02×10^{-6}	2.248×10^{-6}	1	0.7233×10^{-4}
0.1383	0.01410	0.03310	13825	1

(4)压强

帕(Pa)	托(Torr)	毫巴(mbar)	标准大气压(atm)	工程大气压(at)	英寸汞柱(inHg)	磅力/英寸 ² (lbf/in ²)
1	7.501×10^{-3}	1×10^{-2}	9.87×10^{-6}	1.02×10^{-5}	2.953×10^{-1}	1.450×10^{-1}
1.333×10^{-2}	1	1.333	1.316×10^{-3}	1.36×10^{-3}	3.990×10^{-2}	1.934×10^{-2}
1×10^{-2}	0.750	1	9.870×10^{-4}	1.02×10^{-3}	2.995×10^{-2}	1.450×10^{-2}
1.013×10^5	760	1013	1	1.033	30.35	14.697
9.81×10^4	735.6	9.81×10^2	0.968	1	29.38	14.22
3.338×10^3	25.04	33.38	3.295×10^{-2}	3.453×10^{-2}	1	0.484
6895	5172	68.95	6.805×10^{-2}	7.031×10^{-2}	2.086	1

(5)动力黏度

帕·秒(Pa·s)	泊(P)	厘泊(cP)
1	10	10^3
0.1	1	100
0.001	0.01	1
1	10	10^3
2.778×10^{-4}	2.778×10^{-3}	0.2778
1.4881	14.881	1.488×10^2
9.81	98.1	9.81×10^2

注:1泊(P)=1达因·秒/厘米

(6)能量

焦耳(J)	千克力·米 (kd·m)	千瓦·小时 (kW·h)	马力·小时 (hp·h)	千卡 (kcal)	英热单位 (Btu)	英尺·磅 (ft·lb)
1	0.1020	2.778×10^{-7}	3.777×10^{-7}	2.389×10^{-7}	9.48×10^{-4}	0.7377
9.8	1	2.724×10^{-6}	3.649×10^{-6}	2.341×10^{-6}	9.29×10^{-3}	7.233
3.6×10^6	3.671×10^5	1	1.36	859.9	3412	2.655×10^6
2.686×10^6	2.741×10^5	0.7461	1	641.6	2546	1.980×10^6
4.186×10^6	427.2	1.163×10^{-3}	1.558×10^{-2}	1	3.968	3087
1.055×10^3	107.6	2.93×10^{-4}	3.927×10^{-4}	0.252	1	778.1
1.3558	0.1383	3.766×10^{-7}	5.051×10^{-7}	3.239×10^{-4}	1.285×10^{-3}	1

注:1erg=10⁻⁷ J,电子伏特(eV)=1.60207×10⁻¹⁹ J

1 公制马力小时(ps·h)=0.9858 hp·h=2.648×10⁶ J

(7)功率

瓦(W)	千瓦 (kW)	公斤(力)·米/秒 (kd·m/s)	英尺·磅/秒 (fl·lb/s)	马力	专长移 (kcal/s)	英热单位/秒 (cc/s)
100	1	101.97	735.56	1.3410	0.2389	0.9486
9.8067	0.0098067	1	7.23314	0.01315	0.002342	0.009293
1.3558	0.0013558	0.13825	1	0.0018182	0.0003289	0.0012851
745.69	0.74569	76.0375	550	1	0.17803	0.70675
4186	4.1860	426.85	3087.44	5.6135	1	3.9683
1055	1.0550	107.58	778.168	1.4148	0.251996	1

(8)导热系数

瓦/ (W/(m·K))	焦/ (J/(cm·s·℃))	卡/ (cal/(cm·s·℃))	千卡/ (kcal/(m·h·℃))	英热单位/ (Btu/(ft·h·F))
102	1	0.2389	86.00	57.79
418.6	4.186	1	360	241.9
1.163	0.1163	0.002778	1	0.6720
1.73	0.01730	0.004134	1.488	1

(9)传热系数

瓦/ (W/(m ² · K))	千卡/ kcal/(m ² · h · °C)	卡/ (cal/(cm ² · s · °C))	英热单位/ (Btu/(ft ² · h · F))
1.163	1	2.778×10 ⁻⁵	0.2048
4.186×10 ⁴	3.6×10 ⁴	1	7374
5.678	4.882	1.3562×10 ⁻⁴	1

习 题

- 1. 化工单元操作按遵循的规律可划分为哪几种？
- 2. 化工原理的三大守恒定律是什么？
- 3. 研究单元操作有哪两种方法？

第2章 流体流动

2.1 概 述

2.1.1 流体

流体是指具有流动性的物体,包括液体和气体。在化工及食品、生物制品生产过程中所处理的原料、半成品和产品大多数是流体。为了把这些流体原料和半成品制成产品,常需要把流体从一个设备输送到另一个设备,并使流体在设备中保持最适宜的流动条件,或者从一个车间输送到另一个车间,使这些流体物料能参与生产过程的加热、冷却、沉降、过滤、离心分离等加工过程,保证生产顺利进行,达到高产、优质、低消耗、高效率的目的。因此,流体流动与输送是化工、食品、生物工程等生产中的一个基本操作,也是其他加工过程的基础。

1. 流体流动的研究对象

流体流动研究的是流体的宏观运动规律,并运用这些规律去解决实际工程问题。

流体流动的研究对象是流体,其基本特性是它具有流动性。气体和液体同属流体,它们有共性,也有各自的特性:如液体不容易被压缩,而气体则很容易被压缩。所以在讨论它们共性的同时,也要讨论它们各自的特性和处理方法。

2. 流体连续性假定

从物理学中知道,流体是由大量的流体分子组成,分子之间有间隙,所以从微观上看,流体不是一种连续的物质。这些流体分子处于杂乱的热运动状态中,要想跟踪每一个分子,详细地去研究分子的运动规律是没有实际价值的,工程上只需要研究流体宏观运动规律就够了。因此,流体流动引入了流体具有连续性的假定:认为流体是由彼此之间没有间隙的无数流体微团所组成,是一个内部没有间隙的连续体。事实说明,引入这样一个假定是合理的,这是因为在工程实际中,