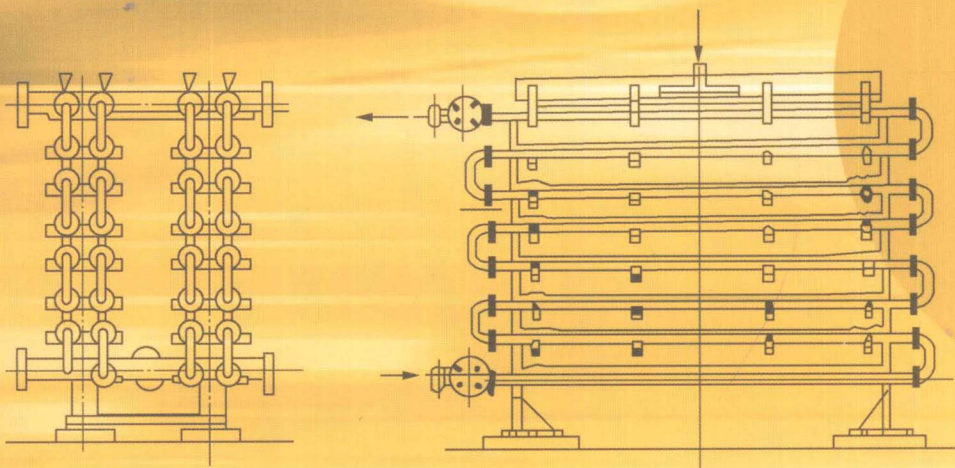




普通高等教育“十二五”规划教材

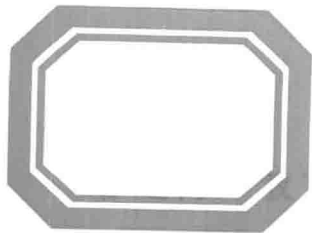


石油化学工程基础

史德青 王万里 刘相 段红玲 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)



育“十二五”规划教材

石油化学工程基础

史德青 王万里 刘相 段红玲 主编

中国石化出版社

内 容 提 要

本书主要论述石油化学工程中单元操作的基本原理及其设备的计算, 主要内容包括绪论、流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、固体流态化和气力输送、传热及换热设备、气体吸收、液体蒸馏、气液传质设备、蒸发和干燥等。本书力求联系炼油和石油化工工业的生产实际, 基本概念和基本原理论述由浅入深, 并列有必要的例题和习题。

本书可作为石油院校非化工专业化工原理教学的教材, 亦可供炼油和石油化工部门的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

石油化学工程基础 / 史德青等主编. —北京:
中国石化出版社, 2014. 8
普通高等教育“十二五”规划教材
ISBN 978 - 7 - 5114 - 2866 - 0

I. ①石… II. ①史… III. ①石油化工 - 化学工程 - 高等学校 -
教材 IV. ①TE65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 159271 号

未经本社书面授权, 本书任何部分不得被复制、抄袭, 或者
以任何形式或任何方式传播。版权所有, 侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址: 北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编: 100011 电话: (010) 84271850

读者服务部电话: (010) 84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail: press@sinopec.com

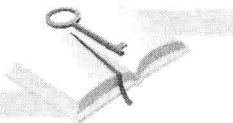
北京柏力行彩印有限公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787 × 1092 毫米 16 开本 25 印张 630 千字
2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷
定价: 50.00 元

前言



为适应石油院校本科非化工专业化工原理教学的需要,本书作者在多年教学实践的基础上,结合石油院校非化工专业的教学实际情况,编写了《石油化学工程基础》一书。

“化工原理”是化学工程学的重要组成部分,它为过程工业(包括化工、轻工、医药、食品、环境、材料、冶金等工业部门)提供理论基础与技术原理,对化工及相近学科的发展起支撑作用。石油院校的多个非化工专业,如过程装备与控制、自动化、材料化学和安全工程等,其学生学习化工原理的基础知识,不仅能开阔视野、夯实化学理论基础,还能培养工程观念,并能为将来在过程工业领域的工作提供有益的帮助。因此,多个石油院校的相关专业都为学生开设了化工原理方面的课程。但目前适用于石油院校非化工专业的化工原理教材较为稀少,为这些专业的学生提供一本适合其需求的化工原理教材是非常有必要的。

本书作者长期从事本科化工和非化工专业的化工原理教学,明了非化工专业学生的化学基础和实际需求,结合师生们提供的宝贵意见和建议,将化工原理中与石油加工和石油化工过程紧密相关的主要单元操作教学内容进行凝练和精简,最终形成本书。

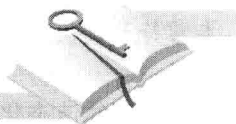
本书主要论述石油化学工程中单元操作的基本原理及其设备的计算,包括绪论、流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、固体流态化和气力输送、传热及换热设备、气体吸收、液体蒸馏、气液传质设备、蒸发和干燥等。本书力求联系炼油和石油化工工业的生产实际,可作为石油院校非化工专业少学时化工原理教学的教材,亦可供炼油和石油化工部门的工程技术人员参考。

本书绪论及第2章由张海鹏执笔,第1、3章由刘相执笔,第4、8章由李军执笔,第5章由段红玲执笔,第6、7章由王万里执笔,第9、10章和附录由史德青执笔。全书的统稿由史德青完成。

本书的编写汲取了中国石油大学(华东)李阳初教授编写的《石油化学工程原理》、《石油化学工程基础》教材的精华,并广泛参考了国内外现行的多种同类教材,教研室的同事们也在编写过程中多次提出宝贵意见,编者在此一并致谢。

由于编者学识有限,书中欠妥之处在所难免,恳请同行及使用者不吝指教,以助日后修订。

目 录



绪论	1	1.6.3 文丘里(Venturi)流量计	45
0.1 化学工程及其发展	1	1.6.4 转子流量计	45
0.2 本课程的研究对象和任务	1	本章符号说明	47
0.3 单元操作过程中常见的基本规律	3	习题	48
0.4 单位及单位换算	4	第2章 流体输送机械	52
0.4.1 单位与单位制	4	2.1 概述	52
0.4.2 单位换算	7	2.2 液体输送机械	52
习题	7	2.2.1 离心泵	52
第1章 流体流动	9	2.2.2 其他类型的泵	68
1.1 概述	9	2.3 气体输送和压缩机械	72
1.2 流体静力学	12	2.3.1 通风机	72
1.2.1 流体的压力	12	2.3.2 鼓风机	73
1.2.2 流体静力学基本方程式	13	2.3.3 压缩机	75
1.2.3 流体静力学基本方程式的	14	2.3.4 真空泵	78
应用	14	本章符号说明	80
1.3 流体动力学	17	习题	80
1.3.1 流量和流速	17	第3章 沉降与过滤	83
1.3.2 稳定流动与不稳定流动	19	3.1 沉降	83
1.3.3 物料衡算——连续性方程式	19	3.1.1 重力沉降	83
1.3.4 机械能衡算——柏努利	20	3.1.2 沉降设备	85
方程式	20	3.1.3 离心沉降	87
1.3.5 柏努利方程式的应用	23	3.1.4 离心分离设备	87
1.4 流体在管内的流动阻力	25	3.2 过滤	89
1.4.1 流体流动的类型	25	3.2.1 基本概念	89
1.4.2 流体流动阻力的计算	26	3.2.2 基本方程式	90
1.5 管路计算	37	3.2.3 恒压过滤	91
1.5.1 简单管路	37	3.2.4 恒速过滤	93
1.5.2 复杂管路	39	3.2.5 先升压后恒压过滤	93
1.6 流量测量	41	3.2.6 过滤常数的测定	93
1.6.1 测速管	41	3.3 过滤设备	94
1.6.2 孔板流量计	43	3.3.1 板框压滤机	94
		3.3.2 转筒真空过滤机	95
		3.4 过滤计算	97

3.4.1 板框压滤机的计算	97	5.3.3 对流传热系数的主要影响 因素	131
3.4.2 转筒真空过滤机的计算	100	5.3.4 对流传热系数的一般关联式	131
本章符号说明	102	5.3.5 对流传热系数的经验关联式	132
习题	102	5.4 两流体通过间壁的传热计算	139
第4章 固体流态化和气力输送	104	5.4.1 传热速率方程式	139
4.1 概述	104	5.4.2 换热器的热负荷及热量衡算 方程式	140
4.2 固体流态化技术	105	5.4.3 平均温度差的计算	141
4.2.1 流化床的基本概念	105	5.4.4 总传热系数	144
4.2.2 流化床的流化类型与不正常 操作现象	106	5.4.5 壁温的估算	150
4.2.3 流化床的主要特性	108	5.5 换热设备	151
4.2.4 流化床的操作范围	110	5.5.1 间壁式换热器种类	151
4.2.5 流化质量以及改善流化质量 的措施	111	5.5.2 管壳式换热器的设计和选用	158
4.3 气力输送	112	5.5.3 换热器传热过程的强化	166
4.3.1 概述	112	5.6 热辐射基础理论	167
4.3.2 密相输送	113	5.6.1 热辐射的基本概念	167
4.3.3 稀相输送	114	5.6.2 黑体辐射的基本理论	170
4.4 流态化的工业应用	116	5.6.3 两黑体表面间的辐射传热	171
4.4.1 气力输送	116	5.6.4 灰表面间的辐射传热	173
4.4.2 干燥	117	5.6.5 气体的辐射与吸收	175
4.4.3 反应	117	5.6.6 设备热损失的计算	176
4.4.4 锅炉	117	本章符号说明	176
本章符号说明	118	习题	178
习题	118	第6章 气体吸收	181
第5章 传热及换热设备	120	6.1 概述	181
5.1 概述	120	6.1.1 石油化工生产中的传质过程	181
5.1.1 传热过程在石油加工和 石油化工中的应用	120	6.1.2 相组成的表示方法	181
5.1.2 传热的基本方式	120	6.1.3 吸收过程	184
5.1.3 工程上常用的换热方法	121	6.1.4 吸收过程的分类	184
5.2 热传导	122	6.1.5 吸收剂的选择	185
5.2.1 热传导的基本定律—— 傅立叶定律	122	6.1.6 吸收过程在石油化工生产中 的应用	185
5.2.2 导热系数	123	6.2 吸收过程的相平衡关系	185
5.2.3 稳定导热的计算	125	6.2.1 气体在液体中的溶解度	185
5.3 对流传热	129		
5.3.1 对流传热过程分析	129		
5.3.2 对流传热速率方程式—— 牛顿冷却定律	130		

6.2.2 亨利定律	186	7.5.1 理论塔板	229
6.2.3 吸收过程的方向及极限	189	7.5.2 全塔物料衡算	229
6.3 吸收过程的机理及传质速率	189	7.5.3 理论板数的确定	230
6.3.1 分子扩散与对流传质	189	7.5.4 回流比对精馏操作总费用的影响及适宜回流比的选择	240
6.3.2 吸收过程的机理——双膜理论	191	7.5.5 理论塔板数的简捷算法	245
6.3.3 传质速率方程式	192	7.5.6 实际塔板数和塔板效率	246
6.3.4 吸收系数的实验测定	196	7.5.7 精馏塔的热量平衡	248
6.4 吸收塔的计算	197	7.6 二元连续精馏塔的操作情况分析	250
6.4.1 物料衡算和操作线方程	197	7.6.1 回流比对操作的影响	250
6.4.2 吸收剂用量的决定和最小液气比	199	7.6.2 进料组成改变的影响	251
6.4.3 低浓度气体吸收塔填料层高度的计算	201	7.6.3 精馏塔操作温度及压力的确定	251
6.4.4 板式吸收塔理论板数的计算	206	7.6.4 热回流与冷回流	252
本章符号说明	209	本章符号说明	253
习题	210	习题	255
第7章 液体蒸馏	212	第8章 气、液传质设备	258
7.1 概述	212	8.1 概述	258
7.2 二元物系的气液相平衡	212	8.1.1 塔设备类型	258
7.2.1 理想溶液及拉乌尔定律	213	8.1.2 塔的结构	258
7.2.2 二元理想溶液的气液相平衡关系	213	8.1.3 塔设备基本性能指标	259
7.2.3 高压下的气液相平衡关系	217	8.2 板式塔	259
7.3 蒸馏方式	220	8.2.1 塔板结构	259
7.3.1 简单蒸馏	221	8.2.2 塔板类型	261
7.3.2 平衡蒸馏	222	8.2.3 板式塔的流体力学特性	266
7.3.3 平衡级	224	8.2.4 塔板负荷性能图	275
7.4 精馏原理	224	8.2.5 板式塔的设计计算	277
7.4.1 一次部分汽化与多次部分冷凝(平衡蒸馏)	225	8.2.6 塔板流体力学验算	281
7.4.2 多次部分汽化与多次部分冷凝	225	8.3 填料塔	284
7.4.3 多级平衡级蒸馏	226	8.3.1 填料塔结构及填料	284
7.4.4 精馏原理(以板式塔为例)	227	8.3.2 填料塔的流体力学状况	287
7.5 二元连续精馏塔的计算和分析	228	8.3.3 填料塔的设计计算	291
		8.3.4 填料塔附件	293
		8.3.5 填料塔与板式塔的比较	295
		本章符号说明	295
		习题	297
		第9章 蒸发	299

9.1 概述	299	10.2 湿空气的性质和湿度图	324
9.1.1 蒸发操作的基本过程	299	10.2.1 湿空气的性质	324
9.1.2 蒸发过程的分类	300	10.2.2 湿空气的湿度图及其应用	329
9.2 蒸发器的类型及选择	300	10.3 干燥过程的物料衡算和热量衡算	331
9.2.1 循环型蒸发器	301	10.3.1 湿物料含水量的表示方法	331
9.2.2 单程型蒸发器	302	10.3.2 物料衡算	332
9.2.3 直接加热式蒸发器	304	10.3.3 热量衡算	333
9.2.4 蒸发器的辅助设备	305	10.3.4 干燥系统的热效率	336
9.2.5 蒸发器的选用原则	305	10.3.5 干燥过程的节能	337
9.3 单效蒸发及计算	306	10.4 干燥速率和干燥时间	337
9.3.1 物料衡算和热量衡算	306	10.4.1 水分在空气和物料间的	337
9.3.2 蒸发器的传热面积	308	平衡关系	337
9.3.3 蒸发器的生产能力和	312	10.4.2 干燥速率及其影响因素	339
生产强度	312	10.4.3 恒定干燥条件下物料的	342
干燥时间	312	干燥时间	342
9.4 多效蒸发	313	10.5 干燥器	344
9.4.1 多效蒸发的流程	314	10.5.1 概述	344
9.4.2 多效蒸发的计算	315	10.5.2 常用干燥器简介	344
9.4.3 多效蒸发的其他问题	318	本章符号说明	349
9.5 蒸发操作的其他节能措施	319	习题	350
本章符号说明	320	附录	353
习题	320		
第10章 干燥	322		
10.1 概述	322		
10.1.1 固体物料的去湿方法	322		
10.1.2 干燥过程的分类	322		
10.1.3 对流干燥过程的传热	323		
与传质	323		

绪 论

0.1 化学工程及其发展

化学工程(Chemical Engineering)研究以化学工业为代表的过程工业中有关的化学过程和物理过程的一般原理和共性规律,解决过程及装置的开发、设计、操作及优化的理论和方法问题,其研究内容与方向包括化工热力学、传递过程原理、分离工程、化学反应工程、过程系统工程及其他学科分支。

化学工程作为工程技术学科,经历了形成、发展以及拓展三个阶段。从19世纪末至20世纪30年代左右,提出并发展了“单元操作”,是化学工程的形成阶段,为化学工程这门工程学科初步奠定了理论基础。英国化学家戴维斯(G. E. Davis, 1850~1907)首先提出“化学工程”的概念,指出各种不同的化工过程的基本规律是相同的,其科学基础是化学、物理和数学。1915年利特尔(A. D. Little, 1863~1935)提出了“单元操作”的概念,并论述了它的基本内容,从而形成了化学工程的分类基础,使单元操作成为解决各种化工过程问题的方法。

20世纪40年代至20世纪60年代左右,化学工程学科的各个二级学科先后问世,并促进了一系列有重大影响的化学工艺的产生,是化学工程的发展阶段。1939年美国麻省理工学院韦伯(H. C. Weber)的《化学工程师用热力学》问世,1944年美国耶鲁大学道奇(B. F. Daoger)的《化工热力学》出版,使得化工热力学成为化学工程领域的一个分支学科。在对单元操作的研究中,人们渐渐发现所有这些操作都可以归于流体流动、传热与传质三种现象,各种单元操作的特性均服从于这三种传递的基本规律。这样,化学工程由单元操作研究阶段进入了“三传”的研究阶段,形成了化学工程领域的另一个分支学科传递过程。1960年美国勃德(R. B. Bird)的《传递现象》的出版标志着传递过程研究内容的完善。随着化工工艺的发展,特别是石油化工的发展和生产的大型化,对反应过程的开发与反应器的放大设计提出了更高要求,化学反应工程这一分支学科应运而生,并于1957年第一届欧洲化学反应工程学术会议上正式确定命名。从此,化学工程的“三传一反”的理论开始建立和完善。20世纪50年代末,随着电子计算机进入化工领域,系统模拟开始出现。20世纪60年代,石油化工装置的高度集中的自动化控制系统和化工模拟系统的推广与应用,推进了化工系统工程及化工控制工程等二级学科的形成。

20世纪70~80年代以后,化学工程与生物、材料、资源、环境、微电子紧密结合,形成了新的交叉学科和发展领域,是化学工程的拓展阶段。

0.2 本课程的研究对象和任务

在石油加工、石油化工等工业中有所谓工艺过程和单元操作,后者就是本课程的研究对象。

工艺过程是指将一定的原料经过各个物理加工和化学加工而获得符合一定规格要求的各种产品的过程。例如，石油加工中的原油常压蒸馏，就是将原油经换热、加热、蒸馏等加工处理，以得到汽油、煤油、柴油、重油等产品的生产过程，其原理流程如图 0-1 所示。

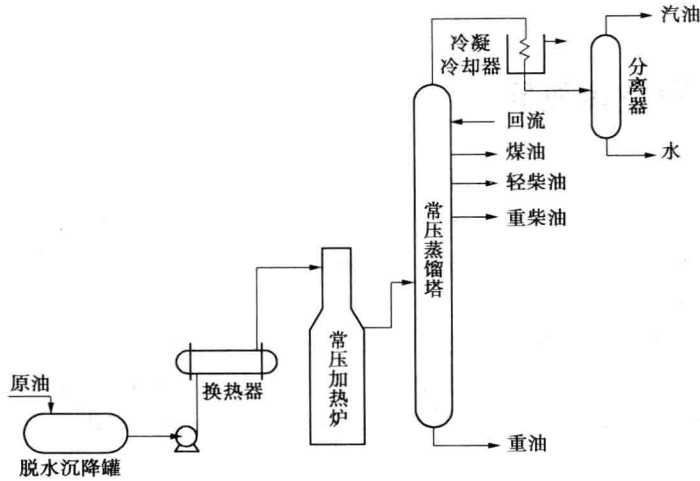


图 0-1 原油常压蒸馏原理流程

又例如石油化工中的裂解分离装置，就是将原料油（柴油或汽油等）经过加热、高温裂解、压缩以及低温分离，以得到乙烯、丙烯等烯烃产品的生产过程，其原理流程如图 0-2 所示。

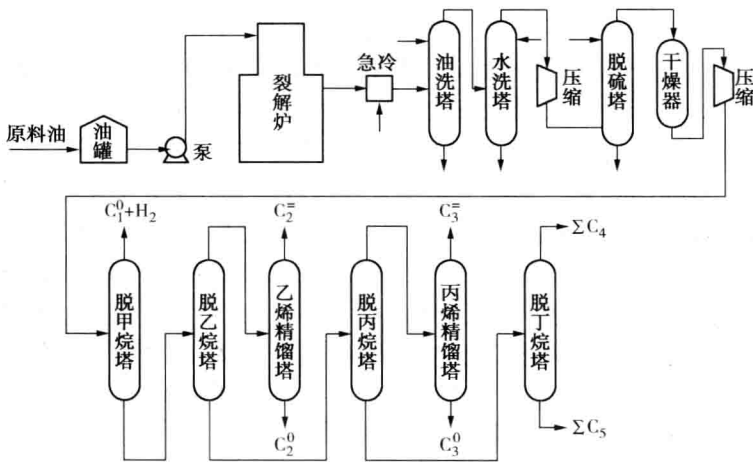


图 0-2 裂解分离装置的原理流程图

由于石油加工、石油化工以及化学、制药、轻工、冶金、原子能等工业生产中，原料各异，要求得到的产品种类繁多，又有各种各样的加工方法和各种型号的装置设备，因此实际生产中有很多的工艺过程。

虽然工艺过程为数众多，而且随着科学技术和经济的发展、新产品的不断开发，还会有新的工艺过程出现。但经过分析可以发现，千差万别的工艺过程都是由原理上相同或相似的一些基本单元组成。就以上所举出的两个典型的工艺过程来说，大体上是由物料沉降、压缩

和输送、加热和换热、裂解(化学反应)、蒸馏等基本单元所组成,其中除了裂解(有些工艺过程还有合成、聚合等)为化学反应过程外,其余的均是只改变物料状态或物理性质,并不改变物料化学性质的物理过程,将这些物理过程称为单元操作。在石油加工和石油化工中,其核心是化学反应过程及其设备——反应器。同时,为了保障化学反应过程有效地进行和得到各种规格的产品,就必须以各种物理过程对原料进行预处理以达到必要的温度、压力等条件和对反应产物进行处理以达到分离、精制等目的。因此,单元操作是石油加工和石油化工生产中不可缺少的重要组成部分。

在石油加工和石油化工生产中,重要的单元操作约有 20 多种,按其理论基础可归纳为以下三类:

(1) 流体流动过程,包括流体输送、气体压缩、沉降、过滤、离心分离、搅拌、固体流态化、气力输送等。

(2) 传热过程,包括加热、冷凝和冷却、蒸发等。

(3) 传质过程,包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、干燥、结晶等。进行这些过程的目的是分离均相混合物,故称传质过程,又称分离过程。

《石油化学工程基础》这门课程既不同于自然科学中的基础学科,也区别于具体的石油加工和石油化工中产品生产工艺学,它研究的是各个单元操作的基本原理、计算方法及其设备的设计、操作和选型等。通过本课程的学习使学生掌握各个单元操作的基本理论和计算方法,培养学生运用这些基本理论和计算方法正确地分析、解决各个单元操作中各种工程技术问题的能力。因此,《石油化学工程基础》与《化工原理》、《化学工程基础》、《单元操作》等属同一内容的课程,是石油加工、石油化工、炼油化工仪表自动化等专业的一门重要的技术基础课,也是石油应用化学、化工实验技术、环境工程等专业的一门工程基础课。因此,本课程具有十分广泛的实用性。

0.3 单元操作过程中常见的基本规律

单元操作虽有若干种,所解决的实际问题也非常之多,但是研究单元操作时,都遵循下列四个基本规律,也是研究单元操作的四个基本工具,即:

1. 物料衡算

物料衡算是以质量守恒定律为基础,即向单元过程输入的物料质量必等于从该过程输出的物料质量与该过程中积累的物料质量之和,即:

$$\text{输入物料质量} = \text{输出物料质量} + \text{积累的物料质量} \quad (0-1)$$

对于连续、稳定的操作过程,各物料量不随时间变化,则过程中不应有物料的积累,即式(0-1)可写为:

$$\text{输入物料质量} = \text{输出物料质量} \quad (0-2)$$

式(0-1)和式(0-2)均称物料衡算方程式,它既适用于总物料衡算计算,也适用于某一组分的物料衡算计算。物料衡算是单元操作过程及化工工艺过程的重要计算内容之一,它对于设备尺寸的设计和生产过程的操作、控制等具有重要意义。在进行物料衡算计算时,要确定计算的范围,明确计算的对象(即总物料或某一组分),选定计算基准,一般常用单位时间或单位进料质量作为衡算的基准。

2. 能量衡算

能量衡算是以能量守恒定律为基础的,对于连续、稳定操作过程,输入系统的总能量必等于输出系统的总能量和系统与环境交换的能量之和。

能量有各种形式,本教材中所涉及到的能量主要有机械能和热能。进行机械能衡算或热量衡算的方法与物料衡算基本相同,同样也要确定衡算范围和基准,通常用单位质量或单位体积的物料(此处指的是总物料),或者用单位时间作为能量衡算的基准。

通过能量衡算可以了解生产操作中能量利用和损失情况,以便确定设备的处理能力,保证单元操作按所规定的条件(温度、流动要求)进行。

3. 系统的平衡关系

平衡状态是自然界普遍存在的现象,当系统在某一条件下自然发生变化时,其变化必趋于一定的方向,如任其发展,结果必达到平衡状态为止。例如热量从温度较高的物体传向温度较低的物体时,将一直进行到两个物体的温度相等时为止,又如,在一定温度下,当溶液中食盐浓度小于其饱和浓度时,加入的食盐就溶解,直至达到平衡状态;反之,溶液中的食盐会析出,最终达到平衡状态。因此,平衡状态是各种自然发生的变化过程可能达到的极限程度。在物系相际间进行的传质平衡关系为相平衡关系,显然,用相平衡关系可判断传质过程进行的方向和可能达到的限度。

4. 过程速率

由上可知,任何一个系统,如果不是处于平衡状态,就必然向平衡状态变化。但以多大的速率趋于平衡,这不取决于平衡关系,而取决于系统的不平衡程度(如上述溶液中的食盐浓度与其饱和浓度相差程度)和影响过程变化的许多其他因素。通常以系统的不平衡程度为推动力,把其他许多影响因素归于过程阻力,则过程速率可近似地用下式表示,即:

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}} \quad (0-3)$$

不同的过程有各自的推动力和阻力的内涵,如传热过程的推动力是互相换热的两流体间的温度差,传质过程则是物系浓度与平衡浓度之差,而诸过程的阻力内涵则较为复杂,需要结合具体过程,进行具体分析。

由式(0-3)可见,过程速率与过程推动力成正比,与过程阻力成反比,这种关系类似于电学中的欧姆定律。过程速率是决定过程设备尺寸的重要因素,如果过程速率大时,设备尺寸就可以小些。因此,过程平衡关系是过程设备尺寸设计计算的理论依据,过程速率则是过程设备尺寸设计计算的基本工具。

在研究单元过程中,除了应用以上四个基本规律研究过程的变化和进行设备的设计计算外,还要利用技术经济比较,以优化过程方案,使单元操作得以经济有效地进行。

0.4 单位及单位换算

0.4.1 单位与单位制

任何物理量的大小都是用数值和单位来表示的。由于各种物理量之间存在着客观的联系,因此不必对每个物理量都单独进行任意选择,通常是任意选定几个独立的物理量,作为

基本量，并根据使用方便的原则制定出基本量的单位作为基本单位，而其他物理量的单位通过基本单位根据其定义或物理方程导出，所以这些物理量称为导出量，其单位称为导出单位。所有导出单位都是由基本单位相互乘、除关系而构成的。如果选定长度和时间作为基本量，其单位定为米和秒，那么速度的单位就是导出量，其单位可通过它的定义导出，即为(m/s)。

基本单位与导出单位的总和称为单位制。由于基本量及其单位的不同选择，就产生了不同的单位制。过去我国经常采用的单位制有物理单位制(CGS制)和工程单位制，它们的基本量和单位如表0-1所示。

表0-1 CGS制与工程制的基本单位

项目	CGS制				工程制			
量的名称	长度	质量	时间	温度	长度	力	时间	温度
单位符号	cm	g	s	℃	m	kgf	s	℃

工程单位制中把力作为基本量，其单位为kgf(千克力或公斤力)，1kgf的意义为1kg(千克)质量的物体在重力加速度为 9.807m/s^2 的海平面所受到的重力。

由于科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益广泛，以及理科与工科的关系进一步密切，要求有统一的度量单位。1960年10月第11届国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制，其代号为SI(法文Système International d'unités缩写)。国际单位制(SI制)中所规定的7个基本量及其单位和2个辅助量及其单位构成了不同科学技术领域中所需要的全部单位，如表0-2所示；用于构成十进倍数和分数单位的词冠及化工中常用的具有专门名称的导出单位分别列于表0-3及表0-4。

我国于1984年2月27日发布了以国际单位制为基础，包括国家选定的国内外习惯或通用的少数非国际单位制单位在内的《中华人民共和国法定计量单位》，简称法定单位。其内容除了表0-2、表0-3、表0-4外，还有《国家选定的非国际单位制单位》。表0-5是其节录。

表0-2 国际单位制的基本单位和辅助单位

类别	物理量	单位名称	单位符号
基本单位	长度	米	m
	质量	千克(公斤)	kg
	时间	秒	s
	电流	安[培]	A
	热力学温度	开[尔文]	K
	物质的量	摩[尔]	mol
	发光强度	坎[德拉]	cd
辅助单位	平面角	弧度	rad
	立体角	球面度	sr

注：1. ()内的字为前者同义语。

2. []内的字，是在不致混淆的情况下可以省略的字。

表 0-3 国际单位制用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	符号	所表示的因数	词头名称	符号
10^{18}	艾[克萨]	E	10^{-1}	分	d
10^{15}	拍[它]	P	10^{-2}	厘	c
10^{12}	太[拉]	T	10^{-3}	毫	m
10^9	吉[咖]	G	10^{-6}	微	μ
10^6	兆	M	10^{-9}	纳[诺]	n
10^3	千	k	10^{-12}	皮[可]	p
10^2	百	h	10^{-15}	飞[母托]	f
10^1	十	da	10^{-18}	阿[托]	a

注：[]内的字，可在不致混淆的情况下省略。

表 0-4 化工常用国际单位制中具有专门名称的导出单位

物理量	单位名称	单位符号	用其他导出单位表示	用基本量表示
频率	赫[兹]	Hz		s^{-1}
力；重力	牛[顿]	N		$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
压力，压强；应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2	$kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-2}$
能量；功；热	焦[耳]	J	$N \cdot m$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$
功率	瓦[特]	W	J/s	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$		

注：[]内的字，可在不致混淆的情况下省略。

表 0-5 国家选定的部分非国际单位制单位

物理量	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	$1 \text{ min} = 60 \text{ s}$
	[小]时	h	$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 3600 \text{ s}$
	天(日)	d	$1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$
平面角	[角]秒	($''$)	$1'' = (\pi/648000) \text{ rad}$ (π 为圆周率)
	[角]分	($'$)	$1' = 60'' = (\pi/10800) \text{ rad}$
	度	($^{\circ}$)	$1^{\circ} = 60' = (\pi/180) \text{ rad}$
旋转速度	转每分	r/min	$1 \text{ r/min} = (1/60) \text{ s}^{-1}$
质量	吨	t	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
体积	升	L(l)	$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$

注：1. []内的字，在不致混淆的情况下可以省略。

2. ()内的字为前者的同义语。

3. 角度单位度、分、秒的符号不处于数字后时，要用括弧。

4. r为“转”的符号。

5. 升的符号中，小写字母l为备用符号。

0.4.2 单位换算

由于目前常用的物理、化学数据手册以及工程计算用表和图仍有许多是用物理单位制或工程单位制单位表示，所以查得的数据，其单位就可能是非法定单位。本教材采用法定单位，在例题和习题中，除特殊说明外，均采用 SI 单位制单位进行计算，因此必须掌握同一物理量的不同单位制单位之间的换算关系。由于同一物理量若用不同单位制单位度量时，量本身并无变化，只是其数值需相应地改变，因此进行单位换算时，需要乘以两单位间的换算因数。换算因数就是某一物理量用不同单位表示时，它们的数值关系系数。如把质量的单位由 kg(千克)换算成 g(克)，因 1kg 等于 1000g，则其换算因数为 1000。同理，把长度的单位由 m 换算成 cm 时的换算因数为 100。

石油加工和石油化工中常用的单位换算因数可以从本教材附录中查得。

【例 0-1】 将某温度下水的密度 $\rho = 1\text{g}/\text{cm}^3$ ，换算成以 SI 单位表示的值。

解：由于 $1\text{g} = 10^{-3}\text{kg}$ ， $1\text{cm}^3 = 10^{-6}\text{m}^3$

$$\text{则 } \rho = 1\text{g}/\text{cm}^3 = 1 \times \frac{\text{g} \times \frac{10^{-3}\text{kg}}{1\text{g}}}{\text{cm}^3 \times \frac{10^{-6}\text{m}^3}{1\text{cm}^3}} = 1 \times 10^{-3} \times 10^6 = 10^3\text{kg}/\text{m}^3$$

可见，把密度的单位由 g/cm^3 换算为 kg/m^3 的换算因数为 1000。

【例 0-2】 将压力 $p = 1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ 的单位分别换算成工程单位和 SI 单位制。

解：由于 $1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 9.807\text{N}$ ， $1\text{cm}^2 = 10^{-4}\text{m}^2$

$$\text{则 } p = 1.033\text{kgf}/\text{cm}^2 = 1.033 \times \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2 \times \frac{10^{-4}\text{m}^2}{1\text{cm}^2}} = 1.033 \times 10^4\text{kgf}/\text{m}^2$$

$$\text{又 } p = 1.033\text{kgf}/\text{cm}^2 = 1.033 \times \frac{\text{kgf} \times \frac{9.807\text{N}}{1\text{kgf}}}{\text{cm}^2 \times \frac{10^{-4}\text{m}^2}{1\text{cm}^2}} = 1.013 \times 10^4\text{N}/\text{m}^2$$

【例 0-3】 将 30°C 水的比热容 $c_p = 0.997\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 换算成以 SI 单位表示的值。

解：由附录查得 $1\text{cal} = 4.187\text{J}$ ， $1\text{g} = 10^{-3}\text{kg}$ ，又 $\Delta^\circ\text{C} = \Delta\text{K}$

$$\begin{aligned} \text{则 } c_p = 0.997\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C}) &= 0.997 \times \frac{\text{cal} \times \frac{4.187\text{J}}{1\text{cal}}}{\text{g} \times \frac{10^{-3}\text{kg}}{1\text{g}} \times ^\circ\text{C} \times \frac{\Delta\text{K}}{\Delta^\circ\text{C}}} \\ &= 4.184 \times 10^3\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

同样可见，比热容的 $\text{cal}/(\text{g} \cdot ^\circ\text{C})$ 与 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 单位间的换算因数为 4.187×10^3 。

以上是从每一个单独的单位进行了换算，从而得到了不同复合单位之间的换算因数，这对初学者来说是一个必要的训练。在今后的计算中，可直接运用复合单位间的换算因数进行计算。

习题

0-1 某设备内的压力为 $1.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，试用 SI 单位表示此压力。

0-2 将 $100\text{kcal}/\text{h}$ 的传热速率换算成以 kW(千瓦)表示的传热速率。

- 0-3 流体的体积流量为 4L/s ，试分别用 L/min 、 m^3/s 及 m^3/h 表示。
- 0-4 空气在 100°C 时的比热容为 $0.241\text{ kcal}/(\text{kgf}\cdot^\circ\text{C})$ ，试以 SI 单位表示。
- 0-5 $5\text{kgf}\cdot\text{m/s}$ 等于多少 $\text{N}\cdot\text{m/s}$ 、 J/s 和 kW ?
- 0-6 通用气体常数 $R = 82.06\text{atm}\cdot\text{cm}^3/(\text{mol}\cdot\text{K})$ ，请将其单位换算成为工程制单位 $\text{kgf}\cdot\text{m}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 和 SI 单位 $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ 。

第1章 流体流动

1.1 概述

气体和液体具有流动性，统称为流体。在炼油、石油化工等生产过程中，不论是所处理的原料、还是中间品或产品，大多都是流体；而且生产过程都是在流体流动下进行的，在炼油和石油化工厂中有纵横交错的管道和众多的机泵在各生产设备之间输送流体。这就说明流体流动不但普遍存在，而且流体流动的状况与生产过程的能量消耗、设备投资等密切相关，同时对传热、传质等其他单元操作的研究也离不开流体流动的基本规律。因此，流体流动是炼油、石油化工等生产过程中一个很重要的单元操作。流体流动状况和流体的物性密切相关，常用的流体物性如下：

1. 密度

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度，通常以符号 ρ 表示。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 m ——流体的质量，kg；

V ——流体的体积， m^3 。

不同的流体其密度是不同的。对于任一种流体，其密度又随压力和温度的变化而变化，即：

$$\rho = f(p, T) \quad (1-2)$$

液体为不可压缩性流体，液体的密度随压力的变化很小，可忽略不计（除极高压力外）。温度对液体的密度会有一定的影响，故在手册或有关资料中，对液体的密度都注明了相应的温度条件。

气体是可压缩性流体，其密度随温度和压力的变化较大，通常在温度不太低、压力不太高的情况下，气体的密度可近似地用理想气体状态方程进行计算，即

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

式中 p ——气体的绝对压力，Pa；

M ——气体的摩尔质量，kg/kmol；

R ——气体常数，8.314 J/(mol·K)；

T ——气体的温度，K。

气体密度也可按下式进行计算：

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-4)$$

上式中的 ρ_0 为标准状态（即 $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$ 及 $T_0 = 273.15 \text{ K}$ ）下气体的密度，其值为 $\rho_0 = M/22.4 \text{ kg/m}^3$ 。