

高级 技工学校教材

化工单元过程及操作

张新战 主编



化学工业出版社

教材出版中心

高级技工学校教材

化工单元过程及操作

张新战 主编



化学工业出版社
教材出版中心

·北京·

图书在版编目 (CIP) 数据

化工单元过程及操作/张新战主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 12
高级技工学校教材
ISBN 7-5025-8072-7

I. 化… II. 张… III. 化工单元操作-技工学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 154908 号

高级技工学校教材 化工单元过程及操作

张新战 主编

责任编辑: 于 卉 何 丽

文字编辑: 丁建华

责任校对: 蒋 宇

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社
出版发行
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
化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 21¼ 字数 548 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8072-7

定 价: 33.00 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

前 言

《化工单元过程及操作》是根据劳动和社会保障部颁布的高级技工教学计划，由全国化工高级技工教育教学指导委员会组织编写的全国化工高级技工教材，也可作为全国化工企业工人培训教材使用。主要介绍化工各单元操作的基本原理、典型设备以及有关的化工工程实用知识。编写原则是：用基础理论知识指导实际操作，理论以必需、够用为度，加强运用工程观点分析和解决化工实际问题的技能训练。

本书内容按“掌握”、“理解”和“了解”三个层次编写，在每章开头的“学习目的与要求”中均有明确的说明以分清主次，并通过例题和思考题与习题的反复练习达到掌握和理解的要求。每章末的思考题与习题主要是为掌握基础理论和指导实际操作随学习进度所应完成的训练内容，有助于培养分析和解决实际问题的能力。

本书的计量单位统一使用我国法定计量单位，符号和计量单位执行国家标准（GB 3100-3102—93），单位一律采用国际单位制。本书为满足不同类型专业的需要，增添了教学大纲中未作要求的一些单元操作和新型单元操作。教学中各校可根据需要选用教学内容，以体现灵活性。

本书由张新战主编、毛民海主审。全书共分十二章。绪论、第二章、第五章、第九章和附录由张新战编写；第一章和第三章由穆晨霞编写；第四章和第八章由练学宁编写；第六章、第七章和第十二章由周洁编写；第十章和第十一章由朱瑛编写。

本书在编写过程中得到中国化工教育协会、化学工业出版社、全国化工高级技工教育教学指导委员会及相关学院领导和同行们的支持，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

2005年10月

内 容 提 要

全书以理论联系实际为基础，理论以必需够用为原则，面向生产实际操作，同时还考虑到了单元操作新技术的发展。全书共十二章。内容包括流体力学、流体输送机械、非均相物系的分离、传热原理及换热器、蒸发、蒸馏、吸收、干燥、冷冻、结晶、液-液萃取和新型单元操作（包括吸附、膜分离及超临界流体萃取）简介，可供学习者选学选用。

本书为高级技工学校化工工艺及相关专业的教材，也可作为化工操作工的培训教材。

目 录

绪论	1	一、离心泵	48
一、化工过程与单元操作	1	二、往复泵	61
二、化工单元操作的内容、性质及任务	3	三、其他类型泵	63
三、化工常用量和单位	4	四、各类泵的比较	66
四、学习本课程的主要方法	5	第三节 气体压缩和输送机械	67
思考题与习题	6	一、往复压缩机	68
第一章 流体力学	7	二、离心压缩机	76
第一节 概述	7	三、离心鼓风机和通风机	80
第二节 流体静力学	7	四、旋转鼓风机和压缩机	84
一、流体的主要物理量	7	五、真空泵	85
二、流体静力学基本方程式及其应用	10	思考题与习题	86
第三节 流体动力学	17	第三章 非均相物系的分离	88
一、流量和流速	17	第一节 概述	88
二、稳定流动和不稳定流动	19	第二节 重力沉降	89
三、稳定流动的连续性——连续性方程	19	一、重力沉降速度及其影响因素	89
四、伯努利方程	20	二、重力沉降设备的结构和计算	91
第四节 流体阻力	26	第三节 过滤	94
一、流体的黏度	26	一、过滤的基本概念	94
二、流体流动的类型	27	二、过滤操作中液体通过颗粒层的流动	96
三、层流和湍流的比较	29	三、过滤的基本方程式	96
四、流动阻力	29	四、过滤机的结构和操作	97
第五节 简单管路的计算和管路布置	35	第四节 离心机	100
一、简单管路的计算	35	一、离心力作用下的沉降速度	100
二、管路布置和安装的一般原则	36	二、离心机的构造和操作	101
第六节 流量测量	40	三、旋液分离器	104
一、孔板流量计	40	四、离心机的选择和操作管理	104
二、文氏管流量计	42	第五节 气体净制设备	105
三、转子流量计	43	一、旋风分离器	105
思考题与习题	44	二、其他气体净制设备	107
第二章 流体输送机械	47	第六节 固体流态化	109
第一节 概述	47	一、固体流态化的基本概念	109
一、液体输送机械的作用及分类	47	二、流化床的流体力学	110
二、气体压缩与输送机械的作用及分类	47	三、流化床操作的优缺点	112
第二节 液体输送机械	48	思考题与习题	113

第四章 传热原理及换热器	115	第五章 蒸发	151
第一节 概述	115	第一节 概述	151
一、传热的基本方式	115	一、蒸发的目的	151
二、工业换热方法	116	二、蒸发的基本概念	151
第二节 热传导	116	第二节 单效蒸发	153
一、热传导基本规律	116	一、单效蒸发计算	153
二、平壁的热传导	118	二、温度差损失	156
三、圆筒壁的热传导	119	第三节 多效蒸发简介	158
第三节 对流传热	123	一、多效蒸发流程	158
一、对流传热方程式	123	二、多效蒸发的效数限度	159
二、对流传热膜系数	123	第四节 蒸发器的生产能力和生产强度	159
第四节 辐射传热	126	一、蒸发器的生产能力	159
一、热辐射的基本概念	126	二、蒸发器的生产强度	159
二、热辐射的基本定律	127	第五节 蒸发器	160
三、两固体间的辐射传热	128	一、蒸发器的结构	160
第五节 传热计算	128	二、除沫器和冷凝器	165
一、传热基本方程式	128	思考题与习题	166
二、传热速率的计算	128	第六章 蒸馏	167
三、平均传热温度差的计算	130	第一节 概述	167
四、流体流动方向的选择	132	一、蒸馏的基本概念	167
五、传热系数的测定和估算	133	二、蒸馏在化工生产中的应用	167
六、传热面积的计算	136	三、蒸馏的分类	167
第六节 传热过程的强化与削弱	137	第二节 汽-液平衡关系	168
一、传热过程的强化	137	一、相组成表示方法	168
二、传热过程的削弱	139	二、理想溶液和非理想溶液汽-液平衡关系	168
第七节 工业加热与冷却、冷凝	139	三、相对挥发度及汽-液平衡方程	172
一、加热剂与冷却剂	140	第三节 简单蒸馏与精馏原理	173
二、加热方法	140	一、简单蒸馏的原理及流程	173
三、冷却方法	141	二、精馏的理论基础	174
四、冷凝方法	141	三、精馏流程	176
第八节 换热器	141	第四节 精馏塔的物料衡算——操作线方程	177
一、列管式换热器	142	一、全塔物料衡算	177
二、蛇管式换热器	143	二、精馏段操作线方程	179
三、夹套式换热器	144	三、提馏段操作线方程	180
四、套管式换热器	144	四、进料状况对操作线的影响	180
五、螺旋板式换热器	145	五、操作线在 $y-x$ 图上的作法	184
六、平板式换热器	145	第五节 精馏过程的计算	185
七、板式换热器	146	第六节 回流比	188
八、翅片管式换热器	146	一、回流比对精馏塔塔板数的影响	188
九、热管式换热器	146	二、全回流和最少理论塔板数	188
十、各种换热器的比较	147	三、最小回流比	189
十一、换热器的日常维护	147		
思考题与习题	148		

四、操作回流比的确定	189	一、湿空气的性质	224
第七节 连续精馏的热量衡算	190	二、湿空气的湿-焓图及其应用	228
第八节 特殊蒸馏简介	191	第三节 干燥过程的物热衡算	231
一、水蒸气蒸馏	191	一、对流干燥操作流程	231
二、恒沸精馏	191	二、物料含水量的表示方法与物料衡算	231
第九节 精馏设备——板式塔	192	三、热量衡算与干燥热效率	233
一、板式塔的基本结构和类型	192	四、干燥器出口空气状态的确定	234
二、塔板上的流体力学现象	194	第四节 干燥速率和干燥时间	235
三、辅助设备	195	一、物料中所含水分的性质	235
四、塔板负荷性能图和负荷上、下限	195	二、干燥速率及其影响因素	236
思考题与习题	197	第五节 对流干燥设备	238
第七章 吸收	199	一、常见对流干燥设备	238
第一节 概述	199	二、干燥器的比较和选择	240
一、吸收单元操作的基本概念	199	三、干燥过程的调节控制	241
二、吸收在工业上的应用	199	思考题与习题	242
三、解吸的基本概念	200	第九章 冷冻	244
四、气体吸收的分类	200	第一节 概述	244
第二节 吸收过程的相平衡关系	200	一、冷冻单元操作的概念	244
一、汽-液平衡关系及其意义	200	二、冷冻的实质	245
二、传质的基本方式	204	第二节 压缩蒸气冷冻机	245
三、吸收机理——双膜理论	204	一、压缩蒸气冷冻机的工作过程	245
第三节 吸收速率方程及吸收总系数	205	二、温-焓图	246
一、吸收速率方程	205	三、压缩蒸气冷冻机的计算	247
二、吸收总系数	206	四、多级压缩蒸气冷冻机	249
第四节 吸收过程的计算	207	第三节 冷冻剂和冷冻盐水	250
一、全塔物料衡算	207	一、冷冻剂	250
二、吸收操作线方程	208	二、冷冻盐水	251
三、吸收剂用量的确定	209	第四节 压缩蒸气冷冻机的主要设备	252
第五节 解吸和吸收流程	212	一、压缩机	252
一、解吸流程	212	二、冷凝器	253
二、吸收流程	213	三、蒸发器	253
第六节 填料塔	215	四、膨胀阀	254
一、填料塔的结构和工作原理	215	思考题与习题	254
二、填料的类型和特性	216	第十章 结晶	256
三、吸收操作分析	220	第一节 概述	256
思考题与习题	221	一、结晶的概念及其工业应用	256
第八章 干燥	223	二、固-液体系相平衡	257
第一节 概述	223	三、晶核的形成与影响因素	259
一、干燥的目的	223	四、晶体的成长与影响因素	260
二、干燥的概念	223	第二节 结晶方法	261
三、干燥的分类	224	一、冷却结晶	262
四、对流干燥过程的分析	224	二、蒸发结晶	262
第二节 湿空气的性质和湿-焓图	224		

三、真空冷却结晶	262	二、分离膜应具备的条件及类型	295
四、盐析结晶	262	第三节 超临界流体萃取	297
五、反应沉淀结晶	263	一、超临界流体萃取技术的发展与特点	297
六、升华结晶	263	二、超临界流体萃取原理及过程简介	297
七、熔融结晶	263	思考题与习题	299
第三节 结晶设备及操作	264	附录	301
一、结晶设备的类型、特点及选择	264	一、化工常用法定计量单位及单位换算	301
二、常见结晶设备	265	二、某些气体的重要物理性质	303
三、结晶操作	267	三、某些液体的重要物理性质	304
思考题与习题	268	四、常用固体材料的密度和比热容	305
第十一章 液-液萃取	269	五、水的重要物理性质	305
第一节 概述	269	六、干空气的重要物理性质	306
一、萃取在工业生产中的应用	269	(101.33kPa)	306
二、萃取剂的选择	270	七、饱和水蒸气表(按压强排列)	307
三、萃取操作流程	271	八、饱和水蒸气表(按温度排列)	308
第二节 部分互溶物系的相平衡	272	九、液体黏度共线图	309
一、三角形相图	272	十、气体黏度共线图(常压下用)	311
二、溶解度曲线与平衡连接线	273	十一、液体比热容共线图	313
三、分配曲线与分配系数	275	十二、气体比热容共线图(常压下用)	315
四、辅助曲线与杠杆规则	277	十三、液体汽化潜热共线图	317
五、萃取过程在三元相图上的表示	278	十四、固体材料的热导率	318
第三节 萃取设备	280	十五、某些液体的热导率	319
一、塔式萃取设备	280	十六、气体的热导率共线图(常压下用)	320
二、萃取设备的选用	282	十七、管子规格	321
三、萃取塔的操作	283	十八、泵及通风机规格	322
思考题与习题	284	十九、若干气体水溶液的亨利系数	323
第十二章 新型单元操作简介	286	二十、部分双组分混合液在 101.3kPa 下的汽-液平衡数据	324
第一节 吸附	286	二十一、氨的温-焓图	324
一、吸附的基本概念与吸附剂	286	参考资料	326
二、吸附原理	289		
三、吸附工艺简介	290		
第二节 膜分离	291		
一、膜分离技术的基本概况	291		

绪 论

学习目标

- 掌握 化工过程的物料衡算与能量衡算的基本概念及计算步骤。
- 理解 化工生产过程的构成，单元操作的概念，单元操作中常用的五个基本概念及单位与单位一致性。
- 了解 “化工单元过程及操作”课程的内容、性质及任务；学习本课程的主要方法。

一、化工过程与单元操作

化工产品有千万种，它们都是由各种原料进行化学加工而获得的产品。可见，其核心应当是化学反应过程及其设备。但是，为使化学反应过程能够经济有效地进行，还必须满足化学反应的一些适宜的条件，如适宜的压强、温度和物料的纯度等。所以，除化学反应过程，其他满足化学反应条件的过程均属物理过程。而这些物理过程在整个化工生产中占有极重要的地位，对生产过程的经济效益影响很大。

例如，聚氯乙烯塑料的生产过程是以乙炔和氯化氢为原料进行加成反应以制成氯乙烯单体，然后在 0.8MPa、338K 左右进行聚合反应生产聚氯乙烯。但原料乙炔和氯化氢在加成反应前，须将其中的各种杂质进行清除，以防止反应器内的催化剂中毒失效。反应生成物（氯乙烯单体）中含有未反应的氯化氢和其他副反应产物。例如，氯化氢应首先除去以免除其对设备、管路的腐蚀，然后再将反应后的气体经压缩、冷凝并除去其他杂质，达到聚合反应所要求的纯度和聚集的状态。聚合后获得的塑料颗粒和水的悬浮液须经脱水、干燥而后成为产品。该生产过程如图 0-1 所示。

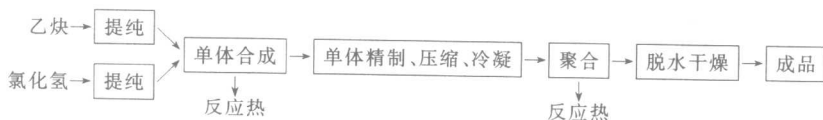


图 0-1 聚氯乙烯塑料生产过程

该生产过程除单体合成、聚合反应过程以外，原料的提纯和反应物的精制等工序中所进行的过程大多数是纯物理过程，这些物理过程统称为化工单元操作，简称单元操作。在现代化学工业中，化工单元操作在企业的设备投资和操作费用中占大部分比例。因此，化工单元操作在化工生产中是非常重要的，是研究众多单元操作共同性质的课程。

虽然化工产品众多，但它们的生产过程均是化学反应和若干单元操作组合串联而成的，所以没必要将每一化工生产过程都当作一种特殊的或独有的技术去研究。只研究组成生产过程的每一个单独操作即可。至于化学反应则不属于本课程研究的范围。

在单元操作中，如何控制最优化的生产条件和创造更好的经济效益，必须学习以下五个

基本概念。它们也是从事化工生产的操作者和管理者所要掌握的重要基本概念。

1. 物料衡算

在化工单元操作中，由于涉及化学反应，对任一系统来说，凡向该系统输入的物料量必等于从该系统输出的物料量与损失的物料量之和，即

$$\text{输入系统的物料量} = \text{输出系统的物料量} + \text{系统损失的物料量}$$

这个公式是物料衡算通式，是根据质量守恒定律建立的。因为化工生产贯穿着物料的转变，而化工操作也应进行物料衡算，它是班组核算的重要内容。依此可以判定操作的优劣，分析经济效益，提供工艺数据，为严密地控制生产物料的运行、减少物料的损失打下基础。该式既适用于连续操作，也适用于间歇操作。还适用对于物料中的任一组分进行衡算；当有化学反应时，它只适用于任一元素的衡算。

物料衡算步骤可概括为划定范围、确定基准、列出方程和求解方程四个步骤。

(1) 划定范围 确定物料衡算所包括或涉及的范围，一般可用封闭虚线框将需要衡算的设备或设备的局部、或一个车间、一个工段等划定出来，范围之内的体系就是要进行衡算的对象。进出体系的物流均用带箭头的物流线标明，物流线一定与范围线相交（若不相交表示该物流没有进入或离开体系）。

(2) 确定基准 对于间歇操作，可以规定以一批物料为基准；对于连续操作，一般以1h作为基准，必要时也可用1d（天）、1月、1a（年）作为基准。

(3) 列出方程 可以列出整个物料衡算方程，也可以列出某组分的衡算方程。所列方程应包含已知条件和所求的量，对于有几个未知量的衡算问题，需要列出几个互相独立的衡算方程。

(4) 求解方程 从联立方程组解出未知量。列出物料平衡表，并用平衡表验算。

应当注意：物料衡算时，应严格按以上步骤进行；计算时使用的单位要统一；物料衡算实际上是质量的平衡，计算时一律用质量单位。

2. 能量衡算

在化工生产操作中，始终贯穿着能量的使用是否完善的问题。提高输入体系能量的有效利用率和尽量减少能量的损失，在很大程度上关系着产品成本和生产的经济效益。能量衡算是定量计算能量有效利用率和能量损失的一种表现形式，它基于能量守恒定律。在任何一个化工过程中，凡向体系输入的能量必须等于从该体系输出的能量和能量损失之和，即

$$\text{输入体系能量} = \text{输出体系能量} + \text{能量损失}$$

能量损失，是指输入体系能量中未被有效利用的部分。

按照这一规律进行的计算，称为能量衡算，其计算步骤除按物料衡算外，还应确定基准温度。习惯上选0℃为基准温度。并规定0℃时液体的焓为零。

3. 平衡关系

化工过程中的每一种单元操作或化学反应都可称为过程，研究过程的规律，目的是使过程向着有利于生产的方向进行。平衡关系，就是研究过程进行的方向和过程进行的极限（过程进行的最大程度）。

平衡关系就是指在一定的条件下，过程的变化达到了极限——即达到平衡状态。例如，高温物体自动地向低温物体传热，直至进行到两物体的温度相等时为止。宏观上热量不再进行传递，即传热的平衡状态。

当条件改变时，原有的平衡状态被破坏并发生转移，直至在新的条件下重新建立平衡。在化工生产中经常采用改变平衡条件的方法，使平衡向着有利于生产的方向移动。为能有效地控制生产，应掌握生产过程的平衡状态和平衡条件的相互关系，进而判断过程进行的程

度，做到心中有数地驾驭生产，完善操作。

4. 过程速率

过程速率是指单位时间内过程的变化率，即表明过程进行的快慢。在化工生产中，过程进行的快慢远比过程的平衡显得更为重要。若一个过程可以进行，而速率非常慢，那么这个过程就失去了工业规模生产的意义。

对于一个处于不平衡状态的体系，必然会产生使体系趋向于平衡的过程；但过程以怎样的速率趋向平衡，这不取决于平衡关系，而取决于影响过程的诸多因素。由理论研究和科学实验证明，过程速率是过程推动力与过程阻力的函数，过程推动力越大，过程阻力越小，则过程速率越大；否则反之，即

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

过程推动力指的是直接导致过程进行的动力，如水从高处自动流向低处的推动力是位能差。过程阻力因素较多，与体系物性、过程性质、设备结构类型、操作条件等都有关系。对过程速率问题的讨论，将在有关章节中进行介绍。在化工单元操作中，应努力寻求提高过程速率的途径。怎样加大过程推动力和减少过程阻力，是提高设备生产能力的重要问题。

5. 经济效益

经济效益也称为经济效果，是多种生产方式下都普遍存在的客观经济范畴，一般指经济活动中，所取得的成果与劳动消耗之比，即

$$\text{经济效益} = \frac{\text{劳动成果}}{\text{劳动消耗}}$$

式中，劳动成果是指最终的合格产品价值；劳动消耗包含操作费用（消耗的人力、原材料、水电、维修等）和设备折旧费（设备的造价和使用年限折算），以及占用的固定资产和流动资金。

可见，在一定的劳动消耗条件下，适合市场需求的合格产品越多，经济效益就越好。为了提高经济效益，必须从提高生产操作者的技术素质、提高劳动成果和降低消耗三个方面去开展技术革新，加强生产管理和经济核算，降低操作费用，提高设备的生产力，以达到优质、高产、低消耗、高效益的目的。

二、化工单元操作的内容、性质及任务

单元操作是华尔克等人在 1923 年提出的，自此以后便作为一门工程学取得了快速的发展。根据单元操作所遵循的基本规律，可将单元操作划分为以下四大类。

(1) 动量传递过程单元操作 包含流体力学、流体输送与压缩、沉降与过滤、固体流态化等。

(2) 热量传递过程单元操作 包含加热、冷却、冷凝、蒸发等。

(3) 质量传递过程单元操作 包含蒸馏、吸收、萃取、结晶、干燥、膜分离、超临界流体萃取等。

(4) 热力过程单元操作 指一般冷冻。

各种单元操作都是根据一定的物理原理，在特定的设备内进行的特定过程。因此过程和设备是相互依存的，而且，设备结构在技术上的先进程度，对单元操作能否更有效地进行影响很大。所以研究以上化工单元操作的基本原理和规律，熟悉各单元操作的设备结构、原理、主要性能和有关操作技术，以便在生产操作中运用这些知识去分析和解决实际工程技术问题。

化工单元过程及操作课程是数学、物理等课程的后继课程，它是一门化工技术基础课，

4 化工单元过程及操作

在整个教学中起到自然学科与应用学科的桥梁作用。学习本课程的任务是：主要讨论各单元操作的基本原理和规律、所用典型设备的结构和设备选型。通过本课程的学习，培养学生分析和解决单元操作中基本问题的能力，在生产实践中训练学生对生产设备应具有操作管理能力和强化单元过程的操作本领，使设备运行最优化，从而使生产获得最优化的经济效益。

三、化工常用量和单位

1. 化工常用量

量是指物理量，任何物理量都是用数字和单位联合表达的。每种物理量都有规定的符号，这些符号都是国际上认定和国家标准规定的。目前，国际上逐渐统一采用国际单位制单位（SI单位）；我国采用中华人民共和国法定计量单位。

物理量分为基本量和导出量。一般先选几个独立的物理量，如SI单位中，长度（ L ）、时间（ t ）、质量（ m ）、热力学温度（ T ）、物质的量（ n ）、电流强度（ I ）、发光强度（ I_v ）确定为基本量。化工单元操作中，用前5个基本量就足够了。由基本量导出的量，都是导出量，如比体积、重力加速度等。

用来度量同类量大小的标准量，称为计量单位。基本量的主单位称作基本单位。在确定了基本单位后，按照物理量之间的关系，用相乘、相除的形式构成的单位，称为导出单位。

2. 单位

由国家以法令形式允许使用的单位叫法定计量单位。我国在1984年公布实施的法定计量单位主要以SI单位制为基础，因它具有统一性、科学性、简明性、实用性、合理性等优点，是国际公认的较先进的单位制。我国根据本国实际情况选用了一些非国际单位构成了法定计量单位，其构成如表0-1所示。

表 0-1 我国法定计量单位的构成

法定计量单位构成内容		举 例		备 注
		单位名称	单位符号	
1. SI 单位	(1)SI 基本单位	米 千克	m kg	
	(2)具有专门名称的 SI 导出单位	牛[顿] 焦[耳]	N J	
	(3)组合形成的 SI 导出单位	米每秒 帕[斯卡]·秒	m/s Pa·s	在第3项中，凡由SI单位构成组合单位均为SI导出单位
2. 国家选定的 SI 制外单位		吨 升	t L	
3. 由以上单位构成的组合形式单位		米每秒 千瓦[特]·小时	m/s kW·h	其中，全由SI单位构成的，如m/s为SI导出单位；其余为SI制外导出单位
4. 由以上单位加SI词头构成的倍数和分数单位		毫米 千焦[耳]	mm kJ	SI给出了用以构成SI单位的倍数和分数单位的词头，如M、k(倍数单位词头)；c、m、 μ (分数单位词头)等

(1) 化工常用的5个SI基本量及单位

① 长度。基本单位是米（m），其倍数单位有千米（km）、厘米（cm）、毫米（mm）、微米（ μm ）等。

② 时间。基本单位是秒（s），国家选定的SI制外时间单位有分（min）、小时（h）、天（d）、年（a）。

③ 质量。千克（kg）、克（g）及其部分倍数单位，如兆克（Mg）、毫克（mg），还有吨（t）等。

④ 热力学温度。基本单位是开 [尔文](K)。等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

⑤ 物质的量。基本单位是摩 [尔](mol)，其倍数单位有 kmol、mmol 等。

(2) 化工常用 4 个 SI 导出单位

① 力、重力。牛 [顿](N) 及倍数单位，如 MN、kN、mN 等。

② 压力、压强。帕 [斯卡](Pa) 及其倍数单位，如 kPa、MPa、mPa 等。

③ 能 (量)、功、热 (量)。焦 [耳](J) 及其倍数单位，如 kJ、mJ，以及瓦 [特]·秒 ($W \cdot s$)、千瓦 [特小]·时 ($kW \cdot h$) 等。

④ 功率。瓦 [特](W) 及其倍数单位，如 kW、mW 等。

(3) 法定计量单位的使用、写法及读的规则

① 使用规则。词头代号用正体，词头代号和单位代号之间不留间隔，如 1km、1Mm、1mm 等；如带词头的单位代号上有指数，则表明倍数单位的系数值可由词头自乘而得，如 $1cm^3 = 1c^3m^3 = 1 \times (10^{-2})^3 m^3 = 10^{-6} m^3$ ， $1cm^{-1} = 1c^{-1}m^{-1} = 1 \times (10^{-2})^{-1} m^{-1} = 10^2 m^{-1}$ ；不允许两个以上国际单位制词头并列而成的组合词头，如 $10^6 g$ ，可用 1Mg，不许用 1kg；选用国际单位制词头时，一般应使单位前系数值在 0.1~1000 之间，如 12000m 可写成 12km，0.00394m 可写成 3.94mm。

② 写法规则。量的符号用斜体字母号，单位的符号用正体字母号，单位符号一般为小写，不能写成大写，如 m 不能写成 M；两个以上单位的乘积应最好用圆点作为乘号，当不致与其他单位代号混淆时，圆点可省略，如 $N \cdot m$ 可以写成 Nm，但不应写成 mN，因为后者会误认为是毫牛；当导出单位系由一个单位被另一个单位除所构成时，可以用斜线形式书写，分子、分母应同在一水平线上，如 $kg/(m \cdot s^2)$ ，不能写成 $\frac{kg}{m \cdot s^2}$ ；当词头符号表示的因数小于 10^6 时小写，大于 10^6 时大写，如兆写为 M，1MPa 不能写成 1mPa；千写为 k，1kg 不能写成 1Kg。

③ 读的规则。可按单位或词头的名称读音读，如“km”读“千米”；“mm”读“毫米”；“℃”读“摄氏度”。读的顺序与符号顺序一致，乘号按顺序读，如“ $N \cdot m$ ”读“牛顿米”。除号的对应名称是“每”。如速度 m/s 读“米每秒”，不能读“秒分之米”；传热系数 $W/(m^2 \cdot K)$ 读“瓦特每平方米开尔文”。

SI 还规定一些辅助单位和基本单位并用，如时间采用日 (d)、小时 (h)、分 (min)；质量采用吨 (t)；容积采用升 (L) 等。以上括号中为单位代号。除此之外，在本书中还遇到一些不属于任何单位制的单位，因为它们是由于习惯而保留下来，称为惯用单位。

应当提出，在使用物理量方程进行计算时，一开始应选定一种单位制度，并贯彻到底，中途绝不能改变。本教材采用 SI 单位制。在计算之前，如遇到其他单位制的单位，应把它们换算成 SI 单位。单位换算在书中各章节的计算例题中进行应用训练。化工常用法定计量单位及单位换算见附录一。

四、学习本课程的主要方法

本课程是理论与实践紧密联系的一门工程课程，学习时既要注意理论的系统性，又要充分重视课程的实践性。由课堂教学讲授基本理论，通过实验、实习，巩固和加深对基本理论的理解。用掌握了的基本理论去指导单元操作训练，在实践中验证理论的正确性。此外，还需注意下列几点。

1. 理解和掌握基本理论

重视基础理论、基本概念、基本公式的学习，尤其要抓住各单元过程的平衡、速率关系问题，因这是学好本课程的基础。在此基础上联系实际，逐步深入，才能灵活应用于生产操

6 化工单元过程及操作

作中。

2. 树立工程观念

学习本课程还需让学生初步树立工程观念，学会用工程观念去分析和处理生产中的技术问题。就是必须同时具备四种观念，即理论上的正确性、技术上的可行性、操作上的安全性、经济上的合理性。这四个观念中，经济是核心，并且是相互联系，相互促进的统一体。所谓工程观念，就是要从这四个方面的要求出发，全面地考虑和决定工程问题的观点。

3. 熟悉工程计算，培养基本计算能力

在单元操作计算中，往往涉及的物理量很多，有些数据计算时较烦琐，常需利用有关图表或手册查取。正确应用和熟练掌握有关图表和手册的使用方法，也是学习本课程的基本技能之一。

思考题与习题

- 0-1 化工过程的基本构成是什么？
- 0-2 物料衡算与能量衡算的依据和基本步骤是什么？
- 0-3 试说明学习本课程的目的和任务。
- 0-4 何谓工程观念？试说明“四性”间的关系。
- 0-5 怎样理解平衡关系、过程速率和经济效益，并说明对实际生产操作的指导意义。
- 0-6 化工单元操作按所遵循基本规律分为四种类型：第一，_____单元操作；第二，_____单元操作；第三，_____单元操作；第四，_____单元操作。
- 0-7 单元过程速率的表达式是_____，其中过程的推动力是指_____，提高过程速率的途径是_____。
- 0-8 将以下各量值按法定计量单位使用规则要求进行写、读。
 - (1) 15000m;
 - (2) $1.8 \times 10^3 \text{ N}$;
 - (3) 2160Pa;
 - (4) 0.088m;
 - (5) 9200J;
 - (6) $1.2 \times 10^7 \text{ N}$
- 0-9 指出聚氯乙烯生产过程中哪些过程是单元操作，哪些不是单元操作。

第一章 流体力学

学习目标

- 掌握 流体的密度、压力、黏度的概念及单位；流体静力学方程和应用；连续性方程；伯努利方程及应用和简单管路计算。
- 理解 流体阻力产生的原因及影响因素；直管阻力的计算；孔板流量计、文氏管流量计、转子流量计的基本构造、测量原理和使用要点。
- 了解 流体流动类型及流量计算；局部阻力计算和管路布置。

第一节 概 述

流体力学是一门基础性很强和应用性很广的学科，在石油化工领域中显得非常重要。流体在流动过程中，不仅有动量传递问题，还伴随有传热、传质现象。因此，流体力学是研究流体在静止或流体流动时有关参数变化规律的基础。

自然界存在着大量复杂的流动现象。具有流动性的物质称为流体，包括气体和液体。一般液体的体积随压力变化很小，可认为是不可压缩性流体。对于气体，当压力变化时，其体积会有较大的变化，工程上认为是可压缩性流体。

化工生产中所处理的物料，包括原料、半成品、成品等，大多数都是流体。为了满足生产工艺要求，常常需要将物料从一个设备送往另一个设备，从一个车间输送到另一个车间。因此流体流动是化工生产中广泛使用的操作。此外，化工生产中所涉及的各个单元操作，如传热、蒸发、蒸馏等都离不开流体的流动。因此，研究流体流动问题是本课程的重要内容，是研究各个单元操作的重要基础。

第二节 流体静力学

流体在重力场中，除了受重力作用外，还会受到压力的作用，当作用于流体上的这两种力达到平衡时，流体就处于静止状态。流体静力学就是研究流体处于静止状态时力的平衡关系，并因此而指导生产实际应用。

一、流体的主要物理量

1. 密度

单位体积流体所具有的质量，称为流体的密度，用符号 ρ 表示，即

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;
 m ——流体的质量, kg ;
 V ——流体的体积, m^3 。

不同流体密度不同, 同一流体的密度随温度和压强而变化。

(1) 液体密度 液体密度随压强变化很小, 常可忽略其影响。对大多数液体而言, 密度随温度的升高而减少。如纯水的密度在 277K 时为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 293K 时为 $998.2\text{kg}/\text{m}^3$, 373K 时则为 $958.4\text{kg}/\text{m}^3$ 。因此, 在选用密度数据时, 一定要注明温度。

纯液体的密度可通过式 (1-1) 求得。工程计算中, 可通过有关手册查得。

化工生产中遇到的多是液体混合物。液体混合物在某一温度时的密度可按理想溶液由纯组分密度进行近似计算, 即

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{\omega_n}{\rho_n} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——液体混合物的平均密度, kg/m^3 ;
 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分的密度, kg/m^3 ;
 $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ——液体混合物中各组分的质量分数。

(2) 气体的密度 气体的密度随压力的增加而增加, 随温度的升高而减小。常见气体的密度可从手册中查到。如果压力不太高、温度不太低时, 可近似地按理想气体状态方程计算, 即

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

式中 p ——气体的压力, kPa ;
 T ——气体的温度, K ;
 M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ;
 R ——摩尔气体常数, $8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

一般在手册中查得的气体密度都是在一定压力和温度下的数值, 若条件不同, 则需要进行换算。

对于气体混合物, 其平均密度也可由式 (1-3) 计算, 但式中的摩尔质量 M 应以混合气体的平均摩尔质量 $M_{\text{均}}$ 代替。即

$$\rho = \frac{pM_{\text{均}}}{RT} \quad (1-4)$$

其中 $M_{\text{均}} = M_1 \varphi_1 + M_2 \varphi_2 + \cdots + M_n \varphi_n$ (1-5)

式中 $M_{\text{均}}$ ——气体混合物平均摩尔质量, kg/kmol ;
 M_1, M_2, \dots, M_n ——气体混合物中各组分的摩尔质量, kg/kmol ;
 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数 (或体积分数)。

气体混合物的密度, 也可根据各组分气体密度进行计算。若各组分在混合前后的体积不变, 用式 (1-6) 计算混合气体的密度, 即

$$\rho = \rho_1 \varphi_1 + \rho_2 \varphi_2 + \cdots + \rho_n \varphi_n \quad (1-6)$$

(3) 相对密度 相对密度是指在一定温度下流体的密度与某一参考流体密度之比, 用符号 d 表示。

液体的相对密度是指某种液体在一定温度下的密度与 277K 、标准大气压下纯水的密度之比, 表达式为