

面向**21**世纪化工类高职高专教材

化工原理

张木全 云智勉 编

HUAGONG YUANLI

(第二版)



华南理工大学出版社

面向21世纪化工类高职高专教材

化工原理



(第二版)

责任编辑：胡元

封面设计：吴俊卿

ISBN 978-7-5623-2756-1



9 787562 327561 >

定价：38.00元

面向21世纪化工类高职高专教材

化工原理

(第二版)

张木全 云智勉 编

华南理工大学出版社
·广州·

内容简介

本书是轻化工专业的一门技术基础教材,着重介绍轻化工生产中常用的单元操作的基本原理、典型设备及计算方法。

全书共八章,内容包括流体力学、流体输送、非均相物系分离、气力输送、传热、蒸发、精馏和干燥。每章都结合轻化工生产实际选编例题,各章末还附有思考题和习题。书后附录有常用物性参数图表及管子、泵、通风机、换热器的部分规格等,供学习时参考。

本书可作为高等职业专科学校化工专业教学用书,也可供从事轻化工生产的有关工程技术人员参考。

(第二版)

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/张木全,云智勉编.—2版.—广州:华南理工大学出版社,2008.1

(面向21世纪化工类高职高专教材)

ISBN 978-7-5623-2756-1

I. 化… II. ①张… ②云… III. 化工原理-高等学校:技术学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 150521 号

总发行:华南理工大学出版社(广州五山华南理工大学17号楼,邮编510640)

营销部电话:020-87113487 87110964 87111048(传真)

E-mail:scutc13@scut.edu.cn <http://www.scutpress.com.cn>

责任编辑:胡元

印刷者:广州华南理工大学印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:22 字数:575千

版次:2008年1月第2版 2008年1月第6次印刷

印数:11001~14000册

定价:38.00元

版权所有 盗版必究

第二版说明

本教材自 2000 年 10 月出版,经多次印刷,受到广大读者好评。现应华南理工大学出版社之邀进行再版修订。这次再版主要对第二章和第五章作了一些修改,同时增加了各章的思考题。本书具有篇幅小、语言简练、通俗易懂、内容少而精的特点,并且注重物理概念理解,注意理论联系实际,强调应用,特别适合高等职业技术专科学校使用。

由于作者水平有限,难免有不妥之处,恳请读者不吝赐教,以使教材日臻完善。

编 者

2007 年 10 月

前 言

本书是根据高等职业技术学院“化工原理”课程教学大纲要求编写的。

在本书的编写过程中,我们根据高等职业教育的培养目标和教学要求,以“必需、够用”为度,合理选择教材内容。同时,特别注意理论联系实际,结合轻化工专业的特点,通俗易懂地讲清楚基本概念和原理,并注重引导学生从工程角度、经济观点考虑问题。对于设备,着重典型分析,以操作原理和选型为主、结构细节为次。至于计算公式则尽量避免繁琐、艰深的数学推导,力求深入浅出,既简明又实用。

根据教学大纲要求,本书以流体力学、流体输送、传热、干燥为重点。全书内容的讲课时数约为 100 学时,适合造纸、塑料、食品、工业发酵、制药、环保、精细化工、轻工机械等专业使用。

本书由广东轻工职业技术学院张木全主编并编写绪论、第一至第三章及第八章;云智勉编写第四至第七章。全书由中山大学祁存谦教授审定。

由于编写时间仓促,编写水平有限,书中缺点、不足在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2000 年 8 月

目 录

绪论	1
一、单元操作	1
二、4个基本概念	2
三、本课程的性质和任务	2
第一章 流体力学	4
第一节 流体静力学	4
一、流体的密度和比体积	4
二、流体的压力	6
三、流体静力学基本方程	8
四、流体静力学基本方程的应用	9
第二节 流体动力学	12
一、流量与流速	12
二、稳定流动和不稳定流动	14
三、连续性方程	14
四、柏努利方程	15
五、柏努利方程的应用	19
第三节 流体阻力	22
一、流体的粘度	22
二、流体的流动型态	24
三、流体阻力的计算	27
第四节 管路	39
一、管子的标准	39
二、管子、管件和阀门	39
三、管道直径的选择和计算	41
四、管路的计算	43
五、管路的连接和布置原则	46
第五节 流量的测量	48
一、测速管	48
二、孔板流量计	50
三、文丘里流量计	53
四、转子流量计	53
思考题	56

习题	57
第二章 流体输送机械	61
第一节 概述	61
第二节 离心泵	61
一、离心泵的工作原理	61
二、离心泵的主要部件	62
三、离心泵的主要性能参数	63
四、离心泵的性能曲线	66
五、离心泵的吸上高度和气蚀现象	68
六、离心泵的型号和选用	73
七、离心泵的工作点	76
八、流量调节	77
九、离心泵的操作、安装与运转	78
第三节 往复泵	80
一、往复泵的构造和操作原理	80
二、往复泵的流量与压头	81
三、往复泵的流量调节	82
第四节 其他类型泵	82
一、计量泵	82
二、旋转泵	83
三、旋涡泵	83
第五节 气体输送与压缩机械	84
一、通风机	84
二、鼓风机	87
三、压缩机	87
四、真空泵	94
思考题	95
习题	95
第三章 非均相物系的分离	98
第一节 沉降	98
一、重力沉降	98
二、沉降器的构造和计算	102
三、离心沉降	105
四、离心沉降设备	106
第二节 过滤	111
一、过滤操作的基本概念	111
二、过滤基本方程	113
三、过滤设备	117
四、滤渣的洗涤	121

五、过滤机的生产能力	122
第三节 离心机	125
一、一般概念	125
二、离心机的结构与操作	126
第四节 气体的其他净制设备	129
一、袋滤器	129
二、泡沫除尘器	130
三、文丘里除尘器	130
四、水膜除尘器	131
思考题	131
习题	132
第四章 气力输送	134
第一节 概述	134
一、气力输送的特点	134
二、气力输送的分类	134
第二节 气力输送装置	135
一、供料器和卸料器	135
二、物料分离器和除尘器	138
三、管道和风机	139
第三节 气力输送系统的计算	140
一、主要参数的选用和计算	140
二、设计计算步骤	144
思考题	147
习题	147
第五章 传热	148
第一节 概述	148
一、传热的基本方式	148
二、工业上的换热方法	149
三、稳定传热和不稳定传热	150
第二节 热传导	151
一、傅立叶定律和导热系数	151
二、平壁的稳定热传导	153
三、圆筒壁的稳定热传导	156
第三节 对流传热	158
一、对流传热的分析	158
二、壁面和流体间的对流传热速率	158
三、影响对流传热系数的因素及一般关联式	159
四、对流传热系数的经验关联式	161
第四节 间壁两侧流体间的传热	166

一、传热基本方程	166
二、热负荷的计算	167
三、传热平均温度差计算	170
四、流体流动方向的选择	174
五、传热系数 K 值的确定	174
六、传热面积	180
七、壁温的估算	182
八、设备的保温	183
第五节 换热器	185
一、间壁式换热器	185
二、列管式换热器	187
三、新型换热器	200
四、间壁式换热器的比较	204
五、强化传热的途径	204
思考题	206
习题	206
第六章 蒸发	209
第一节 概述	209
第二节 单效蒸发	210
一、单效蒸发的计算	210
二、溶液沸点的确定	215
第三节 多效蒸发及提高加热蒸汽经济性的其他措施	220
一、多效蒸发原理	220
二、多效蒸发流程	221
三、多效蒸发的效数	222
四、提高加热蒸汽经济性的其他措施	223
第四节 蒸发设备	225
一、蒸发器	225
二、蒸发器的辅助装置	231
三、蒸发器的生产强度	232
思考题	233
习题	233
第七章 蒸馏	235
第一节 概述	235
第二节 双组分溶液的气液相平衡	235
一、相组成的表示方法	235
二、双组分溶液的气液相平衡	238
三、挥发度与相对挥发度	242
第三节 简单蒸馏和精馏	243

一、简单蒸馏	243
二、精馏原理和流程	244
第四节 双组分混合液连续精馏塔的计算	248
一、全塔物料衡算	248
二、理论板的概念及恒摩尔流的假设	248
三、操作线方程	249
四、进料状况对操作线的影响	251
五、理论塔板数的求法	255
六、实际塔板数和板效率	256
七、回流比的影响及其选择	260
八、连续精馏的热量衡算	263
第五节 精馏塔	266
一、板式塔的构造	266
二、板式塔性能的比较	270
第六节 特殊蒸馏	271
一、水蒸气蒸馏	271
二、恒沸蒸馏	272
思考题	273
习题	274
第八章 干燥	277
第一节 概述	277
第二节 湿空气的性质和湿度图	278
一、湿空气的性质	278
二、湿空气的湿度图及其用法	284
三、湿空气的增湿和减湿	288
第三节 干燥器的物料和热量衡算	289
一、物料衡算	289
二、热量衡算	292
三、干燥器出口状态的确定	294
四、干燥器的热效率	295
第四节 干燥速率和干燥时间	297
一、物料中所含水分的性质	297
二、干燥速率及其影响因素	299
三、恒定干燥情况下干燥时间的计算	302
第五节 干燥器	304
一、厢式干燥器	304
二、带式干燥器	305
三、气流干燥器	305
四、沸腾床干燥器(流化床干燥器)	306

五、转筒干燥器	307
六、滚筒干燥器	308
七、喷雾干燥器	308
八、冷冻干燥器	309
九、红外线干燥器(辐射干燥器)	309
十、微波加热干燥器	310
十一、干燥器的选择	311
思考题	311
习题	312
附录	314
1. 化工常用法定计量单位	314
2. 常用单位的换算	314
3. 某些气体的主要物理性质	317
4. 某些液体的主要物理性质	318
5. 水的主要物理性质	319
6. 干空气的主要物理性质($p = 101.3\text{kN/m}^2$)	320
7. 饱和水蒸气表(按温度排列)	321
8. 饱和水蒸气表(按压力排列)	322
9. 水的粘度($0 \sim 100^\circ\text{C}$)	323
10. 液体粘度共线图及密度	324
11. 某些固体材料的主要物理性质	325
12. 糖溶液的主要物理性质	326
13. 乙醇-水溶液的主要物理性质	327
14. 牛乳的主要物理性质	328
15. 管子规格	329
16. 离心泵规格	331
17. 离心通风机规格	338
18. 旋风分离器的主要性能	339
19. 列管(固定管板)式换热器规格(摘录)	340

绪 论

一、单元操作

化工生产是以化学变化或化学处理为主要特征的工业生产过程,其原料来源广泛,产品种类繁多,加工过程复杂多样。很久以前,各种化工产品的生产技术被看成彼此孤立而少有相同之处。那时,只从一种产品到另一种产品逐个地去认识化工生产过程的规律;反映化工生产技术的科学,也仅是每一种化工产品的工艺学,如造纸工艺学、制糖工艺学,等等。

经过长期的生产实践和科学实验,至 20 世纪 20 年代初期,提出了化工单元操作的概念。人们发现,在各种化工产品的生产过程中,除去化学反应外,其余步骤皆可归纳为若干种基本的物理过程,如流体的输送与压缩、沉降、过滤、传热、蒸发、蒸馏、吸收、干燥、冷冻等,这些基本过程称为单元操作。若干单元操作与化学反应过程串联组合则可构成一个工艺制造过程。

单元操作不仅在化学工业中占据重要地位,也广泛应用于石油、冶金、轻工、制药、原子能等工业中。

不同工艺过程中的同一种单元操作,具有共同的基本原理和通用的典型设备。譬如,制糖工业中糖水的浓缩与制碱工业中苛性钠溶液的浓缩,都是通过蒸发这一单元操作而实现的,它们共同遵循热交换原理并且都采用蒸发器。又如酿造工业中酒精的提纯与石油工业中烃类的分离都是通过蒸馏这一单元操作实现的,它们共同遵循物质传递原理并都采用精馏塔。但是,不同的工艺过程各有其独特的要求与条件,制糖工业中蒸发操作的条件以及对蒸发器的要求就有别于制碱工业,酿造工业与石油工业中的蒸馏操作也同样如此。

对于轻化工企业来说,绝大多数的设备都进行着各种单元操作,它占用工厂绝大部分的设备投资和操作费用,决定了整个生产的经济效益。因此单元操作在轻化工企业中占有相当重要的地位。本课程的研究对象就是各种单元操作,各单元操作包括两个方面:过程和设

各单元操作并不是没有相互联系的,经过研究,按照各单元操作遵循的基本原理,可把它们归纳为下面几个基本过程:

(1) 动量传递过程:包括遵循流体力学原理的单元操作,如流体输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌及气力输送等。

(2) 热量传递过程(简称传热过程):包括遵循热量传递原理的单元操作,如加热、冷却、蒸发和结晶等。

(3) 质量传递过程(简称传质过程):包括遵循传质理论的单元操作,如吸收、蒸馏、吸附、萃取、干燥等。

(4) 热力过程:包括遵循热力学定律的单元操作,如冷冻和深度冷冻等。

本课程根据轻化工企业的特点和教学大纲的要求,只研究比较重要而又常用的一些单

元操作,重点是流体输送和非均相物系的分离、传热、蒸发及干燥等单元操作,而流体力学为学习本课程的基础。

二、4个基本概念

在研究化工单元操作时,经常用到物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系和过程速率4个基本概念,现就其含义作简要说明。

1. 物料衡算

根据质量守恒定律,在任一化工生产过程中,进入该过程的物料质量必等于从该过程输出的物料质量与积累于该过程中的物料质量之和,即

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{积累量}$$

对于连续稳定的操作过程,过程中不应有物料的积累,则其物料衡算关系式为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

物料衡算可按下列步骤进行:①根据题意画出各物料的流程示意图,物料的流向用箭头表示,并标上已知数据与待求量。在较复杂的流程示意图上应画出衡算的范围。②在写物料衡算式之前,要选定计算基准,一般选用单位进料或出料量、时间及设备的单位体积等作为计算的基准。③对总物料或其中某一组分列出物料衡算式,进行求解。

2. 能量衡算

本教材中所用到的能量主要有机械能和热能。能量衡算的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在流体力学有关章节中说明;热量衡算的步骤与物料衡算的步骤基本相同,但列热量衡算式时还应注意物料的状态基准,这将在传热、蒸发、蒸馏和干燥等章节中结合具体单元操作作详细说明。

3. 物系的平衡关系

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。例如,在一定温度下,不饱和的食盐溶液与固体食盐接触时,食盐向溶液中溶解,直到溶液为食盐所饱和,食盐就停止溶解,此时固体食盐表面已与溶液达到动平衡状态。反之,若溶液中食盐浓度大于饱和浓度,则溶液中的食盐会析出,最终达到平衡状态。由此可见,平衡关系可以用来判断过程能否进行,以及进行的方向和能达到的极限。

4. 过程速率

任何一个物系,如果不是处于平衡状态,必然存在一个趋向平衡的过程,而过程的快慢,即过程速率受多方面因素的影响,通常它与过程的推动力成正比,与阻力成反比,即

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

过程推动力依具体过程而有所不同,它可以是压强差、温度差或浓度差等。过程速率是选定化工设备的重要因素,过程速率大时,设备尺寸就小。增大过程的推动力或减小过程的阻力均可提高过程的速率。

三、本课程的性质和任务

本课程是轻工各专业的一门技术基础课,而不是专门研究某一轻化工产品的工艺专业课。其内容既广泛又实用,是从事专业生产的技术人员必须掌握的一门基础知识。学习

本课程的主要任务是研究各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

本课程的任务是研究各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

学 习 目 标

本课程的教学目标是使学生掌握各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

本课程的教学目标是使学生掌握各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

本课程的教学目标是使学生掌握各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

本课程的教学目标是使学生掌握各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

(1-1)

$$\frac{m}{V} = \rho$$

本课程的教学目标是使学生掌握各单元操作的基本原理和规律,熟悉各单元操作所用的典型设备的结构、性能、工作原理以及基本计算,做到既能根据工艺要求进行设备选型或主要尺寸的计算,还能应用所学的知识去分析和解决生产中出现的有关问题,对现行生产过程进行科学管理,使设备达到安全、高效运转,从而使生产获得最大的经济效益。

第一章 流体力学

气体和液体都具有流动性,通常总称为流体。轻化工生产中所处理的物料,包括原料、半成品及产品等,大多数是流体。为了把流体原料制成半成品、产品,常需把流体从一个设备送到另一个设备,或从一个车间送到另一个车间。因此,流体输送操作是轻化工生产中经常遇到的操作。另外,在现代轻化工生产的各项操作过程中,无论是传热、传质或化学反应,大多是在流体流动的情况下进行的,流体流动状态对这些过程有很大的影响。因此,流体输送是轻化工生产中的一个基本操作,也是其他化工过程的基础。

流体力学的基本知识是解决流体输送问题的理论依据,也是今后学习其他化工过程必要的基础知识。本章主要讲述流体静力学,即流体在静止时的平衡规律;流体动力学,即流体流动时的基本规律;流体阻力的理论和计算;以及运用这些基本知识解决流体流动中的基本问题,即管路的计算和流量的测量。

应当指出,流体是由不断运动着的分子所构成的,流体除了由内部分子所引起的运动外,还存在着由外部原因,例如重力、离心力、压力差等的作用而引起的流体运动。但是,在工程实际中主要是研究流体的宏观运动规律,即研究由外部原因而引起的流体运动,一般不研究流体分子的运动。因此,在研究流体力学时,就要把流体作为无数微团(或质点)所组成的连续介质,流体所占的空间全部为这种连续介质所充满。但并不是在任何情况下都可以把流体视为连续介质,如在高度真空下的气体,由于此时气体分子极少,就不能把它视为连续介质了。

第一节 流体静力学

流体静力学主要研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系,实质上是讨论流体静止时其内部压强变化的规律。由于它涉及流体的密度、压力等物理量,因此这里首先介绍一下有关的概念。

一、流体的密度和比体积

(一)流体的密度

单位体积流体的质量,称为流体的密度,用符号 ρ 表示。其表达式为:

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

式中: m 为流体的质量,kg; V 是质量为 m 的流体的体积, m^3 。因此密度的单位为 kg/m^3 。

流体的密度一般可在有关手册中查到,本书附录中也列有某些常见液体和气体的密度数值。

对同一流体而言,其密度的大小受到温度和压力的影响,但影响程度不同。

1. 液体的密度

压力对液体的密度影响很小,工程上常忽略不计,故工程上又称液体为不可压缩的流体。但温度对它则有一定的影响,故从手册中查取液体密度时,要注意其所指的温度。如纯水在4℃时的密度为1000 kg/m³,在20℃时为998.2 kg/m³。

液体的密度用实验方法测定。如工程上最简单的方法是用比重计来测定,测出的数值称为相对密度。液体的相对密度是指液体在温度*t*℃时的密度与4℃时纯水的密度的比值,用符号*d*表示,它是一个无单位的物理量。即

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-2)$$

式中: ρ 为液体在*t*℃时的密度,kg/m³; $\rho_{\text{水}}$ 为纯水在4℃时的密度,其值等于1000 kg/m³; *d*为液体在*t*℃时的相对密度。

由式(1-2)可知,若已知液体的相对密度,便可求得该液体的密度。即

$$\rho = 1000d \quad (1-3)$$

实际生产中常遇到的是混合液体,同样,可用实验方法测得其密度。若工程计算不要求特别精确时,当混合体积不变时,则混合液体的密度可近似用下式计算:

$$1/\rho_m = (x_{w_1}/\rho_1) + (x_{w_2}/\rho_2) + \cdots + (x_{w_n}/\rho_n) \quad (1-4)$$

式中: $x_{w_1}, x_{w_2}, \cdots, x_{w_n}$ ——混合液中各组分的质量分率;

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——混合液中各纯组分的密度,kg/m³;

ρ_m ——混合液的平均密度。

例1-1 某输送管路每小时输送20℃95%的乙醇5t,试求每小时通过的乙醇体积为若干m³?

解 查附录1得,20℃95%乙醇的密度为804 kg/m³。

由式 $\rho = m/V$ 有 $V = m/\rho$, 已知 $m = 5\text{t} = 5000\text{kg}$, 所以

$$V = 5000/804 = 6.22(\text{m}^3)$$

例1-2 已知49℃时脂肪、非脂乳、蔗糖和水的相对密度分别为0.93、1.61、1.59、0.998,今欲制出含脂肪8.6%、非脂乳20.9%、蔗糖44.3%和水分26.2%(以上皆为质量分数)的甜炼乳,试求此温度下的甜炼乳的密度。

解 将已知值代入公式(1-4),得

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{0.086}{0.93 \times 10^3} + \frac{0.209}{1.61 \times 10^3} + \frac{0.443}{1.59 \times 10^3} + \frac{0.262}{0.998 \times 10^3} = 7.661 \times 10^{-4}$$

因此,此甜炼乳的密度 $\rho_m = 1305\text{kg/m}^3$ 。

2. 气体的密度

气体因具有可压缩性和热膨胀性,其密度的大小受温度和压力影响较大,因此气体的密度必须标明其状态。如在物理标准状态(温度0℃,压力101.3 kN/m²)下,空气的密度为1.293 kg/m³。

当手册中查不到某一温度和压力下的气体密度数值时,在工程计算中,对一般温度和压力下的气体,其密度可近似用理想气体状态方程式计算,即由

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

可得

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-5)$$