

高等学校教材

# 化工原理

(第二版)

贾绍义 柴诚敬 主编

 高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

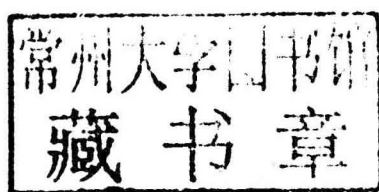
高等学校教材

# 化工原理

Hua Gong Yuan Li

(第二版)

贾绍义 柴诚敬 主编



高等教育出版社·北京  
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

## 内容提要

本书是为了满足应用型人才培养的需要而编写的化工原理系列教材,是在新世纪网络课程建设工程项目教材《化工原理及实验》(贾绍义主编)的基础上修订而成的。根据教学要求,将化工原理部分及化工原理实验部分分开编写。本书重点介绍化工单元操作的基本原理与工艺计算、设备的主要型式与选择等,内容包括流体流动、流体输送机械、非均相混合物的分离及固体流态化、传热与蒸发、蒸馏、气体吸收、气液传质设备、液-液萃取、固体物料的干燥,以及膜分离与结晶过程简介等。每章均有学习指导,并编入较多的例题、习题与思考题。

本书可作为高等院校化工、石油、生物、制药、食品、材料和环境等有关专业使用,亦可供有关部门从事科研、设计及生产管理的工程科技人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 贾绍义, 柴诚敬主编. -- 2版. -- 北京: 高等教育出版社, 2013. 4

ISBN 978-7-04-036977-9

I. ①化… II. ①贾… ②柴… III. ①化工原理—高等学校—教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第032061号

策划编辑 刘佳  
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 刘佳  
责任校对 孟玲

封面设计 李小璐  
责任印制 尤静

版式设计 杜微言

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 化学工业出版社印刷厂  
开本 787mm × 1092mm 1/16  
印张 29.25  
字数 720千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版 次 2004年6月第1版  
2013年4月第2版  
印 次 2013年4月第1次印刷  
定 价 39.40元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换  
版权所有 侵权必究  
物料号 36977-00

# 前 言

本书是在新世纪网络课程建设工程项目教材《化工原理及实验》的基础上重新编写的。在本书的编写过程中,汲取了我校多年来教学改革的经验,并汲取了我校编写的《化工原理》、《化工流体流动与传热》和《化工传质与分离过程》等普通高等教育“十一五”国家级规划教材的优点,增加了工程案例,力求在内容、体系上有新意,将新的单元操作过程和新的化工技术引入课程,体现课程的最新发展;力求符合科学发展和认识规律,由浅入深,循序渐进,引导思维,便于理解和自学;力求突出应用型人才的培养,例题和习题结合生产实际与工程应用。

在本书的编写过程中,注重保留了原《化工原理及实验》教材的特点。以知识点为线索进行编写,各知识点相互独立,又有机结合,可满足不同层次学生的学习需要,适应性强。在每章开篇有具体的学习指导,以便于学生掌握重点、难点,有针对性地进行自学;在每章篇末有思考题,供学生在学完本章内容后进行思考,加深对所学内容的理解。

参加本书编写的人员及分工如下:

主 编	贾绍义 柴诚敬	
分 工	绪 论	柴诚敬
	第一章 流体流动	柴诚敬
	第二章 流体输送机械	尹晓红
	第三章 非均相混合物的分离及固体流态化	王 军
	第四章 传热与蒸发	王 军
	第五章 蒸馏	李春利
	第六章 气体吸收	贾绍义
	第七章 气液传质设备	贾绍义
	第八章 液-液萃取	马红钦
	第九章 固体物料的干燥	马红钦
	第十章 膜分离与结晶过程简介	马红钦
	附 录	贾绍义

本书除作为化工原理课程的教材外,亦可供有关部门从事科研、设计及生产管理的工程科技人员参考。

由于编者的水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者  
2013年1月

# 目 录

绪论 .....	1	阻力 .....	33
知识点 0-1 课程介绍及单位制简介 .....	1	一、流动阻力的形成与分类 .....	33
一、化工原理课程研究内容及研究方法 .....	1	二、流体在直管中的流动阻力 .....	34
二、化工原理课程特点及学习要求 .....	3	三、管路上的局部阻力 .....	42
三、单位制简介 .....	3	四、管路系统中的总能量损失 .....	44
思考题 .....	4	知识点 1-6 管路计算 .....	46
第一章 流体流动 .....	5	一、简单管路计算 .....	46
学习指导 .....	5	二、复杂管路计算 .....	48
知识点 1-1 概述 .....	6	三、可压缩流体管路计算 .....	50
一、流体的分类和特征 .....	6	知识点 1-7 流量测量 .....	51
二、流体的密度和黏度 .....	7	一、差压式流量计 .....	52
三、作用在流体上的力 .....	9	二、截面流量计——转子流量计 .....	57
知识点 1-2 流体静力学 .....	10	习题 .....	58
一、流体的静压力 .....	10	思考题 .....	63
二、流体静力学基本方程 .....	11	本章符号说明 .....	65
三、流体静力学基本方程的应用举例 .....	12	第二章 流体输送机械 .....	67
知识点 1-3 流体在管内的流动 .....	17	学习指导 .....	67
一、流体流动的考察方法 .....	18	知识点 2-1 概述 .....	67
二、流体流动体系的分类 .....	18	一、管路对流体输送机械的基本要求 .....	67
三、流量和平均流速 .....	19	二、输送机械的分类 .....	67
四、流动类型与雷诺数 .....	21	知识点 2-2 离心泵的工作原理及性能参数 .....	68
五、边界层的概念 .....	24	一、离心泵的基本结构和工作原理 .....	68
知识点 1-4 流体流动的基本方程 .....	26	二、离心泵的基本方程——能量方程 .....	70
一、物料衡算方程——连续性方程 .....	26	三、离心泵的性能参数与特性曲线 .....	74
二、能量衡算方程——伯努利方程 .....	27	知识点 2-3 离心泵在管路中的运行 .....	79
三、基本方程的应用举例 .....	29	一、离心泵的安装高度 .....	79
知识点 1-5 流体在直管内的流动		二、离心泵的工作点和流量调节 .....	81



三、离心泵的类型与选择 .....	87	二、流化床的流体力学特性 .....	156
知识点 2-4 其他流体输送机械 .....	90	三、气力输送简介 .....	162
一、其他流体输送机械的分类及主要特点 .....	90	习题 .....	163
二、其他液体输送机械 .....	91	思考题 .....	165
三、气体输送机械 .....	94	本章符号说明 .....	166
习题 .....	102	<b>第四章 传热与蒸发 .....</b>	<b>168</b>
思考题 .....	104	学习指导 .....	168
本章符号说明 .....	105	知识点 4-1 传热过程概述 .....	169
<b>第三章 非均相混合物的分离及固体流态化 .....</b>	<b>107</b>	一、传热的基本方式 .....	169
学习指导 .....	107	二、传热过程中冷热流体(接触)热交换方式 .....	170
知识点 3-1 概述 .....	107	三、典型的间壁式换热器 .....	170
一、混合物的分类 .....	107	四、载热体及其选择 .....	171
二、非均相混合物分离方法的分类 .....	108	知识点 4-2 热传导 .....	172
三、非均相混合物分离的目的 .....	108	一、基本概念和傅里叶定律 .....	172
知识点 3-2 颗粒及颗粒床层的特性 .....	109	二、导热系数 .....	173
一、单一颗粒的特性 .....	109	三、平壁的热传导 .....	174
二、颗粒群的特性 .....	110	四、圆筒壁的热传导 .....	177
三、颗粒床层的特性 .....	111	知识点 4-3 对流传热 .....	179
四、流体通过固定床流动的压力降 .....	112	一、对流传热速率方程和对流传热系数 .....	179
知识点 3-3 沉降分离 .....	115	二、对流传热机理 .....	181
一、重力沉降分离 .....	115	三、影响对流传热系数的因素 .....	182
二、离心沉降分离 .....	126	四、对流传热系数的计算 .....	183
知识点 3-4 过滤分离 .....	135	知识点 4-4 辐射传热 .....	194
一、过滤操作的原理 .....	135	一、基本概念和定律 .....	195
二、过滤的基本方程 .....	137	二、普朗克定律、斯特藩-玻耳兹曼定律及克希霍夫定律 .....	196
三、恒压过滤 .....	141	三、两固体间的辐射传热 .....	197
四、恒速过滤与先恒速后恒压的过滤 .....	143	四、对流和辐射联合传热 .....	200
五、过滤设备 .....	146	知识点 4-5 传热过程计算 .....	201
六、滤饼的洗涤 .....	149	一、能量衡算 .....	201
七、过滤机的生产能力 .....	151	二、总传热速率微分方程和总传热系数 .....	202
知识点 3-5 固体流态化简介 .....	154	三、平均温度差法 .....	207
一、固体流态化的基本概念 .....	155	知识点 4-6 换热器 .....	211
		一、间壁式换热器的结构型式 .....	212

二、换热器传热过程的强化 .....	218	知识点 5-6 两组分连续精馏的计算(III):	
三、管壳式换热器的设计原则与		回流比的影响与简捷法求	
选型 .....	219	理论板层数 .....	273
知识点 4-7 蒸发 .....	223	一、回流比的影响及其选择 .....	273
一、蒸发过程概述 .....	223	二、简捷法求理论板层数 .....	277
二、蒸发设备 .....	224	知识点 5-7 两组分连续精馏的计算(IV):	
三、单效蒸发 .....	229	塔高、塔径的计算与连续精	
四、多效蒸发 .....	240	馏装置的热量衡算 .....	279
习题 .....	243	一、塔高和塔径的计算 .....	279
思考题 .....	245	二、连续精馏装置的热量衡算 .....	282
本章符号说明 .....	246	知识点 5-8 间歇精馏与特殊精馏 .....	284
<b>第五章 蒸馏</b> .....	248	一、间歇精馏 .....	284
学习指导 .....	248	二、特殊精馏 .....	287
知识点 5-1 蒸馏过程概述与气液平衡		习题 .....	289
关系 .....	248	思考题 .....	291
一、蒸馏过程概述 .....	248	本章符号说明 .....	292
二、蒸馏过程的气液平衡关系 .....	250	<b>第六章 气体吸收</b> .....	294
知识点 5-2 平衡蒸馏与简单蒸馏 .....	255	学习指导 .....	294
一、平衡蒸馏 .....	256	知识点 6-1 概述 .....	294
二、简单蒸馏 .....	257	一、气体吸收的原理与流程 .....	294
知识点 5-3 精馏原理和流程 .....	259	二、气体吸收的工业应用 .....	295
一、精馏过程原理 .....	259	三、气体吸收的分类 .....	296
二、精馏操作流程 .....	260	四、吸收剂的选择 .....	296
知识点 5-4 两组分连续精馏的计算(I):		知识点 6-2 吸收过程的气液平衡	
物料衡算与进料热状况的		关系 .....	297
影响 .....	261	一、气体在液体中的溶解度 .....	297
一、计算的基本假定 .....	261	二、亨利定律 .....	298
二、物料衡算与操作线方程 .....	262	知识点 6-3 传质机理 .....	302
三、进料热状况对操作线方程的		一、分子传质(扩散) .....	302
影响 .....	264	二、对流传质 .....	308
知识点 5-5 两组分连续精馏的计算(II):		知识点 6-4 吸收速率 .....	309
理论板层数的计算 .....	268	一、吸收过程的机理 .....	309
一、逐板计算法 .....	268	二、吸收速率方程式 .....	310
二、图解法 .....	269	知识点 6-5 低组成气体吸收的计算 .....	315
三、适宜的进料位置 .....	271	一、物料衡算与操作线方程 .....	315
四、关于理论板层数计算的几种特		二、吸收剂用量的确定 .....	317
殊情况 .....	271	三、塔径的计算 .....	319

四、吸收塔有效高度的计算 .....	319	二、多级错流萃取的计算 .....	362
知识点 6-6 吸收系数 .....	327	三、多级逆流萃取的计算 .....	367
一、吸收系数的测定 .....	328	四、微分接触逆流萃取的计算 .....	367
二、吸收系数的经验公式 .....	328	知识点 8-3 液-液萃取设备 .....	369
三、吸收系数的量纲为 1 数群关 联式 .....	329	一、萃取设备的主要类型 .....	369
知识点 6-7 解吸(脱吸) .....	329	二、萃取设备的选择 .....	375
一、解吸方法 .....	329	习题 .....	376
二、气提解吸的计算 .....	330	思考题 .....	378
习题 .....	331	本章符号说明 .....	378
思考题 .....	332	<b>第九章 固体物料的干燥</b> .....	380
本章符号说明 .....	332	学习指导 .....	380
<b>第七章 气液传质设备</b> .....	334	知识点 9-1 湿空气的性质及湿度图 .....	380
学习指导 .....	334	一、湿空气的性质 .....	380
知识点 7-1 板式塔 .....	334	二、湿空气的 $H-I$ 图 .....	384
一、板式塔的结构 .....	334	知识点 9-2 干燥过程的物料衡算与 热量衡算 .....	389
二、塔板的类型 .....	335	一、物料湿含量的表示方法 .....	389
三、板式塔的流体力学性能 .....	337	二、干燥系统的物料衡算 .....	390
知识点 7-2 填料塔 .....	341	三、干燥系统的热量衡算 .....	391
一、填料塔的结构与特点 .....	341	四、空气通过干燥器时的状态 变化 .....	393
二、填料的类型 .....	342	知识点 9-3 干燥过程的平衡关系与 速率关系 .....	398
三、填料的性能评价 .....	344	一、物料中的水分 .....	398
四、填料塔的流体力学性能 .....	345	二、干燥时间的计算 .....	399
五、填料的选择 .....	347	知识点 9-4 干燥器 .....	404
习题 .....	349	一、干燥器的主要类型 .....	404
思考题 .....	349	二、干燥器的选型 .....	412
本章符号说明 .....	349	习题 .....	412
<b>第八章 液-液萃取</b> .....	351	思考题 .....	413
学习指导 .....	351	本章符号说明 .....	414
知识点 8-1 萃取操作原理及液-液相 平衡 .....	351	<b>第十章 膜分离与结晶过程简介</b> .....	416
一、萃取操作的原理 .....	351	学习指导 .....	416
二、液-液相平衡 .....	352	知识点 10-1 膜分离 .....	416
三、萃取剂的选择 .....	357	一、概述 .....	416
知识点 8-2 液-液萃取过程的计算 .....	360	二、膜材料与分离膜 .....	417
一、单级萃取的计算 .....	360		



三、膜组件 .....	418	九、常用固体材料的密度和 比热容 .....	440
知识点 10-2 结晶 .....	420	十、壁面污垢热阻(污垢系数) .....	441
一、结晶的基本原理 .....	420	十一、无机盐水溶液的沸点 (101.3 kPa) .....	442
二、工业结晶方法与设备 .....	424	十二、离心泵规格(摘录) .....	443
附录 .....	427	十三、4—72 型离心通风机规格 (摘录) .....	446
一、常用单位的换算 .....	427	十四、低压流体输送用焊接钢管 尺寸与质量(摘自 GB/T 3092—1993) .....	447
二、某些气体的重要物理性质 .....	430	十五、管壳式换热器系列标准 (摘录) .....	448
三、某些液体的重要物理性质 .....	431	十六、管壳式换热器总传热系数 $K$ 的推荐值 .....	453
四、干空气的物理性质 (101.3 kPa) .....	433	<b>主要参考资料</b> .....	455
五、水的物理性质 .....	434		
六、饱和水蒸气压表 (以压力为准,单位 kPa) .....	435		
七、某些液体的导热系数 (热导率) .....	436		
八、某些固体材料的导热系数 (热导率) .....	438		

# 绪 论

## 知识点 0-1 课程介绍及单位制简介

### 一、化工原理课程研究内容及研究方法

化工原理课程是化工类及相近专业(包括生物、制药、石油、石油化工、轻工食品、日化、环境、冶金、材料等)重要的技术基础课。它承担着工程科学与工程技术双重的教育任务。

#### (一) 化工生产过程与单元操作

对原料进行化学与物理加工获得有用产品的过程称为化工生产过程,又称化学工业。例如用乙烯生产高压聚乙烯需经过气体压缩、热量交换、化学反应、分离纯化、造粒等一系列过程,其生产流程如图 0-1 所示。

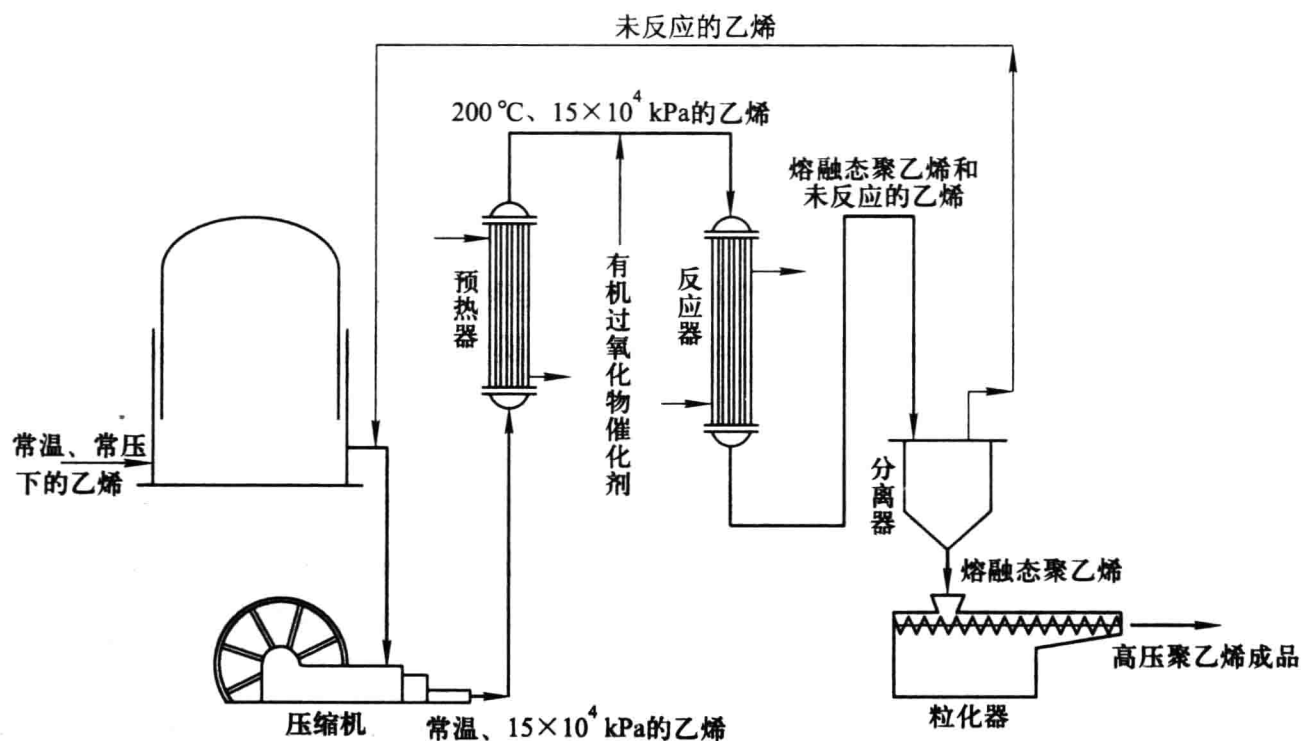


图 0-1 高压聚乙烯的生产流程示意图

综观纷杂的化工生产工艺流程都是由化学反应和物理操作有机组合而成。其中化学反应及其设备是化工生产的核心,该部分内容由“反应工程”课程来研究。物理操作过程起到为化学反应准备必要条件以及将反应物分离提纯而获得最终产品的作用。这些物理操作统称为化工单元操作,简称单元操作。化工原理是研究各单元操作过程的原理、计算和应用,以及其共性的课程。

1923 年美国麻省理工学院的著名教授华克尔 W H 等人编写出版的第一部关于单元操作的

著作——《化工原理》，奠定了化学工程作为一门独立工程学科的基础，完成了从化工生产工艺到单元操作的发展，推进了认识上的一个飞跃。

20世纪60年代“三传一反”概念的提出，开辟了化学工程发展过程的第二个历程。计算机应用的快速发展，使化学工程成为更完整的体系，并推向了“过程优化集成”、“分子模拟”的新阶段。随着科学技术的高速发展，化学工程与相邻学科相融合逐渐形成了若干新的分支与生长点，诸如：生物化学工程、分子化学工程、环境化学工程、能源化学工程、计算化学工程、软化学工程、微电子化学工程等。上述新兴产业与学科的发展，也推动了特殊领域化学工程的进步，同时也拓宽了化工原理的研究领域。

### (二) 单元操作分类和特点

#### 1. 单元操作分类

各种单元操作根据不同的物理化学原理，采用相应的设备，达到各自的工程目的。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规律，将其划分为如下类型，即

(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、物料混合(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) 同时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(制冷)、粉体工程(粉碎、颗粒分级、流态化)等单元操作。

#### 2. 单元操作特点

(1) 单元操作讨论的只是化工生产中的物理过程。

(2) 同一单元操作在不同的化工生产中遵循相同的过程规律，但在操作条件及设备类型(或结构)方面会有很大差别。

(3) 对同样的工程目的，可采用不同的单元操作来实现。例如，一种两组分均相液体混合物中组分的分离，可采用的单元操作有精馏、萃取、结晶或膜分离，需通过综合技术经济分析做出抉择。

#### 3. 开发新的单元操作

随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色化工生产，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、提高效率或洁净无污染生产的集成化工艺(如反应精馏、反应膜分离、萃取精馏、多塔精馏系统的优化热集成等)将是未来的发展趋势。

单元操作的研究包括“过程”和“设备”两个方面的内容，故单元操作又称为化工过程和设备。化工原理是研究诸单元操作共性的课程。

“三传理论的建立”是单元操作在理论上的进一步发展和深化。传递过程是联系各单元操作的一条主线。

需要强调指出，随着生产发展和技术进步，许多单元操作中引入化学作用以强化过程，如化学吸收、反应精馏、络合萃取等，从而使过程速率提高，设备台数减少，缩短了工艺流程。

### (三) 化工原理课程的研究方法

化工原理课程是一门实践性很强的工程学科，在长期的发展过程中，形成了两种基本研究方

法,即实验研究方法和数学模型法。

#### 1. 实验研究方法(经验法)

该方法一般用量纲分析和相似论为指导,依靠实验来确定过程变量之间的关系,通过量纲为 1 数群构成的关系式来表达,是一种工程上通用的基本方法。

#### 2. 数学模型法(半经验半理论方法)

该方法是在对实际过程的机理深入分析的基础上,在抓住过程本质的前提下,做出某种合理简化,建立物理模型,进行数学描述,得出数学模型,并通过实验确定模型参数。

如果一个物理过程的影响因素较少,各参数之间的关系比较简单,能够建立数学方程并能直接求解,则称为解析法。

研究工程问题的方法论是联系各单元操作的另一条主线。

### (四) 化工过程计算的基本关系

化工过程计算可分为设计型计算和操作型计算两类,其在不同计算中的处理方法各有特点,但是不管何种计算都是以质量守恒、能量守恒、平衡关系和速率关系为基础的。上述四种基本关系将在有关章节陆续介绍。

## 二、 化工原理课程特点及学习要求

### 1. 化工原理课程特点

化工原理课程是化工类及相近专业一门重要的技术基础课,兼有“科学”与“技术”的特点,它是综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化工类型生产中各种物理过程问题的工程学科。本课程强调工程观点、定量运算、设计能力、创新能力的培养,强调理论联系实际。

本课程主要研究各单元操作的基本原理,所用的典型设备结构,工艺尺寸设计和设备的选型问题。

### 2. 学习要求

学习本课程中,要掌握科学的学习方法,紧密联系生产和科学研究实际,并注意以下几个方面能力的培养:

(1) 单元操作和设备选择的能力 根据生产工艺要求和物系特性,合理选择单元操作和设备。

(2) 工程设计能力 学习进行工艺过程计算和设备设计(或选型)。

(3) 操作和调节生产过程的能力 学习如何操作和调节生产过程,了解优化生产过程的途径。

(4) 过程开发或科学研究能力 学习如何根据物理或物理化学原理选择或开发单元操作,进而组织一个生产工艺过程。

将可能变现实,实现工程目的,这是综合创造能力的体现。

## 三、 单位制简介

任何物理量的大小都是由数字和单位联合来表达的,二者缺一不可。

### 1. 单位制

在工程和科学中,单位制有不同的分类方法。

(1) 基本单位和导出单位 一般选择几个独立的物理量(如质量、长度、时间、温度等),根据使用方便的原则规定出它们的单位,这些选择的物理量称为基本物理量,其单位称为基本单位。其他的物理量(如速度、加速度、密度等)的单位则根据其本身的物理意义,由有关基本单位组合而成。这种组合单位称为导出单位。

(2) 绝对单位制和重力单位(工程单位)制 绝对单位制以长度、质量、时间为基本物理量,力是导出物理量,其单位为导出单位,也称为米千克秒制(MKS制);重力单位制以长度、时间和力为基本物理量,质量是导出物理量,其单位为导出单位。力和质量的关系用牛顿第二运动定律相关联,即

$$F=ma \quad (0-1)$$

式中  $F$  为作用在物体上的力; $m$  为物体的质量; $a$  为物体在作用力方向上的加速度。

上述两种单位制中又有米制单位与英制单位之分。

(3) 国际单位制(SI) 1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制,称为国际单位制,其代号为SI,它是绝对单位制的引申。

由于国际单位制单位的“通用性”和“一贯性”的优点,使得它在国际上迅速得到推广。

(4) 中华人民共和国法定计量单位(简称法定计量单位) 中华人民共和国法定计量单位的内容可参阅有关书籍。本书中采用法定计量单位。在少数例题与习题中有意识地编入一些非法定计量单位,目的是让读者练习单位之间换算。

## 2. 单位换算

彼此相等而单位不同的两个同名物理量(包括单位在内)的比值称为换算因子。如1 m和100 cm的换算因子为100 cm/m。

常用物理量的单位换算关系可查附录一。

若查不到一个导出物理量的单位换算关系,则从该导出单位的基本单位换算入手,采用单位之间的换算因子与基本单位相乘或相除的方法,以消去原单位而引入新单位。

## 3. 物理量的量纲

用一定单位制的基本物理量来表示某一物理量,称为该物理量的量纲。在MKS单位制中,基本物理量质量、长度、时间、热力学温度的量纲分别用M、L、T与 $\Theta$ 表示,力的量纲为 $MLT^{-2}$ ;在重力单位制中,力为基本量,其量纲用F表示,质量的量纲则变为 $FT^2L^{-1}$ 。量纲一致的原则是量纲分析方法的基础。

## 思 考 题

1. 比较实验研究方法和数学模型的区别。
2. 何谓单位换算因子?
3. 联系各单元操作的两条主线是什么?

# 第一章 流体流动

## 学习指导

### 1. 学习目的

通过本章学习,掌握流体流动过程的基本原理、管内流动的规律,并运用这些原理和规律去分析和计算流体流动过程中的有关问题,诸如:

- (1) 流体输送:流速的选择,管径的计算,输送机械选型。
- (2) 流动参数的测量:压力、流速(流量)等。
- (3) 不互溶液体(非均相物系)的分离和分散(混合)。
- (4) 选择适宜的流体流动参数,以建立传热、传质和化学反应的最佳条件。

### 2. 学习要点

#### 重点掌握的内容

- (1) 静力学基本方程及其应用。
- (2) 连续性方程、伯努利方程的物理意义、适用条件,应用伯努利方程解题的要点和注意事项。
- (3) 管路系统总能量损失方程(包括 $\lambda$ 数据的获得)。

#### 应掌握的内容

(1) 两种流型(滞流和湍流)的本质区别,处理两种流型的工程方法(解析法和实验研究方法)。

- (2) 流量测量。
- (3) 管路计算。

#### 一般了解的内容

- (1) 边界层的基本概念(边界层的形成和发展,边界层分离)。
- (2) 牛顿流体和非牛顿流体。
- (3) 可压缩流体管路计算。

### 3. 学习中应注意的问题

(1) 流体力学是传热和传质的基础,它们之间存在着密切的联系和相似性,从开始学习流体流动就要学扎实,打好基础。

(2) 应用伯努利方程、静力学方程解题要绘图,正确选取衡算范围。解题步骤要规范。

流体是气体和液体的总称。在化工、石油、生物、制药、食品等工业中,所涉及的原料、半成品及成品多为流体。这些工业的共同特点是流体在流动过程中进行化学反应或物理加工,称之为过程工业。流体输送是这些工业中不可缺少的单元操作之一。无论是管路输送、流量测量、输送机械选择及功率计算等均与流体流动原理和规律密切相关。同时,过程工业中进行的传热、传质操作也是在流体流动状态下完成的,因此流体流动规律又是强化传热与传质的理论基础。

本章重点讨论流体流动的基本原理和规律,并运用这些原理分析计算流体输送的有关问题。



## 知识点 1-1 概述

### 一、流体的分类和特征

#### 1. 流体的分类

流体可用多种方法进行分类。

(1) 按流体的压缩性分类 在外力作用下,流体的比体积  $v$  (单位质量流体的体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ) 将可能发生变化。当作用于流体上的外力加大时,流体的比体积若较明显变小,则称该流体为可压缩流体。流体的可压缩性通常用体积压缩系数  $\beta$  来表示。其意义是在一定温度下,外力每增加一个单位时,单位质量流体体积的相对缩小量,即

$$\beta = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (1-1)$$

负号表示外界压力增大时,流体的比体积减小。显然,  $\beta$  值愈大,流体愈容易被压缩。

通常,液体的压缩系数  $\beta$  值都很小,甚至某些液体的  $\beta$  值接近于零,因而其压缩性可忽略。

由于气体的比体积  $v$  随温度和压力变化较显著,因此气体在一定条件下视为可压缩流体,而大多数液体在工程上按不可压缩流体对待。

(2) 按是否可忽略分子间作用力分类 根据是否可忽略流体分子间作用力将流体分为理想流体和黏性流体。

所谓理想流体是一种假想的不存在分子间作用力的流体。但在自然界中实际存在的所有流体,都存在着分子的热运动和分子间内聚力,因而分子间产生作用力,使流体具有黏性,称为黏性流体(或实际流体)。

引入理想流体的假设,是对我们所研究流体的简化。对于某些黏性和相对运动速度都比较小,或黏性力不是主要作用力的流体情况,按理想流体处理,可使所研究的问题得以简化,并获得足够精确的结果。

(3) 按流变特性分类 由于黏性,流体流动时产生内摩擦力(即剪切力)。单位面积上的剪切力称为剪应力,又称动量通量,用  $\tau$  表示,其单位为 Pa。

流变特性是指流体流动时的剪应力  $\tau$  与速度梯度  $\frac{du}{dy}$  (又称剪切速率)之间的关系。表示这种关系的图称为流变图,如图 1-1 所示。

根据流变特性,流体分为牛顿流体与非牛顿流体两类。

服从牛顿黏性定律的流体称为牛顿流体,如气体和大多数液体。其流变方程为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{dx/dy}{d\theta} = \mu \dot{\gamma} \quad (1-2)$$

式中,  $dx/dy$  表示剪切程度大小;  $\dot{\gamma} = \frac{dx/dy}{d\theta}$  为剪切速率,  $1/\text{s}$ ;  $\mu$  为流体的黏度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

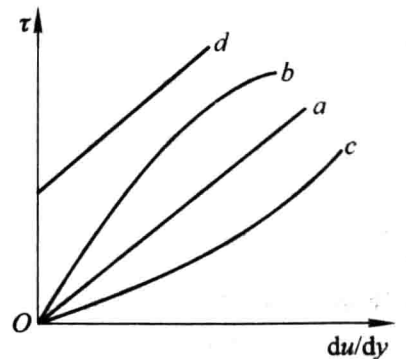
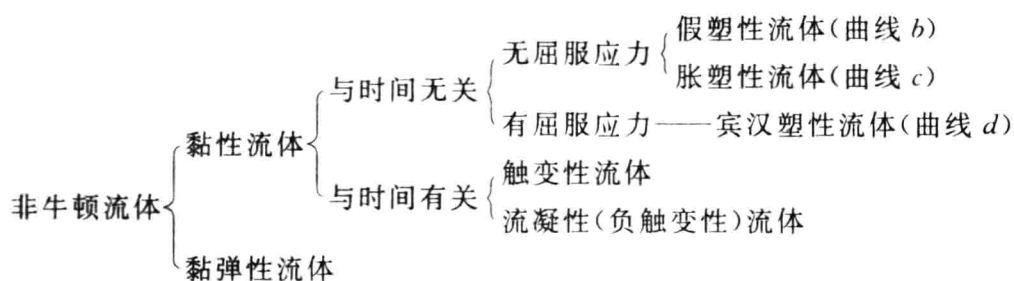


图 1-1 流体的流变图

牛顿流体的流变曲线为通过原点的直线,如图 1-1 中 *a* 线所示。凡不遵循牛顿黏性定律的流体,称为非牛顿流体。根据流变方程或流变图,非牛顿流体分类如下:



非牛顿流体与牛顿流体的流变特性有本质的区别,因此在流动阻力、传热、传质等方面必然表现出明显的差异。

本书只讨论牛顿流体。

## 2. 流体的特征

流动性是流体的基本特征,同时,由于流体分子间的距离较大,当流体受到外力作用时,易于变形(随容器形状),本身不能保持固定形状。气体能够充满整个密闭容器空间,同时伴随气体密度的变化。

和流动性相对立,由于流体黏性的存在,流体还有一种抗拒内在的向前运动的特性,产生内摩擦,从而构成了流体流动时内部结构的复杂性。

## 二、流体的密度和黏度

### 1. 连续介质假定

流体是由大量的、彼此间有一定间隙的分子所组成的,每个分子都处于杂乱无章的运动状态,从分子角度来看,流体是不连续的,运动是无规则的。但在工程技术领域,人们关心的是大量流体分子总的宏观运动特性,为此引入流体连续介质的假定。

连续介质假定是将流体视为由无数连续分布的流体质点(或微团)所组成的连续介质,表征流体物理性质和运动参数的物理量在时间和空间上是连续的分布函数。

在流体(气体)分子密度很稀薄的高真空条件下,连续介质假设将不能成立。

### 2. 流体的密度

密度是所有物质的属性。一定的流体,其密度是温度、压力和组成的函数。

(1) 定义和单位 单位体积流体所具有的流体质量称为密度,以  $\rho$  表示,单位为  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-3)$$

式中  $\rho$ ——流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$ ——流体的质量,  $\text{kg}$ ;

$V$ ——流体的体积,  $\text{m}^3$ 。

当  $\Delta V \rightarrow 0$  时,  $\Delta m / \Delta V$  的极限值称为流体内部的某点密度。

(2) 液体的密度 液体为不可压缩流体,其密度基本上不随压力而变化,随温度略有改变。常见纯液体的密度值可查本教材附录(注意所指温度)。

混合液的密度,在忽略混合体积变化条件下,以 1 kg 混合液为基准,可用下式估算,即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-4)$$

式中  $\rho_i$ ——各纯组分的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$w_i$ ——各纯组分的质量分数。

(3) 气体的密度 气体为可压缩流体,其密度随温度和压力而变。当可当作理想气体处理时,可用下式计算,即

$$\rho = \rho' \frac{p T_0}{p_0 T} \quad (1-5)$$

或

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

式中  $p$ ——气体的绝对压力, Pa;

$T$ ——热力学温度, K;

$M$ ——气体的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{kmol}$ ;

$R$ ——摩尔气体常数,其值为  $8.315 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

下标 0 表示标准状态,上标“'”表示手册中指定条件下数据。

对于混合气体,可用平均摩尔质量  $M_m$  代替  $M$ ,即

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_n y_n \quad (1-6)$$

式中  $y_i$ ——各组分的摩尔分数。

比体积是单位质量流体所具有的体积,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ,在数值上等于密度的倒数。

### 3. 流体的黏度

黏度是流体的运动属性。流体无论在静止还是流动状态下,都具有黏性,但只有在流体流动时才能显示出来。黏度数值的大小是流体黏性大小的标志。流体黏度是温度、压力和组成的函数。

(1) 动力黏度(简称黏度) 式(1-2)可表示成动力黏度的定义式,即

$$\mu = \tau \frac{du}{dy} \quad (1-2a)$$

① 黏度的物理意义 促使流体流动时产生单位速度梯度的剪应力。黏度总是和速度梯度相联系,只有在流体运动时才显示出来。在讨论流体静力学时就不考虑黏度这个因素。

#### ② 黏度的单位

法定单位制中 黏度的单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

物理单位制中 黏度的单位为  $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$ ,称为 P(泊)。

手册中黏度的单位常用 cP(厘泊)表示。不同单位之间的换算关系为

$$1 \text{ cP} = 0.01 \text{ P} = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

③ 黏度数据的获得 常用流体的黏度可从有关手册和本书附录查得。对混合物则可用相应