



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 化工原理

第三版

管国锋 赵汝溥 主编



化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 化工原理

第三版

管国锋 赵汝溥 主编



化学工业出版社

·北京·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/管国锋, 赵汝溥主编. —3 版. —北京:  
化学工业出版社, 2008.5  
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
ISBN 978-7-122-02582-1

I. 化… II. ①管…②赵… III. 化工原理-高等学  
校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 052443 号

---

责任编辑: 何 丽  
责任校对: 吴 静

文字编辑: 徐雅妮  
装帧设计: 史利平

---

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)  
印 刷: 大厂聚鑫印刷有限责任公司  
装 订: 三河市万龙印装有限公司  
787mm×1092mm 1/16 印张 30½ 字数 817 千字 2008 年 7 月北京第 3 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899  
网 址: <http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

---

定 价: 48.00 元

版权所有 违者必究

## 第三版前言

本教材是南京工业大学化工原理教研室结合国家精品课程建设，总结《化工原理》（第二版）教材使用五年来教学实践的基础上修订再版的。这次再版编者向同行及学生征询意见，认为第二版教材满足教学要求，故第三版教材在内容上保留了第二版教材的特点，只对少量文字或公式表达作了修订。为了指导学生复习，在大纲规定的各章内容介绍后，添加了“复习思考题”。

在内容已定的前提下，教材编写过程中，一方面注重优化学生的知识、能力和素质，另一方面注重如何指导学生学好本课程。在过去很长的时间里，教师往往把重点放在提高学生的计算能力上，无论是布置作业、考试或通过习题课作解题分析，大体都是围绕着解题方法开展，有忽视基本概念倾向，当时有一种说法，“概念寓于计算题中”。这说法对不对呢？编者在许多年前做过一次试验。期中考试试卷计算题占 50%，是非题占 25%，简答题占 25%。考试结果令人惊讶，计算题正确率高达 85%，是非题正确率只达到 50%，简答题往往未答中要点。此外，在一次研究生的面试中，教师请考生把管流的  $\lambda \sim \epsilon/d \sim Re$  图画出定性示意图，结果学生在黑板上乱画一通。由此使编者想起了时钧院士常讲的一句话：“教化工原理，既要注重基本概念，又要注重计算方法”。并感到，只强调计算方法是全面的，还应加强对概念的理解。

当前的全国工科化工原理题库已经在均衡概念与计算两方面跨出了一步。题库中设置了选择题、填空题、简答题等非计算类型的题型，就是加强对基本概念的考核。为了指导学生对概念的理解与掌握，编者在第三版教材中增加了“复习思考题”。有的思考题只问一个概念，不必计算，但有的思考题须经计算才能给出定量结果。这也可谓“寓计算于思考题中”，复习思考题与计算题是互补的。这些复习思考题并非各章知识点的罗列，也没有全面覆盖各章的内容，只是点出各章的重点，提醒学生注意基本概念并重视计算与分析方法。

本书由（南京工业大学）管国锋、赵汝溥主编。各章编写人员有赵汝溥——绪论、流体流动、流体输送机械、颗粒流体力学基础与机械分离、塔设备，管国锋——传热及换热器、固体干燥、吸附、附录，李新（南京林业大学）——蒸发，居沈贵（南京工业大学）——气体吸收，武文良（南京工业大学）——液体蒸馏，顾正桂、林军（南京师范大学）——液液萃取，徐南平、邢卫红（南京工业大学）——膜分离技术。同时感谢南京工业大学化工原理教研室的同事在本书修订再版工作中给予的帮助。

前言之末，令人想起几句老话：“编者智浅才疏，书中谬误之处难免，还望读者不吝赐教。”此言因常见，不免有客套之嫌，但却恰恰表达了编者的心意，故沿用之，因编者认识到，读者的宝贵意见永远是教材建设的推动力。

本书另配有习题解，有需要者可与编者联系：guangf@njut.edu.cn。

编者识

2008年3月于南京工业大学

## 第二版前言

自本书第一版问世以来，受到了许多兄弟院校同行、读者的支持和鼓励。这次再版重新编写了第1章、第2章、第3章的内容，改写了部分章节，增加了各章的习题答案，为了拓宽教材的应用领域，补充了蒸发、萃取单元操作的基本知识。此次再版既增加了教材的可读性，又补充了最新科技成果。

本书具有篇幅小、语言简练、内容少而精的特点，并且注重物理概念，注重方法论，强调在工程计算中给学生以引导。本教材应用面较广，不仅可作为化工类及相关专业（化工、石油、制药、生物工程、材料、环保、食品、机械等）的教材，而且也可供有关部门的科研、设计、过程开发及生产单位科技人员参考。

本书由（南京工业大学）管国锋、赵汝溥主编。参加编写工作的有赵汝溥（绪论、流体流动、流体输送机械、颗粒流体力学基础与机械分离、塔设备）、管国锋（传热及换热器、固体干燥、吸附、附录）、李新（南京林业大学）（蒸发）、居沈贵（南京工业大学）（气体吸收）、武文良（南京工业大学）（液体蒸馏）、顾正桂、林军（南京师范大学）（液-液萃取）、徐南平、邢卫红（南京工业大学）（膜分离技术）。

本书的编写得到了中科院资深院士时钧教授的亲切关怀和大力支持，编者在此对时先生表示深切的谢意。同时感谢南京工业大学化工原理教研室的同事在本书修订再版工作中给予的帮助。

由于水平有限，加以时间仓促，书中遗漏之处难免，还请读者不吝赐教，以使教材日臻完善。

编者  
2003年3月

# 第一版前言

《化工原理》是以单元操作为背景的一门课程，是化工及其相近专业的一门主课。学习此课程对单元操作设备设计、设备运转情况分析、工艺评价乃至新工艺、新设备的开发都有重要作用。

单元操作种类很多，每种单元操作都有十分丰富的内容。要在此课程的有限学时内介绍单元操作，只能是少而精，加强理论基础并重视方法论，即通过对若干典型单元操作的介绍，阐明针对不同性质的问题如何选用有效地分析问题的方法。此外，根据此课程特点，还应重视设备与运行以及工程运算能力的训练。

当时国内已有多种版本的《化工原理》教材，而且各具特色。本书力求在汲取各家之长的基础上，融入自己的教学心得，写出自己的风格。但是，不仅由于编者学识水平限制，而且也因付稿仓促，书中肯定有错误疏漏之处。编者恳请专家、读者予以赐正，以便再版时订正。

本书由赵汝溥主编。书中第四、八、九章由管国锋执笔，第十章由徐南平执笔，第五章由赵汝溥、管国锋共同完成，其余均由赵汝溥执笔。

编者对本书编写过程中给予热情帮助的南京化工大学姚虎卿、徐南平、董谊英、刘天琳、杨培怡、朱辉、武文良、夏毅和许诚洁等同志表示衷心感谢。化学工业出版社张红兵、徐世峰、徐力生同志对本书出版给予了大力协助，在此一并致以深切的谢意。

编者识  
1995年6月

# 目 录

绪论	1
习题	5
复习思考题	5
<b>第 1 章 流体流动</b>	<b>7</b>
1.1 概述	7
1.1.1 流体及其特征	7
1.1.2 连续介质模型	7
1.1.3 流体力学与流体流动	7
1.2 流体静力学	8
1.2.1 流体静压强	8
1.2.2 流体密度	9
1.2.3 流体静力学基本方程	9
1.2.4 U形压差计	11
1.3 流体流动的基本概念	13
1.3.1 流体在流道中的流量与流速	13
1.3.2 定态与非定态流动	13
1.3.3 流线	14
1.3.4 流体黏度	14
1.3.5 流动型态	16
1.3.6 流体在圆直管内流动的流速 侧形与流动阻力	18
1.4 流体流动过程的物料衡算与机械能 衡算	19
1.4.1 连续性方程	19
1.4.2 理想流体流动的机械能守恒	19
1.4.3 真实流体流动的机械能守恒	23
1.5 圆直管内流体层流时的流速分布与 阻力计算	25
1.6 圆直管内湍流的流速分布与阻力 计算	27
1.6.1 涡流黏度与圆直管内湍流的流速 分布	27
1.6.2 流体沿壁流动的速度边界层	28
1.6.3 量纲分析方法	29
1.6.4 摩擦系数图	32
1.6.5 流体沿程阻力计算	33
1.6.6 局部阻力计算	34
1.6.7 流体流过非圆形截面管道的阻力 计算	36
1.7 管路计算	37
1.7.1 管路的分类和管路计算图表	37
1.7.2 简单管路计算	40
1.7.3 并联管路计算	43
1.7.4 分支管路计算	44
1.7.5 变密度流体的简单管路计算	45
1.8 流速与流量测定	47
1.8.1 毕托管	47
1.8.2 文丘里流量计	48
1.8.3 孔板流量计	49
1.8.4 转子流量计	50
本章主要符号	51
习题	52
复习思考题	57
<b>第 2 章 流体输送机械</b>	<b>62</b>
2.1 概述	62
2.1.1 流体输送机械的作用	62
2.1.2 离心泵与离心式风机简介	62
2.1.3 离心力场中流体修正压强的分布 规律	63
2.2 离心泵操作性能的基本方程	65
2.2.1 速度三角形	65
2.2.2 欧拉方程	66
2.3 实际离心泵的性能曲线	67
2.3.1 离心泵操作性能参量	67
2.3.2 离心泵的各项效率分析	68
2.3.3 各种叶片类型离心泵的操作性能 比较	69
2.3.4 实测的离心泵性能曲线	70
2.3.5 转速改变或叶轮切削对离心泵 性能曲线的影响	70
2.3.6 液体性质对离心泵特性的影响	72
2.4 离心泵的操作	72

2.4.1	灌泵及对吸入管路的要求	72	2.7.2	离心式风机主要性能参量与性能曲线	81
2.4.2	离心泵的工作点	72	2.7.3	离心式风机选型计算	82
2.4.3	离心泵的串联操作	74	2.8	其他类型的泵与风机	84
2.4.4	离心泵的并联操作	74	2.8.1	往复泵	84
2.5	离心泵的安装高度限制	76	2.8.2	隔膜泵	86
2.5.1	离心泵的安装高度问题	76	2.8.3	齿轮泵	86
2.5.2	气蚀现象	76	2.8.4	旋涡泵	86
2.5.3	离心泵正常操作必须满足的条件	76	2.8.5	罗茨鼓风机	87
2.5.4	离心泵最大安装高度计算	77	2.8.6	纳氏泵	87
2.6	离心泵的类型与选型	78	2.8.7	水环真空泵	87
2.6.1	离心泵的类型	78	2.8.8	喷射泵	88
2.6.2	离心泵的选型	80	本章主要符号	88	
2.7	离心式风机	81	习题	89	
2.7.1	使用风机的目的及离心式风机的分类	81	复习思考题	91	
<b>第3章 颗粒流体力学基础与机械分离</b> 94					
3.1	固体颗粒的几何特性与筛分分析	94	3.3.7	过滤常量的测定	108
3.1.1	单颗粒的几何特性	94	3.3.8	先恒速后恒压过滤	110
3.1.2	筛分分析与颗粒群的几何特性	95	3.3.9	连续式过滤设备	111
3.2	流体通过固定床层的流动	99	3.3.10	过滤操作的改进	113
3.2.1	固定床结构的一维简化模型	99	3.4	颗粒沉降与沉降分离设备	114
3.2.2	数学模型中模型参数的估值	100	3.4.1	重力沉降速度	114
3.3	悬浮液滤饼过滤	100	3.4.2	重力沉降室	118
3.3.1	悬浮液滤饼过滤的操作特点	100	3.4.3	离心沉降速度	119
3.3.2	悬浮液滤饼过滤的物料衡算	101	3.4.4	旋风分离器	120
3.3.3	过滤速率基本方程式	102	3.5	固体流态化	125
3.3.4	间歇式过滤设备	103	3.5.1	固体流态化现象	125
3.3.5	叶滤机的过滤、洗涤过程计算和最大产率问题	105	3.5.2	固体流态化的流体力学特性	127
3.3.6	板框式压滤机的过滤、洗涤过程计算和最大产率问题	107	本章主要符号	130	
			习题	131	
			复习思考题	133	
<b>第4章 传热及换热器</b> 136					
4.1	概述	136	4.2.5	圆筒壁的热传导	142
4.1.1	传热在化工生产中的应用	136	4.3	对流传热概述	144
4.1.2	加热介质与冷却介质	136	4.3.1	给热和给热的类型	144
4.1.3	传热的基本方式	136	4.3.2	给热速率与给热系数	145
4.1.4	冷、热流体热交换形式	137	4.4	无相变流体的给热	146
4.1.5	传热速率与热通量	138	4.4.1	影响给热的因素	146
4.1.6	定态传热与非定态传热	138	4.4.2	温度边界层	146
4.2	热传导	138	4.4.3	与给热有关的特征数及特征数关联式的确定方法	147
4.2.1	热传导的基本概念	138	4.4.4	流体在管内强制对流给热	149
4.2.2	傅里叶定律	139	4.4.5	流体在管外强制对流给热	152
4.2.3	热导率	139	4.4.6	大空间自然对流给热	154
4.2.4	平壁的热传导	140			



4.5 有相变流体的给热 .....	155	4.7.3 传热系数 .....	169
4.5.1 蒸汽冷凝给热 .....	155	4.7.4 换热器的平均温度差 .....	171
4.5.2 液体沸腾给热 .....	159	4.7.5 传热效率法 .....	176
4.6 辐射传热 .....	161	4.8 换热器 .....	180
4.6.1 辐射传热的基本概念与定律 .....	161	4.8.1 间壁式换热器 .....	180
4.6.2 固体壁面间的辐射传热 .....	164	4.8.2 换热器传热过程的强化 .....	186
4.6.3 对流与辐射并联传热 .....	167	4.8.3 列管式换热器设计与选型原则 .....	186
4.7 串联传热过程计算 .....	167	本章主要符号 .....	193
4.7.1 传热速率方程 .....	168	习题 .....	193
4.7.2 热量衡算 .....	168	复习思考题 .....	197
<b>第5章 蒸发</b> .....	200		
5.1 蒸发设备 .....	201	5.4 蒸发器生产能力和生产强度 .....	221
5.1.1 蒸发器 .....	201	5.4.1 生产能力 .....	221
5.1.2 蒸发辅助设备 .....	204	5.4.2 生产强度 .....	222
5.2 单效蒸发 .....	206	5.4.3 提高生产强度的途径 .....	222
5.2.1 溶液沸点和温度差损失 .....	206	5.5 蒸发操作的其他节能措施 .....	223
5.2.2 单效蒸发的计算 .....	207	5.5.1 额外蒸汽引出 .....	223
5.3 多效蒸发 .....	211	5.5.2 二次蒸汽的再压缩 .....	223
5.3.1 多效蒸发操作流程 .....	211	5.5.3 冷凝水热量的利用 .....	224
5.3.2 多效蒸发的计算 .....	212	本章主要符号 .....	224
5.3.3 多效蒸发效数的限制 .....	221	习题 .....	224
<b>第6章 气体吸收</b> .....	226		
6.1 概述 .....	226	计算 .....	241
6.1.1 吸收与传质 .....	226	6.5.1 填料塔简介 .....	242
6.1.2 物理吸收与化学吸收 .....	226	6.5.2 低浓度气体吸收的特点 .....	242
6.1.3 吸收与解吸 .....	227	6.5.3 物料衡算——操作线方程 .....	242
6.1.4 溶剂的选择 .....	227	6.5.4 填料层高度的计算式 .....	242
6.2 气液相平衡 .....	227	6.5.5 传质单元高度的计算 .....	244
6.2.1 平衡溶解度图 .....	227	6.5.6 传质单元数的计算 .....	245
6.2.2 过程方向判断与过程推动力 .....	230	6.5.7 填料吸收塔的设计型计算 .....	247
6.3 分子扩散 .....	231	6.5.8 填料吸收塔的操作型计算 .....	251
6.3.1 分子扩散速率——费克定律 .....	231	6.5.9 其他吸收流程 .....	253
6.3.2 分子扩散传质速率 .....	231	6.6 气体解吸 .....	255
6.3.3 组分在气相中的分子扩散系数 .....	235	6.6.1 气体解吸的特点与常用的解吸 .....	255
6.3.4 组分在液相中的分子扩散系数 .....	236	方法 .....	255
6.4 对流传质 .....	237	6.6.2 逆流气体解吸塔的计算 .....	255
6.4.1 吸收过程中溶质气体由气相 .....	237	6.7 高浓度气体吸收 .....	255
转移到液相的过程 .....	237	6.7.1 高浓度气体吸收的特点 .....	255
6.4.2 吸收机理模型 .....	237	6.7.2 高浓度气体吸收过程计算 .....	256
6.4.3 对流传质速率 .....	239	本章主要符号 .....	258
6.4.4 总传质系数 .....	240	习题 .....	259
6.5 在填料塔中低浓度气体吸收过程的 .....	241	复习思考题 .....	261
<b>第7章 液体蒸馏</b> .....	264		
7.1 概述 .....	264	7.1.1 蒸馏原理与蒸馏操作 .....	264

7.1.2 闪蒸 .....	265	7.5 双组分间歇精馏 .....	294
7.2 双组分物系的气液相平衡 .....	266	7.5.1 间歇精馏过程特点 .....	294
7.2.1 理想物系的气液相平衡 .....	266	7.5.2 $x_D$ 恒定的间歇精馏 .....	294
7.2.2 非理想物系的气液相平衡 .....	270	7.5.3 $R$ 恒定的间歇精馏 .....	296
7.3 双组分简单蒸馏 .....	272	7.6 特殊精馏 .....	297
7.4 双组分液体连续精馏 .....	273	7.6.1 萃取精馏 .....	297
7.4.1 精馏原理与过程分析 .....	273	7.6.2 恒沸精馏 .....	298
7.4.2 基本型连续精馏塔的设计型 计算 .....	280	7.6.3 反应精馏 .....	299
7.4.3 基本型连续精馏塔的操作型 计算 .....	287	7.6.4 分子蒸馏 .....	300
7.4.4 其他类型的连续精馏 .....	289	本章主要符号 .....	303
		习题 .....	303
		复习思考题 .....	306
<b>第 8 章 塔设备</b> .....			
8.1 填料塔 .....	309	8.3.3 筛板塔的设计 .....	334
8.1.1 填料塔简介 .....	309	8.4 浮阀塔 .....	337
8.1.2 填料的种类与特性 .....	310	8.4.1 浮阀塔的结构 .....	337
8.1.3 填料层内气液逆流的流体力学 特性 .....	314	8.4.2 浮阀塔正常操作的气液流量 范围 .....	337
8.1.4 填料层内的气液传质 .....	317	8.5 塔板效率 .....	339
8.1.5 填料塔的附属设备 .....	321	8.5.1 塔板效率的不同表示方法及其 应用 .....	339
8.2 板式塔综述 .....	323	8.5.2 提高塔器操作传质效果须注意 的问题 .....	340
8.2.1 板式塔的气液流动类型 .....	323	8.5.3 总板效率的经验图线 .....	341
8.2.2 几种主要板式塔型简介 .....	323	本章主要符号 .....	342
8.3 筛板塔 .....	325	习题 .....	342
8.3.1 筛板塔的结构 .....	325	复习思考题 .....	343
8.3.2 筛板塔正常操作的气液流量 范围 .....	328		
<b>第 9 章 液液萃取</b> .....			
9.1 概述 .....	344	9.3.3 多级逆流萃取 .....	353
9.1.1 液液萃取原理 .....	344	9.3.4 连续接触逆流萃取 .....	356
9.1.2 工业萃取过程 .....	344	9.4 萃取设备 .....	357
9.1.3 萃取过程的经济性 .....	345	9.4.1 常用萃取设备 .....	358
9.2 液液相平衡原理 .....	345	9.4.2 萃取设备的选择 .....	362
9.2.1 三角形相图 .....	345	9.5 萃取过程的新进展 .....	364
9.2.2 三角形相图在单级萃取中的 应用 .....	348	9.5.1 超临界流体萃取 .....	364
9.3 萃取过程计算 .....	350	9.5.2 反胶束萃取 .....	365
9.3.1 萃取级内过程的数学描述 .....	350	9.5.3 双水相萃取 .....	365
9.3.2 多级错流萃取 .....	351	本章主要符号 .....	367
		习题 .....	367
<b>第 10 章 固体干燥</b> .....			
10.1 湿空气的性质和湿度图 .....	370	10.2.1 物料衡算 .....	377
10.1.1 湿空气的性质 .....	370	10.2.2 热量衡算 .....	378
10.1.2 湿空气的 $I-H$ 图及其应用 .....	374	10.2.3 干燥器出口空气状态的确定 .....	379
10.2 干燥过程的物料衡算和热量衡算 .....	377	10.2.4 干燥器的热效率和干燥效率 .....	381

10.3 干燥速率和干燥时间 .....	383	10.4.1 干燥器的主要型式 .....	390
10.3.1 物料中所含水分的性质 .....	383	10.4.2 干燥器设计原则与举例 .....	395
10.3.2 干燥速率及其影响因素 .....	384	本章主要符号 .....	399
10.3.3 恒定干燥条件下干燥时间的 计算 .....	388	习题 .....	400
10.4 干燥器 .....	389	复习思考题 .....	402
<b>第 11 章 吸附</b> .....	<b>404</b>		
11.1 概述 .....	404	11.3.1 吸附机理 .....	410
11.1.1 吸附现象及其工业应用 .....	404	11.3.2 吸附速率 .....	410
11.1.2 常用吸附剂 .....	405	11.3.3 吸附的传质速率方程 .....	410
11.2 吸附平衡 .....	406	11.4 吸附设备与吸附过程计算 .....	411
11.2.1 吸附等温线 .....	406	11.4.1 固定床吸附器与固定床吸附 过程计算 .....	411
11.2.2 单一气体(或蒸汽)的吸附 平衡 .....	408	11.4.2 移动床吸附器与移动床吸附 过程计算 .....	416
11.2.3 液相吸附平衡 .....	409	本章主要符号 .....	418
11.3 吸附机理和吸附速率 .....	410		
<b>第 12 章 膜分离技术</b> .....	<b>420</b>		
12.1 概述 .....	420	12.3.3 应用 .....	432
12.1.1 膜的概念 .....	420	12.4 电渗析 .....	433
12.1.2 膜分离技术发展简史 .....	420	12.4.1 电渗析原理 .....	433
12.1.3 各种膜分离过程简介 .....	421	12.4.2 离子交换膜及其性质 .....	434
12.1.4 膜分离设备 .....	422	12.4.3 电渗析设备与操作 .....	435
12.2 反渗透 .....	423	12.4.4 电渗析的应用 .....	437
12.2.1 反渗透过程 .....	423	12.5 其他膜过程 .....	439
12.2.2 反渗透过程的操作 .....	427	12.5.1 气体膜分离 .....	439
12.2.3 反渗透的应用 .....	429	12.5.2 渗透汽化 .....	439
12.3 超滤和微滤 .....	430	12.5.3 液膜分离技术 .....	441
12.3.1 过程原理 .....	430	本章主要符号 .....	442
12.3.2 过程与操作 .....	430		
<b>附录</b> .....	<b>444</b>		
1. 单位换算 .....	444	12. 蒸发潜热(汽化热) .....	459
2. 水的物理性质 .....	447	13. 气体黏度共线图(常压下用) .....	460
3. 水在不同温度下的黏度 .....	448	14. 101.3kPa 压强下气体的比热容 .....	461
4. 干空气的物理性质( $p=101.3\text{kPa}$ ) .....	449	15. 某些液体的热导率 .....	462
5. 饱和水蒸气(以温度为准) .....	450	16. 某些固体物质的黑度 .....	463
6. 饱和水蒸气(以压强为准) .....	451	17. 某些固体材料的热导率 .....	464
7. 某些无机物水溶液的表面张力 $\sigma \times 10^3 / (\text{N/m})$ .....	451	18. 常用固体材料的密度和比热容 .....	465
8. 某些有机液体的相对密度(液体密度与 4℃水的密度之比) .....	452	19. 某些气体溶于水的亨利系数 .....	466
9. 有机液体的表面张力共线图 .....	453	20. 某些二元物系的汽液平衡组成 .....	466
10. 液体黏度共线图 .....	455	21. 管子规格 .....	467
11. 液体的比热容 .....	457	22. IS 型离心泵性能表 .....	469
		23. 管壳式热交换器系列标准(摘录) .....	473
		24. 标准筛目 .....	474
<b>参考文献</b> .....	<b>475</b>		

# 绪 论

## 化工原理课程

化工原理这一课程名称是从美国麻省理工学院的 3 位教授 W. H. Walker, W. K. Lewis 和 W. H. McAdams 于 1913 年合著的“Principles of Chemical Engineering”的书名直译过来的,该书是世界上第 1 本化工原理教材。

麻省理工学院开设这门课程的原意是让化学系学生在学习完化学课程后能在学校学习到一些化工生产实际知识,以便就业后能较快地胜任工作。实践证明,设置这门课程的效果是良好的,课程讨论的内容是符合客观需要的。之后,不仅在美国而且在世界各地的许多大学都相继开出了这门课程。

中国约在 1940 年也引入了这门课程,至今,我国自编的化工原理教材已有二三十种。这门课程不仅是当前我国化工类各专业的主干课程,也是与化工相关的许多专业的必修课程。

此课程究竟阐述的是哪些内容呢?在回答这问题之前,不妨先了解如下 3 个化工术语的涵义。

### 1. 化工生产过程

广义地说,凡工业生产的关键环节是改变物质的组成,或者说是化学反应,这类生产便归属化工生产范畴。属于化工范畴的行业是很多的,这些行业通常被划分成多种组合。有按原料路线或产品用途的不同划分的,亦有按加工性质的差异划分的。各化工行业大体被分为以“三酸两碱”为代表的基础化工、石油化工、煤化工、生物化工、制药工业、硅酸盐工业、林业化工、涂料化工、肥料化工、精细化工及塑料工业等。虽然为便于管理及相近行业的技术交流,很多行业已从化工中划分出去,但它们仍属“化工大家族”中的一员,而且彼此间在许多技术问题上仍是密切关联的。

### 2. 化工生产工艺学

凡研究某一特定化工产品生产全过程的学科称为该产品的生产工艺学。例如,研究合成氨生产过程的学科称为合成氨生产工艺学,研究硫酸生产的就叫硫酸生产工艺学等。

### 3. 单元操作与化学工程

对于任何一个化工生产过程,不难发现,虽然化学反应是核心,反应器是“心脏”,然而这部分只是生产全过程中的一个环节,在生产线的其余许多环节却往往都是物理加工过程。这些物理加工过程主要用于反应前对物料的前处理或反应后对物料(产品)的后处理。像这样的物理过程很多,如流体的输送、物料的加热或冷却、过滤、沉降、蒸发、结晶、气体的吸收、液体的蒸馏、萃取、干燥和吸附等。

早年人们对不同的化工产品的生产技术是分别研究的,没有考虑到其间相互的联系。到 19 世纪 80 年代, Davis 开始注意到了不同的化工产品生产过程中用到的物理过程之间是有联系的。1888 年, Norton 讲授机械工程与工业化学相互渗透的课程,在工业化学部分谈到物理过程时已带有超越行业、阐明共性的观念。到 20 世纪初,一个称为“单元操作”的概念已逐渐酝酿成熟。一方面,一种单元操作指的是一种物理加工过程;另一方面,单元操作含有超越行业界限,把各行业生产中同类的物理过程集中起来研究,找出共性规律,改进或

创新设备，再把共性的研究成果应用到具体的生产上去的含义。单元操作概念的提出与实践，实现了“个别→一般→个别”的认识论上的一次飞跃。虽然 A. D. Little 博士在 1915 年对单元操作做出了明确的定义，阐述了单元操作的基本原则与范畴，但 Walker 等人在 1913 年合著的化工原理教材中已应用了单元操作的概念。

采用共性观点去研究化工生产的学科不仅有单元操作，还有化工热力学、化工传递过程和化学反应工程等。这些学科组成了化学工程。

在明确了上述三个概念后，可以回答什么是本课程的内容了。简单地说，化工原理是一门以介绍各主要单元操作基础知识的课程。

关于本课程的设置对化工的高等教育、科研与生产所起的积极作用，可作如下分析。

(1) 改善了化工高等教育的课程体系 在化工原理课程设置以前，化工高等教育只重视化学反应过程，没有设置介绍化工生产中各物理过程的课程。然而，在化工生产现场却出现另一种情况，由于生产过程是一环套一环的，所以，哪里出问题，哪里就是“关键”。化工生产中物理过程的环节远多于化学反应的环节，故物理过程出问题的概率较高。显然，本课程设置的使化工高等教育能与化工生产实际更紧密地联系。

(2) 提供了介绍各单元操作知识的科技读物 以化工中常遇到的流体流动问题为例，人们希望掌握的流体流动知识面并不宽，而且也不要求很深，若为一点流体流动问题查阅“流体力学”教材或专著，很可能会事倍功半。如果说流体流动问题尚有书可查的话，遇到悬浮液过滤问题困难就更大了，因为在物理教材中很难找到有关过滤速率方程、滤布、助滤剂及过滤机的论述。所以，化工原理教材的出现，书中汇总了大量的科技资料，加上作者的加工，以很小的篇幅，精练的选材与组织，可使读者在较短时间里便可获得系统而实用的知识。

(3) 开辟了一个新的学科领域 化工原理课程中不仅运用了对事物共性研究的思维，介绍贴近生产的实用知识，而且全书贯穿着一整套解决各单元操作问题的方法论，从而使单元操作成为一个新的学科。

### 物料衡算

物料衡算是对质量守恒原理的具体运用而列出的计算式及其运算，其要点如下。

① 根据需要，人为地划定一个封闭的空间，并称此空间为“控制体”（control volume）。控制体的表面称为“控制面”（control surface）。控制体就是要进行物料衡算的空间范围。

② 确定衡算的基准。可取一定的时间间隔为衡算基准，如取 1s 或 1h 为时间基准等，亦可取一定量的某股进料或出料为基准。

③ 对总的物料质量来说，在对应于基准时间范围内，对于控制体存在着下述关系：

$$\text{输入物料质量} - \text{输出物料质量} = \text{积累物料质量}$$

即

$$\sum m_i - \sum m_o = m_a$$

式中，下标“i”表示输入；下标“o”表示输出；下标“a”表示积累。

④ 在没有化学反应条件下，可对每一种组分（分子）作物料衡算；当有化学反应时，可按每种元素（原子）作物料衡算。

⑤ 若进、出控制体的物料均为连续流股，各流股的质量流量均恒定，满足  $\sum m_i - \sum m_o = 0$  的关系，且在控制体内任一位置物料的各参量——如温度、压强、组成、流速等都不随时间而变，则该控制体内物料处于定态过程。对于定态过程，对控制体作物料衡算时不必考虑控制体内的过程细节，只须考虑穿越控制面的各个流股。

使用控制体除了作物料衡算外，还常用作能量衡算和动量衡算等，但物料衡算是基础。物料衡算的原则与方法同样可推广应用于其他衡算。

**[例 0-1]** 有一内直径  $D$  为 2m 的水槽，其下部有一内直径  $d$  为 20mm 的排水管。现以排水管的中心线所在水平面作为衡量水槽内水位高度的基准面。简况如图 0-1 所示。已知排水时排水管内水的流速  $u$  与水位高度  $H$  间的关系式为： $u=0.60 \sqrt{2gH}$  (m/s) (式中： $g$  为重力加速度， $9.81\text{m/s}^2$ ， $H$  的单位是 m)。试问：当水位由  $H_1=4\text{m}$  下降到  $H_2=2\text{m}$  需多长时间 (水温  $20^\circ\text{C}$ )。

**解** 取控制体如图 0-1 中的虚线所示。由于过程非定态，须取时间  $dt$  为基准。

对水作物料衡算。由于水的密度为常量，为简化计，水的质量衡算式可换成体积衡算式。令  $V$  表示水的体积，则

$$V_i - V_o = V_a$$

因  $V_i=0, V_o=0.60 \sqrt{2gH} \frac{\pi}{4} d^2 dt, V_a = \frac{\pi}{4} D^2 dH$

则  $0 - 0.60 \sqrt{2gH} \frac{\pi}{4} d^2 dt = \frac{\pi}{4} D^2 dH$

$$\frac{0.60 \sqrt{2gd^2}}{D^2} \int_0^{t_1} dt = - \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{\sqrt{H}}$$

$$\frac{0.60 \sqrt{2gd^2} t_1}{D^2} = 2(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})$$

代入数据解得  $0.60 \sqrt{2 \times 9.81} \times \frac{0.020^2 t_1}{2^2} = 2(\sqrt{4} - \sqrt{2})$

$$t_1 = 4.408 \times 10^3 \text{s} = 1.225 \text{h}$$

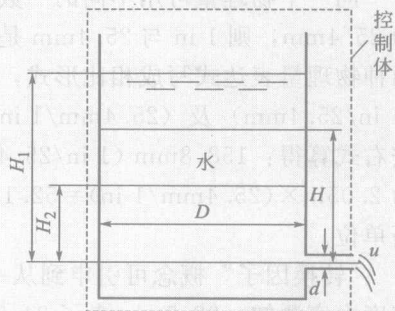


图 0-1 [例 0-1] 附图

**[例 0-2]** 浓缩 NaOH 水溶液的流程如图 0-2 所示， $F$ 、 $G$ 、 $E$  皆为 NaOH 水溶液的质量流量， $x$  表示溶液中含 NaOH 的质量分数， $W$  表示各蒸发器产生水蒸气的质量流量。试根据图示的各已知量，计算  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $G$ 、 $E$  之值。

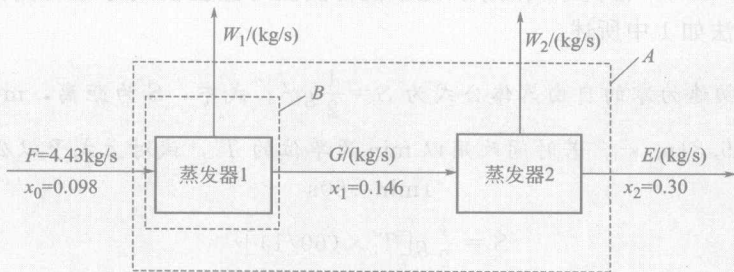


图 0-2 [例 0-2] 附图

**解** 作控制体 A，以 1s 为基准作物料衡算。

NaOH  $F x_0 = E x_2$

即  $4.43 \times 0.098 = E \times 0.30 \quad E = 1.447 \text{kg/s}$

总的物料  $W_1 + W_2 = F - E = 4.43 - 1.447 = 2.983 \text{kg/s}$

作控制体 B，以 1s 为基准作物料衡算。

NaOH  $F x_0 = G x_1$

即  $4.43 \times 0.098 = G \times 0.146 \quad G = 2.974 \text{kg/s}$

总的物料  $W_1 = F - G = 4.43 - 2.974 = 1.456 \text{kg/s}$



$$W_1 + W_2 = 2.983 \text{ kg/s}$$

$$W_2 = 2.983 - W_1 = 2.983 - 1.456 = 1.527 \text{ kg/s}$$

### 物理量的单位换算与公式换算

#### 1. 单位换算

同一个物理量可用不同的“数×单位”方式表达。例如某直线的长度为 1 in，亦可表示为 25.4mm，则 1 in 与 25.4mm 是“等价”的。对于除温度以外的物理量，可把“等价”的两种物理量表达式写成相比形式，构成“转换因子”。“转换因子”可用作单位换算。例如，(1 in/25.4mm) 及 (25.4mm/1 in) 均为“转换因子”，当欲知 158.8mm 相当于多少 in，可按右式算得：158.8mm (1 in/25.4mm) = 6.25in；又若欲知 2.05in 相当于多少 mm，计算式为 2.05in × (25.4mm/1 in) = 52.1mm。计算时“转换因子”的写法要能消去原单位并取得新单位。

“转换因子”概念可引申到从一种物理量对应得到另一种物理量。例如，某汽车的行车速度由实测知，38.5min 走了 34.8km 路程，按此平均速度行车，欲知 329km 路程需行车多少小时，计算式为 329km × (38.5min/34.8km) = 364min = 6.07h。

对于温度的单位换算不能采用“转换因子”方法，须遵循其特殊规律。若原来温度  $T$  的单位是  $^{\circ}\text{F}$ ，拟采用以 K 为单位的  $T'$ ，则  $T$  与  $T'$  的换算关系是  $T = 1.8T' - 459.67$ 。

#### 2. 公式的物理量单位换算

无论是物理公式还是经验公式，式中所有物理量均有规定的单位。在使用公式时如感到原规定的单位使用不方便，可改用其他单位，但公式的系数、常量一般须作相应的改变。这叫公式的物理量单位换算。

公式变换方法：若原式中有温度以外的一项物理量压强  $p$ ，规定使用以 mmHg（即毫米汞柱）为单位的数，现欲使用单位为 atm（即物理大气压）的数  $p'$  替代  $p$ ，只须用  $p'$  乘以（规定单位/新单位）的“转换因子”替代原式中的  $p$  即可。因 1atm = 760mmHg，故须以  $p' \times (760\text{mmHg}/1\text{atm})$  替代原式的  $p$ 。此单位转换法对经验公式等号两侧都适用。经验公式中温度的转换法如 1 中所述。

**【例 0-3】** 初速为零的自由落体公式为  $S = \frac{1}{2}gt^2$ 。式中， $S$  为距离，m； $t$  为时间，s；重力加速度  $g = 9.81\text{m/s}^2$ 。若时间改用以 min 为单位的  $T'$ ，试对上式予以公式变换。

解

$$1\text{min} = 60\text{s}$$

则

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{2}g[T' \times (60/1)]^2 \\ &= 1800gT'^2 \end{aligned}$$

**【例 0-4】** 实验测得空气垂直流过管子外侧时，管壁给热系数计算式为

$$\alpha = 0.37G^{0.37} \quad [\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{F})]$$

式中， $G$  为空气质量流速， $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ 。试把空气质量流速的单位改为  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ，给热系数的单位改为  $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，写出相应的计算式。

解

$$\begin{aligned} 1\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) &= 0.4536 \text{ kg}/(0.3048^2 \text{ m}^2 \cdot 3600\text{s}) \\ &= 1.356 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

$$1\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^{\circ}\text{F}) = 1.055 \times 10^3 \text{ J}/(0.3048^2 \text{ m}^2 \cdot 3600\text{s} \cdot \frac{1}{1.8}^{\circ}\text{C})$$

$$= 5.678 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^{\circ}\text{C})$$

则  $\alpha'(1/5.678) = 0.37\{G'[1/(1.356 \times 10^{-3})]\}^{0.37}$

整理得  $\alpha' = 24.18(G')^{0.37} \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$

式中,  $G'$  的单位是  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

公式在单位转换后应以具体数据进行核算。如设  $G' = 18.75 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ , 换成原英制单位, 则对应的  $G = 1.383 \times 10^4 \text{ lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ 。现分别用两式计算, 得  $\alpha' = 71.53 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$  及  $\alpha = 12.60 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$ 。再代入  $1 \text{ Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = 5.678 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C})$  的关系, 可知此  $\alpha'$  与  $\alpha$  值是等价的。这说明该公式转换结果是正确的。

必须注意, 计算式中对各物理量(符号)赋值时, 式中不应写单位。上文及例题中在使用“转换因子”时写上单位仅是为了向初学者显示复杂的单位换算方法。

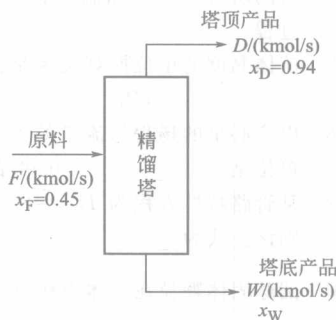
### 习 题

0-1 含水分 52% 的木材共 120kg, 经日光照晒, 木材含水分降至 25%, 问: 共失去水分多少千克? 以上含水分均指质量分数。 [43.2kg]

0-2 以两个串联的蒸发器对 NaOH 水溶液予以浓缩, 流程及各符号意义与 [例 0-2] 的相同。若  $F = 6.2 \text{ kg/s}$ ,  $x_0 = 0.105$ ,  $x_2 = 0.30$ ,  $W_1 : W_2 = 1 : 1.15$ , 问:  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $E$ 、 $x_1$  各为多少?

[1.87kg/s; 2.16kg/s; 2.17kg/s; 0.15]

0-3 某连续操作的精馏塔分离苯与甲苯(如习题 0-3 附图所示)。原料液含苯 0.45 (摩尔分数, 下同), 塔顶产物含苯 0.94。已知塔顶产品含苯量占原料液中含苯量的 95%。问: 塔底产品中苯的含量是多少? 按摩尔分数计。 [0.0413]



习题 0-3 附图

0-4 热导率的 SI 单位是  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , 工程制单位是  $\text{kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$ 。试问:  $1 \text{ kcal}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$  相当于多少  $\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ? 并写出其量纲式。 [1.163;  $\frac{M(L/\tau^2)L}{L\tau T} = ML\tau^{-3}T^{-1}$ ]

0-5 已知理想气体通用常数  $R = 0.08205 \text{ 物理大气压} \cdot \text{升}/(\text{摩尔} \cdot \text{K})$ , 试问采用  $\text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$  时  $R$  的数值。 [8314J/(kmol · K)]

0-6 水蒸气在空气中的扩散系数可用如下经验公式计算:

$$D = \frac{1.46 \times 10^{-4}}{p} \times \frac{T^{2.5}}{T + 441}$$

式中,  $D$  为扩散系数,  $\text{ft}^2/\text{h}$ ;  $p$  为压强,  $\text{atm}$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ 。试将上式改换成采用 SI 单位的形式。各物理量采用的单位是:  $D$  为  $\text{m}^2/\text{s}$ ,  $p$  为  $\text{Pa}$ ,  $T$  为  $\text{K}$ 。

$$\left[ D' = \frac{9.218 \times 10^{-4}}{p'} \times \frac{(T')^{2.5}}{T' + 245} \right]$$

0-7 在冷凝器中蒸汽与冷却水间换热, 当管子是洁净的, 计算总传热系数的经验式为

$$\frac{1}{K} = 0.00040 + \frac{1}{268u^{0.8}}$$

式中,  $K$  为总传热系数,  $\text{Btu}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$ ;  $u$  为水流速,  $\text{ft/s}$ 。试将上式改换成采用 SI 单位的形式。各物理量采用的单位是:  $K$  为  $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ,  $u$  为  $\text{m/s}$ 。

$$\left[ \frac{1}{K'} = 7.045 \times 10^{-5} + \frac{1}{3937(u')^{0.8}} \right]$$

### 复习思考题

- 0-1 广义地说, 凡工业生产的关键环节是\_\_\_\_\_ , 这类生产便归属化工生产范畴。
- 0-2 为了便于管理及技术交流, 很多行业从化工中划分出去, 但它们仍属“化工大家族”中的一员。这些



行业有\_\_\_\_\_等。

0-3 生产工艺学是\_\_\_\_\_。

0-4 化学工程是\_\_\_\_\_。

0-5 化工生产中虽然化学反应是核心,但反应前后对物料的处理大都为物理加工过程。这些对物料的物理加工过程称为\_\_\_\_\_。

0-6 介绍主要单元操作的原理、方法及设备的课程叫\_\_\_\_\_。

0-7 物理量=\_\_\_\_\_×\_\_\_\_\_。

0-8 基本单位:长度\_\_\_\_\_,质量\_\_\_\_\_,时间\_\_\_\_\_。

0-9 导出单位:力\_\_\_\_\_,功或能\_\_\_\_\_,功率\_\_\_\_\_,压强\_\_\_\_\_。

0-10 有的单位前面有“字首”,这些字首的意思是:k\_\_\_\_\_,c\_\_\_\_\_,m\_\_\_\_\_, $\mu$ \_\_\_\_\_。

0-11 查得 30°C 水的黏度  $\mu \times 10^5 / \text{Pa} \cdot \text{s}$  为 80.12,表明  $\mu =$ \_\_\_\_\_。

0-12 量纲是\_\_\_\_\_。如长度单位有 m、cm、mm、km 等,其量纲为\_\_\_\_\_。

0-13 物料衡算是对\_\_\_\_\_、\_\_\_\_\_而言的。

0-14 总的物料衡算式为\_\_\_\_\_。

0-15 若无化学反应,对任一组分  $j$ ,物料衡算式为\_\_\_\_\_。

0-16 若进出控制体的物料均为连续流股,各流股的质量流量均恒定, $\sum M_i = \sum M_0$ ,控制体内任一位置物料的所有参量,如温度、压强、组成、流速等都不随时间而改变,则该控制体处于\_\_\_\_\_过程。

0-17 流体黏度的单位换算关系是:cP(厘泊) $=0.001 \text{Pa} \cdot \text{s}$ ,则  $3.5 \text{cP} =$ \_\_\_\_\_  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ,  $0.005 \text{Pa} \cdot \text{s} =$ \_\_\_\_\_ cP。

0-18 以离心泵的扬程与流量的关系为例,若  $H_e = 36 - 0.02V^2$  (单位  $H_e - \text{m}$ ,  $V - \text{m}^3/\text{h}$ ),则式中 36 的单位是\_\_\_\_\_,0.02 的单位是\_\_\_\_\_。

0-19 某管路特性方程为  $H_e' = 8.0 + 8.07 \times 10^5 V^2$  (式中  $H_e' - \text{m}$ ,  $V - \text{m}^3/\text{s}$ ),当以  $V'$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) 替代  $V$ ,则该公式为\_\_\_\_\_。

0-20 圆球固体颗粒在流体中作自由重力沉降,在 Stokes 区的沉降速度计算式为  $u_t = \frac{gd_p^2(\rho_s - \rho)}{18\mu}$ 。式中  $u_t$  为沉降速度,  $\text{m/s}$ ;  $g$  为重力加速度,  $g = 9.81 \text{m/s}^2$ ;  $d_p$  为颗粒直径,  $\text{m}$ ;  $\rho_s$  为颗粒密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\mu$  为流体黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。当以  $u_t'$  ( $\text{cm/s}$ )、 $\mu'$  (cP) 分别替代  $u_t$  与  $\mu$ ,则该公式为\_\_\_\_\_。