



新世纪高等学校教材

化学系列教材

化学工程基础

王永成 主 编

赵小军 贾志谦 副主编



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

HUAXUE
GONGCHENG JICHU

新世纪高等学校教材

化学系列教材

化学工程基础

HUAXUE GONGCHENG JICHU

王永成 主 编

赵小军 贾志谦 副主编



北京师范大学出版集团
BEIJING NORMAL UNIVERSITY PUBLISHING GROUP
北京师范大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础/王永成主编. —北京: 北京师范大学出版社, 2011.10

(新世纪高等学校教材 化学系列教材)

ISBN 978-7-303-12197-7

I. ①化… II. ①王… III. ①化学工程—高等学校—教材
IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 041030 号

营销中心电话 010-58802181 58808006
北师大出版社高等教育分社网 <http://gaojiao.bnup.com.cn>
电子信箱 beishida168@126.com

出版发行: 北京师范大学出版社 www.bnup.com.cn
北京新街口外大街 19 号
邮政编码: 100875

印 刷: 北京中印联印务有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 170 mm × 230 mm
印 张: 19.5
字 数: 339 千字
版 次: 2011 年 10 月第 1 版
印 次: 2011 年 10 月第 1 次印刷
定 价: 32.00 元

策划编辑: 范 林	责任编辑: 范 林
美术编辑: 毛 佳	装帧设计: 天泽润
责任校对: 李 茵	责任印制: 李 啸

版权所有 侵权必究

反盗版、侵权举报电话: 010-58800697

北京读者服务部电话: 010-58808104

外埠邮购电话: 010-58808083

本书如有印装质量问题, 请与印制管理部联系调换。

印制管理部电话: 010-58800825

新世纪高等学校教材
化学系列教材编写指导委员会

(按姓氏笔画排序)

顾 问	刘伯里	刘若庄			
委 员	马子川	王永成	刘正平	汤 杰	孙闻东
	杜新贞	李 奇	汪辉亮	张成孝	陈亚光
	陈光巨	陈红雨	范楼珍	欧阳津	赵小军
	胡满成	郭海明			

《化学工程基础》编委会

主 编	王永成				
副主编	赵小军	贾志谦			
编 委	(按姓氏笔画排序)				
	马淑兰	王永成	刘新文	杨恩翠	张圣麟
	吴冬青	赵小军	赵国虎	查 飞	贾志谦

前言

2009年7月,由北京师范大学化学学院主持,在北京师范大学举办了“师范院校化学课程与教材建设研讨会”,与会代表对师范院校化学课程改革做了充分讨论,并建议由北京师范大学化学学院牵头,编写一套适合于当前师范院校化学课程教学的新教材。

高中化学新课程改革设置了选修课程模块,目的是为更好地体现高中化学课程的选择性,满足学生个性发展的多样化需要。因此,新课程改革对师范生的专业知识体系的构建提出了新的要求,不仅要求学生掌握理科专业课知识,还要具备一定的与化工实际生产过程和工程原理相关的工科知识,形成较为完善的知识构架。

化学工程是以物理学、化学、数学的原理为基础,研究化学工业生产中物质的转化,改变物质的组成、性质和状态的一门工科学科。化工传递过程和化学反应工程是支撑化学工程学的两大基石,前者是化工过程中的纯物理过程,后者是工业规模化学反应过程中物理过程与化学过程的综合。本教材通过各化工单元操作来反映化工传递过程基础理论的具体应用,以化学动力学理论和反应器理论来体现化学反应工程学特点,选择合成氨和石油化工工艺作为化工工艺学典例,构成了本教材的三大组成,以体现“三传一反加工艺”的内容主线。本教材着重突出了化工过程的工程特点,不仅适合于师范院校和综合院校的化学专业使用,也是化工专业理想的实用教材和参考教材。

本教材旨在讲述化工过程的基本理论和方法,通过本教材的学习,使学生对化学工程的工科特点有明确的认识,对化工生产过程中物理过程与化学过程密切联系的重要性有深

入的理解，这对于学生今后从事化学教育工作和化学研究工作均有裨益。

参加本教材编写的有西北师范大学王永成、查飞教授；天津师范大学赵小军、杨恩翠教授；北京师范大学贾志谦、马淑兰副教授；河南师范大学张圣麟教授；兰州城市学院赵国虎教授；甘肃河西学院吴冬青教授；天水师范学院刘新文教授。

此教材汇集了北京师范大学、西北师范大学等几位从事多年化工教学教师的辛勤劳动和心血，也是几所院校同心合作的产物。在此，为参与编者的友好合作表示感谢。

由于编者的水平有限，书中肯定会有不尽如人意的地方，出现问题和谬误也在所难免，敬请同行专家学者和广大读者批评指正和赐教，对此编者将会由衷感谢。

编者
2010年11月

目 录

绪 论 /1

第一篇 传递过程

第 1 章 流体流动与输送 /6

- 1.1 流体静力学基本方程式 6
- 1.2 流体流动中的守恒原理 13
- 1.3 流体在管内的流动阻力 22
- 1.4 流体输送管路计算 37
- 1.5 流体流量的测量 41
- 1.6 流体输送机械 46

第 2 章 传 热 /59

- 2.1 概述 59
- 2.2 热传导 61
- 2.3 对流传热 66
- 2.4 传热过程的计算 73
- 2.5 辐射传热 80
- 2.6 换热器 84

第 3 章 吸 收 /95

- 3.1 概述 95
- 3.2 气液相平衡 97
- 3.3 单相中的传质 100

3.4	吸收速率方程	107
3.5	吸收塔的计算	110
3.6	填料塔	118
3.7	气体的其他分离方法	123

第4章 蒸馏与精馏 /126

4.1	双组分溶液的气液相平衡	129
4.2	双组分连续精馏的流程及物料衡算	138
4.3	连续精馏理论塔板数的计算	152
4.4	塔板效率与实际塔板数	161
4.5	其他精馏方式	165

第二篇 化学反应工程

第5章 均相化学反应动力学基础 /178

5.1	化学动力学基本概念回顾	178
5.2	单一反应的速率方程式	181
5.3	复杂反应的速率方程式	184

第6章 多相反应过程 /188

6.1	工业催化剂简介	188
6.2	气-固相催化反应步骤及本征动力学	190
6.3	气-固相催化反应宏观动力学	194

第7章 理想流动反应器 /202

7.1	化学反应器的类型	202
7.2	间歇釜式反应器	205
7.3	活塞流反应器	209
7.4	全混流反应器	212
7.5	多釜串联反应器	216
7.6	理想流动反应器容积的比较	219
7.7	理想反应器中复杂反应的选择率	220

7.8 全混流反应器的热稳定性	222
-----------------------	-----

第8章 停留时间分布与流动模型 /227

8.1 停留时间分布	227
8.2 停留时间分布函数的测定	229
8.3 停留时间分布的数字特征	230
8.4 理想流动反应器的停留时间分布	233
8.5 非理想流动反应器的停留时间分布	235
8.6 实际流动反应器的计算	240

第三篇 化学工艺学

第9章 化学工艺计算 /244

9.1 物料衡算	244
9.2 能量衡算	248

第10章 合成氨工艺学 /252

10.1 概述	252
10.2 氨的合成	253
10.3 原料气的生产和净化	259
10.4 尿素的合成	268

第11章 石油炼制与石油化工 /272

11.1 概述	272
11.2 常减压蒸馏	278
11.3 催化裂化	280
11.4 重整	287
11.5 裂解	291
11.6 聚丙烯的生产工艺	296

参考文献 /302

绪 论

一、化学工业概况

化学工业是国民经济的重要行业之一，它在各国经济发展中都有举足轻重的地位，与国民经济各部门和人民生活各方面都有不可分割的联系，是对人类发展产生重大影响的科学技术。世界化学工业的发展速度长期以来超前于工业平均增长速度。近十几年来，世界化学工业以高于世界经济增长率的 20%~30% 的速度不断发展。

中国化学工业是国家支柱产业，其规模在 2005 年已达到 1 510 亿美元，预测到 2015 年将再翻一番，达到 3 920 亿美元，年增长率超过 10%。届时，中国可能成为仅次于美国的世界第二大化学品制造国，在世界化学品市场的份额将从现在的 8% 上升到 13%。

目前，中国已是仅次于美国之后的世界第二位化学品消费国，在 10~15 年内，中国化学品市场预计将增长到约 8 000 亿美元，相当于美国市场的规模。我国石油和化工行业主要经济指标在全国工业行业中占举足轻重的地位。2004 年，全行业累计实现现价工业总产值、工业增加值、产品销售收入、利润总额 4 个指标占全国规模以上工业企业的比例分别为 13.2%、14%、12.9% 和 24.6%。中国工业利润的 1/4 来源于石油和化学工业，其地位和作用不可替代。

由于化学工业涉及资源加工与能源转化过程，处在化工行业高速发展时期，它消耗了大量资源，制造了大量污染物。国际上为了实现经济的可持续发展，就必须转变经济增长方式，走新型工业化的道路，大力发展循环经济。我国石油和化学工业等呈现持续快速增长，发展模式日渐国际化。我国 GDP 的年增长率一直保持在较高水平，快速发展的国民经济，带动了石油和化学工业等的快速发展，化工行业年增长率超过 GDP 的增长率。我国的乙烯产量近几年的年均增长率达 10.9%，居世界第二位，仅次于美国；同期原油加工能力年均增长 8%，居世界第二位；同期合成纤维产量年均增长 18.43%，居世界第一位；这些主要化工产品均位居世界前列。由此可见，化学化工科学及其所发展出来的技术都为社会发展和科学进步作出了巨大的贡献，并将继续为社会的可持续发展作出不可替代的贡献。快速发展的今天，能源消费量约占全国能源消费总量的 25%。化工生产中的废气、废水排放量在全国工业行业废水排放总

量中居首位。

二、化学工程学科的发展

化学工程学科是由多种科学技术交叉结合,又服务于多项生产领域的一门工程技术学科,近年来正面临着新的技术革命的挑战而在不断的改变之中。随着化学工业及相关工业的飞速发展和科学技术的进步,化学工程学科也发生了巨大的变化,包括从学科涉及的领域,到研究的内容、方法以及分支学科、新兴学科的发展。

现代化学工业的特点是规模大、综合性强、自动化程度高。现代化工工艺工程早已不是个别单元操作的机械组合,而是在“三传一反”基础上发展起来的“过程工程学”,其内容较为详细地论述了过程开发、建立于改善中的规律与特征。

目前,化学工程已进入现代化学工程发展阶段。随着工业的发展和科学技术的进步,化学工程的“成熟度”和“工业应用度”都达到了一个新的高度。化学工程学科经过了诸发展阶段,开始形成一大门类工程技术学科体系,即现代化学工程学科体系。

现代化学工程学科体系构建的框架可由以下4个层次组成。

1. 基础学科

第一层次为自然科学基础学科,主要分支学科有数学、物理学、化学及机电学科,其研究对象是自然科学的普遍规律,是构建化学工程学科体系的一般理论基础。

2. 基础化学工程学科

第二层次是工程技术基础学科,其研究对象为物理性化工单元过程,主要包括动量传递过程、热量传递过程、质量传递过程等。

3. 基本化学工程学科

第三层次为基本化学工程学科,主要分支学科有化工传递过程、反应工程、分离工程、化工热力学、化工系统工程与优化、化工动态与控制、化工数学、化工机械与设备以及电子计算机在化学工程中的应用等。这是构建现代化学工程学科体系的主体部分或基本部分。

4. 应用化学工程学科

第四层次是基本化学工程学科通过与其他学科的交叉渗透,在诸领域的应用而形成的,主要分支学科有环境化学工程、材料化学工程、生物化学工程、

宇宙化学工程、海洋化学工程、化学情报工程等。这些应用化学工程学科多为新兴学科。

三、化学工程学科的内容和学习目的

就化学工程学科的内容特点来说,“三传一反”是本学科的主线。所谓“三传一反”是指动量传递(常指流体流动)、热量传递、质量传递和化学反应工程。每一个化工单元过程都包含着流体的流动与输送、传热以及相内或相间的传质过程以及化学反应过程。化学工程学科就是研究传递过程和化学反应过程规律,并将传递过程和化学反应过程加以综合并应用到化学工艺设计和化工设备设计以及化工生产过程中去。所以,研究以“三传一反”为中心的化学工程,其目的是为解决化工生产中的以下问题:

(1)设计出先进、高生产能力、低能耗、安全的生产工艺;确定和优化工艺条件,以及允许的变化范围,使生产尽可能地在最高效率点的附近进行。

(2)设计高效能的生产装置和设备,使之具有高效率、低能耗、安全稳定的生产能力。

(3)将实验室小试技术或中试结果进行中试放大,使科研成果尽快地实现工业规模的生产。

(4)以“三传一反”的综合理论指导实验室和中试工作,获取可靠的工艺放大数据。

从化学专业学生的培养目标和我国科技发展方针看,理科化学专业的学生,将有很多从事与国民经济有关的技术开发工作。这就要求他们要具备一定的化学工程专业的基础知识,要能与工程技术人员搞好“接力”或“相互渗透”,以尽快把科研成果转化成生产力。

本课程的教学目的是对学生进行化学工程学的教育,增强理科学生的工程观念,使学生了解和掌握化学工程学中的主要观点、理论和方法,理解工艺原理和化工设备工作原理,了解从化学到化工生产所涉及的某些问题和解决问题的途径及运用技术经济观点综合处理问题的方法,从而达到提高综合分析和解决问题的能力。

根据以上教学目的,本教材以“三传一反”为主线,根据化工过程特点将动量传递、热量传递和质量传递的基本理论、基本方程融入相应的化工单元操作(流体流动与输送、传热、精馏、吸收等)章节。“一反”体现于第二篇化学反应工程中。此外还安排了化学工艺学内容,列举了以合成氨和石油化工为代表的无机和有机工艺学,使学生不但对化工单元过程有较深入的理解,而且对全化

学工艺过程有一个整体概念。

四、化学工程学的学习方法

化学工程基础是一门综合性较强的课程,由于它要解决的是化工生产中的工程实际问题,本课程的工科性质决定了课程的特点,学习时要针对其特点改进学习方法,才能收到好的学习效果。在此提出几点建议,以供大家学习时参考:

(1)本课程的“三传”问题属于物理问题,都有相应的基本方程给以定量描述。如描述动量传递的基本方程是牛顿黏性定律:

$$\tau_x = -\mu \frac{du}{dx} = -\frac{\mu}{\rho} \frac{d(\rho u)}{dx}$$

描述热量传递的基本方程是傅里叶导热定律:

$$\frac{q_x}{A} = -\lambda \frac{dT}{dx} = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \frac{d(\rho c_p T)}{dx}$$

描述质量传递的基本方程是菲克扩散定律:

$$J_{Ax} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dx}$$

三者有着相似的形式和类似的物理意义。如果将等号左边看成过程通量,右边导数就是过程在 x 方向传递的浓度梯度,负号表达了过程传递方向与梯度方向相反,或者说是传递方向总是从高位传向低位(隐含热力学第二定律之意)。以上三个方程是支撑“三传”过程的基本方程,深入领悟三个基本方程的含义,是理解传递过程的关键所在。

(2)化工计算常用到的方程有:物料衡算方程、热量衡算方程、动量衡算方程(用得较少)、动力学方程和参数计算方程。

衡算方程式是以相应的守恒定律为依据的。在建立衡算方程之前,首先选取衡算范围,这里不妨称衡算范围为控制体,包围控制体的面称控制面。就某一物理量建立如下衡算方程式,单位时间内

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

输入量和输出量是指通过控制面进入和输出控制体的量,而消耗量和积累量是指控制体内因反应引起的消耗量(如反应物的物质的量、反应热等)和物理量的累积。如果所选的控制体是均匀的有限体积,得到的方程式是一个代数方程;如果所选的控制体是无穷小量的体积微元,得到的方程式则为微分方程。

化学反应动力学方程是表达影响化学反应速率因素的速率方程,物理化学中已有详细的描述。其他过程速率方程可概括为

$$\text{过程速率}(r) = \frac{\text{过程推动力}(\Delta)}{\text{过程阻力}(R)}$$

式中，过程推动力是指在某瞬时过程距平衡的差额，是具有强度性质的物理量，如浓度差、温度差等。

(3)扎实的数学和物理化学基础是学好化学工程基础的基本保证。化工原理中的精馏、吸收单元操作是以相平衡理论为基础导出的过程衡算式及操作线方程，化学反应工程是以化学动力学和化学热力学理论结合反应器流动模型产生的反应器计算式，在化学工艺学中往往要用化学热力学和化学动力学理论对具体工艺给以分析和讨论。

化学工程学充分体现了化工过程中化学过程、物理过程和工程问题的有机结合，所以该课程是培养和提升学生综合能力的一门得力课程。理科化学专业学生学习该课程的意义在于，有助于加深对化工生产过程的综合性和复杂性的认识，有助于在化学实验研究中能够认识到物理过程因素对化学反应过程的影响，有助于在化学教学中丰富教学内容。

第一篇 传递过程

第 1 章 流体流动与输送

1.1 流体静力学基本方程式

流体静力学研究流体在外力作用下的达到平衡的规律及其在工程中的应用。如流体在设备或管道内压强的变化与测量、设备的液封、储罐内液位的测量等。

1.1.1 流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度，以符号 ρ 表示密度， m 表示质量， V 表示体积，其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1-1)$$

密度的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。不同流体的密度是不同的，对于一定的流体，密度是压力和温度的函数，即 $\rho = f(p, T)$ 。

除了极高的压力下，液体的密度随压力的变化很小，但其随温度不同而有所变化，故从手册查阅液体的密度时，需注意其所对应的温度。

液体的密度一般可在物理化学手册及相关资料中查得。

在化工生产中，所处理的液体大多是多组分的混合物，通常手册中所给出的为纯物质的密度。若混合前后体积不变，混合物的平均密度 ρ_m 可用以下公式计算：

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1.1-2)$$

式中， ρ_m 为混合物的平均密度； $w_1, w_2, \dots, w_n$ 为液体混合物中各组分的重量分数； $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ 为液体混合物中各组分的密度。

气体的密度随压力和温度的变化较大，在压力不太高、温度不太低时，气体的密度可以看做理想气体来处理。根据理想气体状态方程

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

$$pM = \frac{W}{V}RT = \rho RT$$

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1.1-3)$$

在化工生产中所涉及的气体，往往是几个组分的混合物，通常可按照理想气体来处理，即可用式(1.1-3)计算混合气体的密度，此时式中气体分子的摩尔质量 M 应以混合气体的平均摩尔质量 $\bar{M}$ 来代替，即

$$\bar{M} = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1.1-4)$$

式中， $M_1, M_2, \dots, M_n$ 为气体混合物中各组分的千摩尔质量， $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ； $y_1, y_2, \dots, y_n$ 为气体混合物中各组分的物质的量分数(或体积分数)。

1.1.2 流体的静压强

流体垂直作用于单位面积上的力，称为流体的静压强，简称压强，符号为 p 。

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.1-5)$$

式中， p 为流体的静压强，Pa； F 为垂直作用于流体表面上的力，N； A 为流体受力的面积。

压强的单位为 Pa(Pascal)，即 $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，还有其他的一些常用单位，如大气压 atm、mmHg、 mH_2O 、工程大气压 at(公斤力/厘米²)，这些单位之间的换算关系为

$$1 \text{ 标准大气压(atm)} = 101\,325 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 760 \text{ mmHg 柱} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O 柱}$$

$$1 \text{ 工程大气压(at)} = 9.807 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} = 735.6 \text{ mmHg 柱} = 10 \text{ mH}_2\text{O 柱}$$

另外，压力表常用 MPa 表示， $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ Pa}$ 。

压强值的表示除了用不同的单位计量外，还可以有不同的计量基准。以绝对零压(绝对真空)为起点计算的压强，称为绝对压强。

流体的压强大小可用测压仪表来测量，当被测流体的绝对压强高于外界大气压强时，所用的测压仪表称为压强表，该压强表上所显示的数值表示被测流体的绝对压强高于大气压强的数值，称为表压强，即：表压强 = 绝对压强 - 大气压强。

当被测流体的绝对压强小于外界大气压强时，所用的测压仪表称为真空表，该真空表上所显示的数值表示被测流体的绝对压强低于外界大气压强的数值，称为真空度，即：真空度 = 大气压强 - 绝对压强。此时，绝对压强是指在负压操作下设备内剩余的绝对压强，也称余压。显然，设备内流体的绝对压强

愈低，则它的真空度就愈高。所以真空度又是表压强的负值。例如，真空度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa}$ ，则表压强是 $-5 \times 10^4 \text{ Pa}$ 。

绝对压强、表压强和真空度的关系如图 1.1-1 所示。

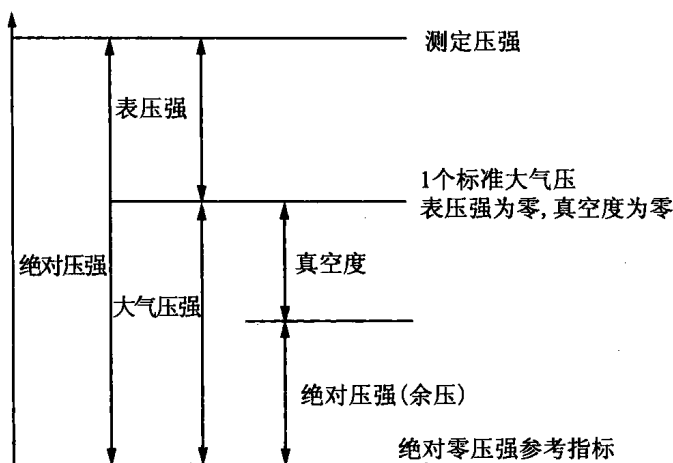


图 1.1-1 绝对压强、表压强和真空度的关系

1.1.3 流体静力学基本方程

1. 流体静力学基本方程的推导

如图 1.1-2 所示，容器中盛有密度为 ρ 的静止液体。现在液体内部任意画出一底面积为 A 的垂直液柱。若以容器底为基准水平面，则液柱的上、下底面与基准水平面的垂直距离分别为 z_1 和 z_2 。

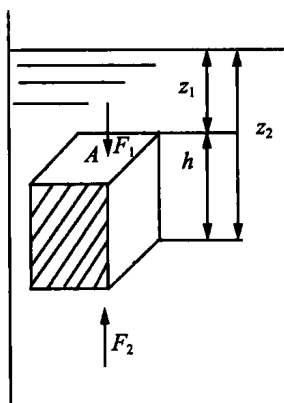


图 1.1-2 流体静力学基本方程的推导