

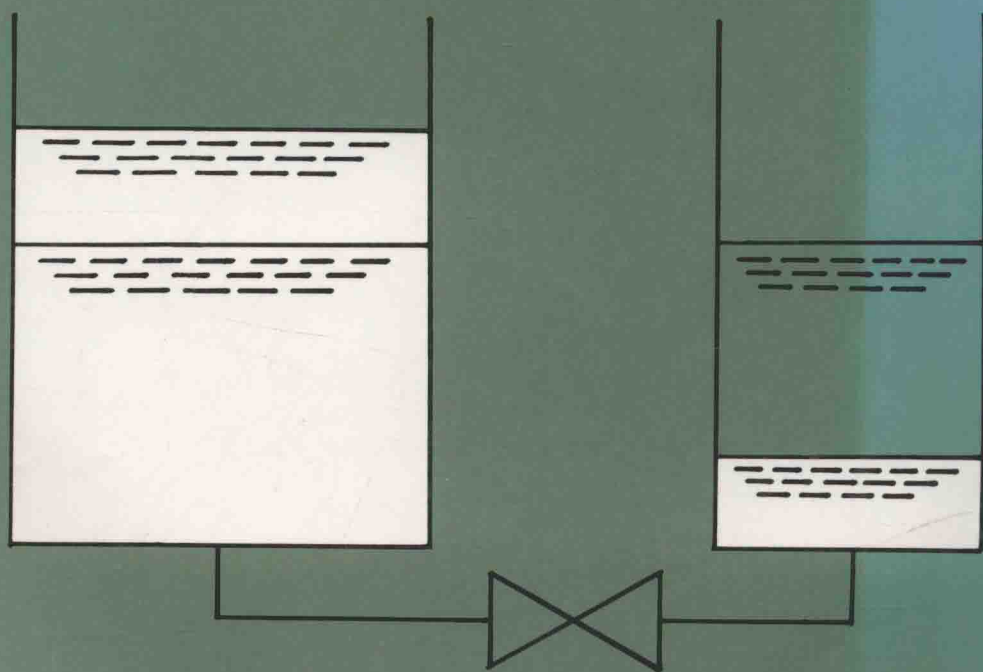
高等学校教材

# 化工基础

(第二版)

(上册)

吴迪胜 蒋家俊 皮耐安 编



高等教育出版社

高等学校教材

37/39

# 化 工 基 础

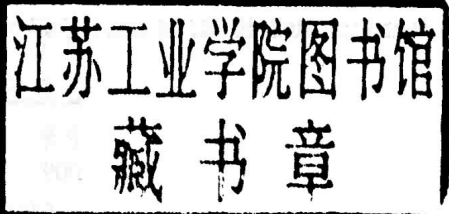
(第 二 版)

TQ01

上 册

2-20

吴迪胜 蒋家俊 皮耐安 编



高 等 教 育 出 版 社

## 内 容 简 介

本书是原《化工基础》的修订版,它是为高等师范院校化工基础课程编写的教材。全书上下册共分三篇:(1)传递过程;(2)化学反应工程;(3)化学工艺学。

本修订版在保持原版主要内容及特色的前提下,又增补了一些国内外化工方面有关较新内容。另外,为适应科学技术发展的新形势,逐步达到计量的国际化,全书统一采用了国家法定计量单位。

本书可供高等师范院校化学专业用作教材,亦可供其他有关专业参考使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工基础 上册/吴迪胜等编.—2版.—北京:高等教育出版社,1989.5(2001重印)

高等学校教材

ISBN 7-04-002095-5

I.化… II.吴… III.化学工业-基础理论-高等学校-教材 IV.TQ01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 20547 号

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号

邮政编码 100009

电 话 010—64054588

传 真 010—64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 国防工业出版社印刷厂

版 次 1980 年 11 月第 1 版

开 本 787×1092 1/16

1989 年 5 月第 2 版

印 张 18

印 次 2001 年 7 月第 13 次印刷

字 数 410 000

定 价 14.60 元

---

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

**版权所有 侵权必究**

## 第二版前言

化工基础第二版是在第一版出版使用了7年之后修订的。本版在修订时除了保持第一版的优点之外，着重在下列方面有所加强：

(1) 清晰和准确地阐述基础理论，并强调理论在生产实际中的应用，使学生形成一些定量的概念，以便在更复杂的问题上能够作出正确的、定性的判断；

(2) 传递过程、化学反应工程、化学工艺学和化工过程开发的序列是理论和知识逐步深入，或涉及的问题逐步复杂的序列。因此，在编写过程中，编者力求注意理论和知识的内在联系和相辅相成的关系；

(3) 加强优化生产的观点。为了实现主要优化目标，在理论的指导下确定优化的操作方式、生产条件、生产设备和工艺流程；

(4) 注意介绍近年来新开发的行之有效的新技术新工艺，适当地反映我国化工生产的新成就；

(5) 为了适应化学专业知识结构的需要，第二版加强了化学反应工程和化学工艺方面的内容。考虑到各校近年来都比较重视生产认识实习，工艺学的内容可以在课堂上也可以结合生产认识实习选讲。

最后专写了一章化工过程开发概述，在所学过的化工基础理论和知识的基础上，概括地介绍从实验室研制到化工生产的开发过程中，需要解决哪些问题和解决这些问题的一般程序和方法。

本书由吴迪胜主编。其中绪论和第一篇由蒋家俊撰写，第二篇由皮耐安撰写，第三篇由吴迪胜撰写，化工过程开发由黄浦丰和吴迪胜共同撰写。

由于我们水平有限，书中可能存在不少缺点和错误，恳切希望各方面提出意见和批评。

编者

1988年7月

## 前言

本教材是为高等师范院校《化工基础》课程编写的。根据该课程的教学要求,本书除绪论外,分为三篇:(1)传递过程——包括流体动力过程、传热过程及传质过程的吸收和蒸馏,以代表性的单元操作对传递工程作了系统的分析和讨论,(2)化学反应工程——通过对基本反应器、气固相催化反应器以及物料停留时间分布和流动模型的阐述,简明扼要地说明了化学反应工程中的主要内容;(3)化学工艺——以硫酸、合成氨和石油化工为范例,对工艺路线和技术方案及有关问题作了概括而全面的综述和评价。

在编写过程中,我们认真地考虑了本课程的目的要求和化工学科的特点,特别注意了以下几个方面:

(1) 在介绍基本概念和阐述基础理论时,尽可能地对它们所具有的物理概念予以清晰而准确的叙述,在这基础上再作简化而合理的数学推导来巩固概念,说明运用方法,以期学生在学习时能对有关内容有明确的理解。

(2) 化工学科需要综合运用物理和化学的理论,并结合本学科的概念和原理来解决化工生产中的问题。为此,本书力求与先行课程相衔接,又有意识地介绍综合运用多方面的知识来考察、分析和评价化工单元或生产过程的方法和思路,以提高学生综合分析和解决问题的能力。

(3) 为了便于自学,本书选取合宜的数据和图表来加强认识的形象化,又安排了一定数量的例题来巩固重要的概念和原理,介绍解决问题的基本方法,并提高化工运算的能力。

(4) 鉴于近年来化工生产的迅速发展,对照国外教材中的变革,本书尽量选取一些较新的内容,以适当地反映化工生产中的新成就。

(5) 为适应科学技术的发展和计量的国际化,本书全面地采用国际单位制,所用数据(包括公式以及附录)也作了相应的换算。

(6) 考虑到各高等院校和各地区的特点以及学时数等因素,本教材在编写时赋以较大的机动性,各章在一定程度上可以独立用来教学,各院校可根据教学大纲选用。例如为完成教学大纲的基本要求,可以对传质过程的蒸馏和吸收选讲其中之一(或都讲)。书中带有\*号的部分可以作为完成教学大纲基本要求后的补充内容(如第三章)。在讲授各章节时对具体内容也可有所增删。此外,我们建议,教材中的例题,教师可选取少量在课堂示教,其余供学生在复习时自学,以巩固概念或明确运算方法。

(7) 为便于对本书内容检索,并为丰富有关化工术语的外文知识,本书书末编有中英文对照的索引备用。

本书由上海师范学院主编,其中绪论和第一篇由福建师范大学蒋家俊编写,叶恺荣,杨造鄞等参加了有关工作(上册部分);第二篇由上海师范学院钱白水编写,第三篇由上海师范学院吴迪胜编写,徐苏海、皮耐安、蒋银旗等参加了有关工作(下册部分)。

本书由河北师范大学主审。审稿过程中，华东师范大学、天津师范学院、北京师范大学、北京师范学院、东北师范大学、华中师范学院、华南师范学院、西南师范学院、南京师范学院、陕西师范大学、四川大学、武汉大学和华东化工学院以及其他一些院校的同志提出了许多宝贵的建设性的意见，对本书的修改定稿起了积极的作用。我们谨表示衷心的感谢。由于我们水平有限，书中必然存在不少错误和缺点，恳切希望各方面提出意见和批评。

编者 1980年7月

本书由河北师范大学主审。审稿过程中，华东师范大学、天津师范学院、北京师范大学、北京师范学院、东北师范大学、华中师范学院、华南师范学院、西南师范学院、南京师范学院、陕西师范大学、四川大学、武汉大学和华东化工学院以及其他一些院校的同志提出了许多宝贵的建设性的意见，对本书的修改定稿起了积极的作用。我们谨表示衷心的感谢。由于我们水平有限，书中必然存在不少错误和缺点，恳切希望各方面提出意见和批评。

# 目 录

|                                  |        |
|----------------------------------|--------|
| 第一章 绪论 .....                     | ( 1 )  |
| § 1-1 本课程的内容 .....               | ( 2 )  |
| § 1-2 学习本课程的目的 .....             | ( 3 )  |
| § 1-3 化学工程和工艺中的一些<br>基本规律 .....  | ( 5 )  |
| 1-3.1 质量守恒 .....                 | ( 5 )  |
| 1-3.2 能量守恒 .....                 | ( 5 )  |
| 1-3.3 平衡关系 .....                 | ( 6 )  |
| 1-3.4 过程速率 .....                 | ( 6 )  |
| § 1-4 化工过程开发 .....               | ( 7 )  |
| 1-4.1 实验室研究 .....                | ( 7 )  |
| 1-4.2 可行性研究 .....                | ( 7 )  |
| 1-4.3 中间试验 .....                 | ( 8 )  |
| 1-4.4 工业装置的设计和投产 .....           | ( 8 )  |
| § 1-5 国家法定计量单位介绍<br>.....        | ( 10 ) |
| 1-5.1 国际单位制的基本单位和辅<br>助单位 .....  | ( 10 ) |
| 1-5.2 具有专门名称的国际单位制<br>导出单位 ..... | ( 10 ) |
| 1-5.3 国家选定的非国际单位制单<br>位 .....    | ( 11 ) |

## 第一篇 传递过程

|                               |        |
|-------------------------------|--------|
| 第二章 流体的流动和输送 .....            | ( 14 ) |
| § 2-1 一些基本概念 .....            | ( 15 ) |
| 2-1.1 理想流体和实际流体 .....         | ( 15 ) |
| 2-1.2 流体的密度、相对密度和比<br>容 ..... | ( 15 ) |
| 2-1.3 流体的压强及其测量 .....         | ( 16 ) |
| 2-1.4 流量和流速 .....             | ( 21 ) |
| 2-1.5 稳态流动和非稳态流动 .....        | ( 22 ) |
| § 2-2 流体稳态流动时的衡算<br>.....     | ( 23 ) |
| 2-2.1 流体稳态流动时的物料衡算<br>.....   | ( 23 ) |

|                                |        |
|--------------------------------|--------|
| 2-2.2 流体稳态流动时的能量衡算<br>.....    | ( 24 ) |
| 2-2.3 柏努利方程的应用举例 .....         | ( 26 ) |
| 2-2.4 流体流量的测量 .....            | ( 29 ) |
| § 2-3 实际流体的流动 .....            | ( 34 ) |
| 2-3.1 粘度 .....                 | ( 34 ) |
| 2-3.2 流体流动的形态 .....            | ( 36 ) |
| § 2-4 流体在圆管内流动时的阻<br>力计算 ..... | ( 40 ) |
| 2-4.1 滞流时的摩擦阻力 .....           | ( 40 ) |
| 2-4.2 湍流时的流动阻力 .....           | ( 41 ) |
| 2-4.3 量纲分析法归纳阻力计算式<br>.....    | ( 44 ) |
| 2-4.4 局部阻力 .....               | ( 45 ) |
| 2-4.5 管路计算 .....               | ( 46 ) |
| § 2-5 液体输送机械 .....             | ( 48 ) |
| 2-5.1 离心泵 .....                | ( 48 ) |
| *2-5.2 往复泵 .....               | ( 51 ) |
| *2-5.3 旋转泵 .....               | ( 53 ) |
| § 2-6 气体输送和压缩机械 .....          | ( 54 ) |
| 2-6.1 离心式风机 .....              | ( 54 ) |
| *2-6.2 旋转式风机 .....             | ( 55 ) |
| 2-6.3 往复式压缩机 .....             | ( 57 ) |
| 2-6.4 喷射泵 .....                | ( 58 ) |
| *§ 2-7 液体的机械搅拌 .....           | ( 58 ) |
| 2-7.1 混合机理 .....               | ( 59 ) |
| 2-7.2 搅拌器类型 .....              | ( 60 ) |
| 2-7.3 搅拌的流动形态和功率 .....         | ( 62 ) |
| *§ 2-8 量纲分析 .....              | ( 64 ) |
| 本章符号 .....                     | ( 67 ) |
| 复习题和思考题 .....                  | ( 68 ) |
| 习题 .....                       | ( 70 ) |
| *第三章 流体-固体颗粒间的运动和<br>流态化 ..... | ( 74 ) |
| § 3-1 流体通过填充床层的流<br>动 .....    | ( 74 ) |

|          |                |       |        |                  |       |
|----------|----------------|-------|--------|------------------|-------|
| 3-1.1    | 流体通过毛细管的流动     | (74)  | 4-4.4  | 强化传热过程的途径        | (128) |
| 3-1.2    | 流体通过颗粒床层的流动    | (75)  | § 4-5  | 热交换器             | (129) |
| 3-1.3    | 流体通过填料床层的流动    | (80)  | 4-5.1  | 列管式热交换器          | (130) |
| § 3-2    | 固体颗粒在流体中的运动    | (81)  | 4-5.2  | 其他热交换器           | (131) |
| 3-2.1    | 球形颗粒的沉降        | (82)  | *§ 4-6 | 辐射传热             | (135) |
| 3-2.2    | 沉降速度的计算        | (84)  | 4-6.1  | 基本概念             | (135) |
| 3-2.3    | 重力沉降的应用        | (87)  | 4-6.2  | 管式炉              | (138) |
| 3-2.4    | 离心沉降           | (88)  | 4-6.3  | 远红外和微波技术         | (140) |
| § 3-3    | 流态化            | (90)  | 4-6.4  | 三种传热方式的概括比较      | (141) |
| 3-3.1    | 流态化现象          | (90)  | 本章符号   |                  | (141) |
| 3-3.2    | 床层的压强降         | (92)  | 复习题    |                  | (142) |
| 3-3.3    | 临界流化速度         | (92)  | 习题     |                  | (143) |
| 3-3.4    | 带出速度           | (95)  | 第五章 吸收 |                  | (146) |
| 3-3.5    | 计算公式小结         | (96)  | § 5-1  | 概述               | (146) |
| § 3-4    | 流化床            | (97)  | 5-1.1  | 吸收的类型            | (146) |
| 3-4.1    | 流化床的类型         | (97)  | 5-1.2  | 吸收剂的选择           | (147) |
| 3-4.2    | 流化床的床径和总高      | (98)  | 5-1.3  | 吸收操作的条件          | (147) |
| 3-4.3    | 气体分布板          | (101) | § 5-2  | 吸收的相平衡           | (148) |
| 本章符号     |                | (101) | 5-2.1  | 亨利定律             | (148) |
| 复习题      |                | (102) | 5-2.2  | 用比摩尔分率表示的相平衡关系   | (149) |
| 习题       |                | (102) | 5-2.3  | 气体在液体中的溶解度       | (151) |
| 第四章 传热过程 |                | (105) | § 5-3  | 吸收速率             | (152) |
| § 4-1    | 概述             | (105) | 5-3.1  | 双膜理论             | (152) |
| 4-1.1    | 化工生产中的传热过程     | (105) | 5-3.2  | 分子扩散定律——费克定律     | (153) |
| 4-1.2    | 传热中的一些基本物理量和单位 | (105) | 5-3.3  | 吸收速率方程           | (154) |
| 4-1.3    | 稳态传热和不稳态传热     | (106) | *5-3.4 | 对流扩散和界面动力状态理论    | (159) |
| § 4-2    | 传导传热           | (106) | § 5-4  | 填料吸收塔的计算         | (159) |
| 4-2.1    | 热传导基本方程——傅立叶定律 | (106) | 5-4.1  | 填料层高度的计算式        | (160) |
| 4-2.2    | 平面壁的稳态热传导      | (108) | 5-4.2  | 吸收塔中的物料衡算——操作线方程 | (162) |
| 4-2.3    | 圆筒壁的传导传热       | (110) | 5-4.3  | 传质单元数的计算         | (163) |
| § 4-3    | 对流传热           | (112) | 5-4.4  | 传质单元高度的求算        | (169) |
| 4-3.1    | 对流传热机理         | (112) | 5-4.5  | 三传中的类似律          | (171) |
| 4-3.2    | 对流给热系数         | (113) | § 5-5  | 填料塔              | (172) |
| 4-3.3    | 对流给热系数的值       | (118) | 5-5.1  | 填料               | (172) |
| § 4-4    | 热交换的计算         | (118) | 5-5.2  | 填料塔的附属设备         | (175) |
| 4-4.1    | 总传热方程          | (118) | 5-5.3  | 液泛速度和塔径的计算       | (175) |
| 4-4.2    | 传热系数的大致范围      | (121) | 5-5.4  | 填料层的压强降          | (179) |
| 4-4.3    | 传热温度差          | (123) |        |                  |       |

|                           |       |                   |       |
|---------------------------|-------|-------------------|-------|
| *5-5.5 湍球塔                | (180) | *§ 6-6 多组分精馏      | (228) |
| *§ 5-6 绝热吸收               | (181) | 6-6.1 多组分精馏的方式    | (228) |
| *§ 5-7 化学吸收               | (186) | 6-6.2 多组分的气液平衡    | (229) |
| 本章符号                      | (189) | 6-6.3 关键组分        | (232) |
| 复习题                       | (190) | 6-6.4 捷算法求理论塔板数   | (232) |
| 习题                        | (190) | *§ 6-7 特殊蒸馏       | (235) |
| 第六章 精馏                    | (194) | 6-7.1 恒沸蒸馏        | (235) |
| § 6-1 精馏原理                | (194) | 6-7.2 萃取蒸馏        | (237) |
| 6-1.1 理想的二组分互溶体系          | (194) | § 6-8 板式塔         | (239) |
| 6-1.2 相对挥发度               | (196) | 6-8.1 泡罩塔         | (239) |
| 6-1.3 非理想的二组分互溶体系         | (198) | 6-8.2 浮阀塔         | (240) |
| 6-1.4 压强对气液平衡的影响          | (199) | 6-8.3 筛板塔         | (241) |
| 6-1.5 以 $t-x-y$ 相图表示的蒸馏过程 | (201) | 6-8.4 浮动喷射塔       | (241) |
| 6-1.6 以 $x-y$ 相图表示的蒸馏过程   | (201) | 6-8.5 旋流板塔        | (242) |
| § 6-2 简单蒸馏                | (204) | 6-8.6 塔板效率        | (242) |
| 6-2.1 简单蒸馏的操作和应用          | (204) | 6-8.7 填料塔与板式塔的对比如 | (243) |
| *6-2.2 简单蒸馏的计算            | (204) | 本章符号              | (244) |
| *6-2.3 闪蒸馏                | (207) | 复习题               | (244) |
| § 6-3 连续精馏                | (208) | 习题                | (244) |
| 6-3.1 精馏的依据               | (208) | 本篇主要参考书刊          | (249) |
| 6-3.2 精馏塔中物相组成的变化         | (209) | 附录 一些基础数据的算式      | (251) |
| 6-3.3 回流比                 | (210) | 附表                | (262) |
| 6-3.4 连续精馏的流程             | (211) | 一、单位换算            | (262) |
| § 6-4 连续精馏理论塔板数的计算        | (212) | 二、水的物理性质          | (264) |
| 6-4.1 计算的前提               | (212) | 三、一些液体的物理性质       | (265) |
| 6-4.2 精馏段操作线方程            | (212) | 四、一些有机物的蒸气压       | (266) |
| 6-4.3 提馏段操作线方程            | (213) | 五、饱和蒸汽表           | (268) |
| 6-4.4 理论塔板数的图解求算          | (213) | 六、一些气体的物理性质       | (270) |
| 6-4.5 理论塔板数图解求算的原理和逐板计算法  | (215) | 七、一些固体材料的导热系数     | (272) |
| 6-4.6 回流比与精馏的关系           | (216) | 八、扩散系数            | (272) |
| *6-4.7 进料状态对精馏的影响         | (220) | 九、气体在液体中的溶解度      | (273) |
| 6-4.8 捷算法求理论塔板数           | (223) | 十、B型水泵性能表(摘录)     | (275) |
| *§ 6-5 间歇精馏               | (225) | 十一、管壳式换热器系列标准(摘录) | (276) |
| 6-5.1 回流比不变下的间歇精馏         | (225) | 十二、一些传热系数的数据      | (277) |
| 6-5.2 间歇精馏的回流比的选择         | (227) | 十三、一些填料的性质        | (278) |

# 第一章 绪 论

化学工业是国民经济的重要部门之一。化学工业的产值在国民经济的总产值中占显著的比重，以世界范围来说，它以高于工业总产值平均增长的增长率持续发展,其增长情况为(年平均增长率，%)：

| 年 份         | 1950~1960 | 1960~1970 | 1970~1980 | 1982~1983 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 世 界 整 个 工 业 | 6.7       | 6.8       | 4.5       | 3.1       |
| 世 界 化 学 工 业 | 7.7       | 9.6       | 5.5       | 5.1       |

化学工业生产数以万计的产品，包括生产资料和生活资料。它与工农业生产、国防、科学研究和人民生活有着重要的关系。例如1984~1985年以营养成分 $N + P_2O_5 + K_2O$ 计的世界化肥产量为1.39亿吨（折合我国标准化肥为6.68亿吨）<sup>①</sup>，对促进农业高产稳产起了决定性作用(参见表1-1)；1980年世界单位土地面积平均施用的化肥量分别为32公斤/公顷（发展中国家）和149公斤/公顷(发达国家)，预测2000年时将分别增长到83和322公斤/公顷。三大合成材料中，塑料的生产是发展很快的，1976年产量为4771万吨，1985年已增长到7646万吨，一些主要的工业发达国家的塑料人均年消费量于八十年代初期已超过50公斤。1985年世界化学纤维产量为1613万吨，其中合成纤维为1280万吨，人造纤维为330万吨，占当年世界纺织材料总产量的1/2左右，即将超过天然纤维的产量。世界合成橡胶1975年的产量为686万吨，1984年为901万吨，远远超过天然橡胶的产量（1984年为434万吨）。高聚物的发展还逐步改变了国民经济中的材料结构，在很多场合下代替了金属和非金属材料，并表现出其优良的性能。再如医药方面，1977年世界年产值470亿美元，平均达11美元/人·年，2000年时预计产值2500亿美元，平均将为40美元/人·年。此外，化学工业提供的新型材料（耐高温、抗腐蚀和侵蚀、具有特种光学和电学性能、特硬、高强度以及特殊功能的材料）也加速了新兴工业

表 1-1 历年世界化肥消费量

| 年 份             | 1950      | 1960      | 1970      | 1980      | 1985      |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 消费量/百万吨（营养成分）   | 13.7      | 27.9      | 63.1      | 112.7     | 130.9     |
| 其中：N            | 3.8       | 9.8       | 28.7      | 57.2      | 70.1      |
| $P_2O_5$        | 5.8       | 9.8       | 18.9      | 31.6      | 34.1      |
| $K_2O$          | 4.1       | 8.3       | 15.5      | 23.9      | 26.7      |
| $N:P_2O_5:K_2O$ | 1:1.5:1.1 | 1:1.0:0.9 | 1:0.7:0.5 | 1:0.6:0.4 | 1:0.5:0.4 |

家）和149公斤/公顷(发达国家)，预测2000年时将分别增长到83和322公斤/公顷。三大合成材料中，塑料的生产是发展很快的，1976年产量为4771万吨，1985年已增长到7646万吨，一些主要的工业发达国家的塑料人均年消费量于八十年代初期已超过50公斤。1985年世界化学纤维产量为1613万吨，其中合成纤维为1280万吨，人造纤维为330万吨，占当年世界纺织材料总产量的1/2左右，即将超过天然纤维的产量。世界合成橡胶1975年的产量为686万吨，1984年为901万吨，远远超过天然橡胶的产量（1984年为434万吨）。高聚物的发展还逐步改变了国民经济中的材料结构，在很多场合下代替了金属和非金属材料，并表现出其优良的性能。再如医药方面，1977年世界年产值470亿美元，平均达11美元/人·年，2000年时预计产值2500亿美元，平均将为40美元/人·年。此外，化学工业提供的新型材料（耐高温、抗腐蚀和侵蚀、具有特种光学和电学性能、特硬、高强度以及特殊功能的材料）也加速了新兴工业

① 我国规定的标准化肥指标：氮肥含N 21%；磷肥含 $P_2O_5$  18%；钾肥含 $K_2O$  25%。

和科学研究的发展。化工的新技术,不仅减少了化工自身对原料和能量的消耗,开发了新工艺,也对能源和原料提供了新的有希望的技术路线,如煤的气化、合成气化工、水制氢的新技术、模拟酶的应用等。

§ 1-1 本课程的内容

化学工业本身包括有种类繁多、形态殊异的各种化工生产过程,各个生产过程也由多个环节所组成。尽管如此,任何化工生产过程总涉及到两个基本内容:工程和工艺。与此相应,本课程的内容也包括化学工程和化学工艺两个部分。

化学工程研究和探讨的是化工生产过程中共同性操作的规律及其工程性质的问题。尽管化工生产过程有千殊万别的生产流程,并有型号繁多的装置设备,但它们总可以分解并归纳为在原理上相同或相似的一些基本单元,从属于一定的变化规律。任举两个化工生产过程,如尿素生产和丙烯腈合成为例,如图 1-1 和 1-2 所示。从工艺上来说,这是两个迥然不同的反应,尿素生产中所涉及的是气液相非催化反应,反应比较简单,经过生成中间产物氨基甲酸铵的阶段,产物只有尿素和水。丙烯腈合成则是气固相催化反应 有多个副反应同时发生,生成多种产物。但从工程角度分析,可以将其单元归纳为一些基本类型,其设备设计、过程放大、操作控制等均遵循某些基本规律,如表 1-2 所示。

按上述方式将繁多的化工反应过程进行分析,可归纳为常称的“三传一反”,即动量传递(常指流体动力过程)、热量传递、质量传递和化学反应工程。包括上述内容的化学工程,是为解决化工生产过程中的以下问题的:

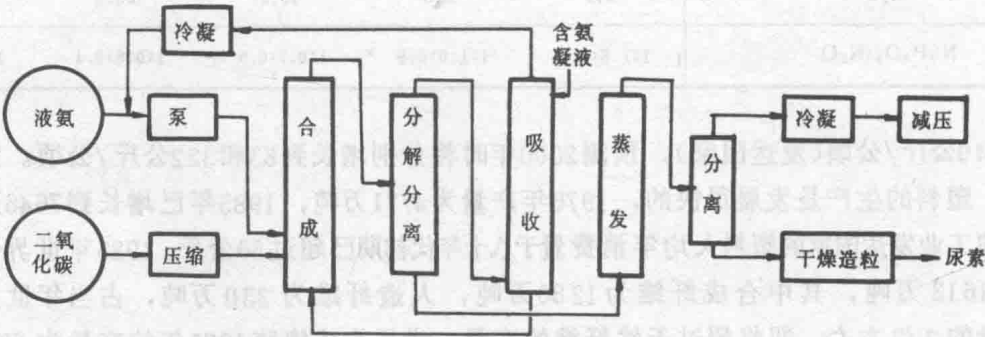


图 1-1 尿素生产流程

- (1) 设计高效能的装置和设备,使之具有高的生产能力;改进现有的设备,使其性能更为完善。
- (2) 确定操作的适宜条件和允许的变动范围,使生产尽可能地在最高效率点的附近进行,并预先估计到可能发生的波动及预防措施。
- (3) 获得高的物料利用率,进行综合利用,并尽可能地充分利用能量和节约能量,取得

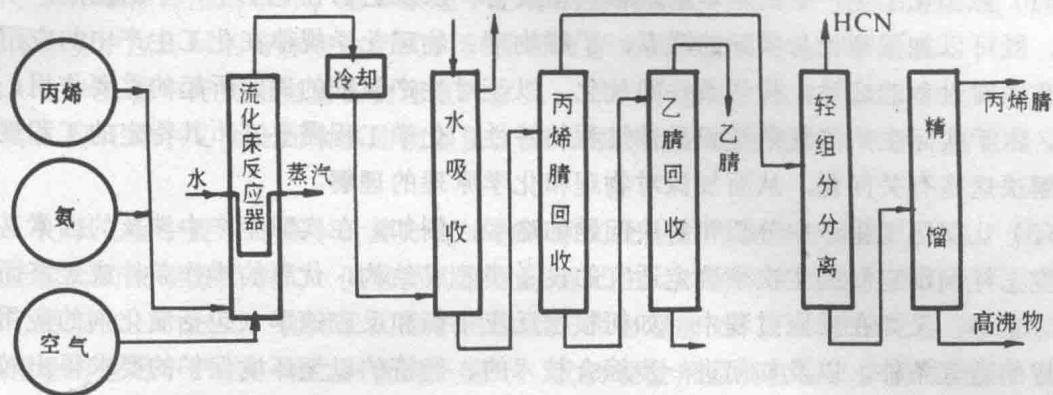


图 1-2 丙烯腈合成的流程

表 1-2 尿素生产和丙烯腈合成中的基本单元

| 过 程    | 尿 素 生 产 中                        | 丙 烯 腈 生 产 中                         | 主 导 规 律       |
|--------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| 流体动力过程 | 流体的输送<br>气体的压缩<br>气液的分离<br>系统的减压 | 流体的输送<br>催化剂的流化                     | 流体静力学和动力学规律   |
| 热量传递过程 | 蒸馏中的加热<br>蒸气的冷凝<br>蒸 发           | 流体间的换热<br>加 热<br>冷 凝                | 传导、对流、辐射的传热规律 |
| 质量传递过程 | 精馏（气液间的传质）<br>干燥（气固间传质）          | 精馏（气液间传质）<br>吸收（气液间传质）<br>解吸（气液间传质） | 相平衡和两相间扩散传质规律 |
| 化学反应过程 | 尿素合成反应                           | 丙烯腈合成反应<br>中和反应                     | 综合传递过程和化学反应规律 |
| 机械操作   | 固体输送                             |                                     | 力学规律          |

合适的经济效果。

(4) 将实验室试验或中间工厂中试结果进行工程放大，即进行过程的开发，使科研成果能在工业上迅速得到应用。

(5) 指导实验室或中试工作，获取能扩大应用于工业生产的试验数据。

本书中涉及的化学工艺，是几个典型的化工生产如合成氨、石油化工等的生产全过程。它的重点是根据物理化学原理，结合技术经济原则，将物料及能量充分利用，降低投资和生产费用，提高劳动生产率，避免污染环境，选用可取的原料和技术路线，确定最优的工艺条件，制定合理的生产流程等。

## § 1-2 学习本课程的目的

根据化学系的培养目标，学习《化工基础》课程的主要目的在于：

(1) 熟悉化工生产中的基本原理和典型设备, 以及它们在化工生产中的应用: 学习化工基础, 既可以加强理论与实际的联系, 了解物理、物理化学规律在化工生产中的应用, 在实际工作中对设备的选择, 操作条件的优化, 以至对生产流程的确定所起的重要作用; 又可以认识, 由于实际生产的复杂性和具体过程的特性, 化学工程需要开拓其特定的工程规律和方法来解决这些有关问题, 从而加深对物理和化学原理的理解。

(2) 认识化工生产中分析和解决问题的途径: 例如, 在实际生产中涉及的因素甚多, 需要研究怎样判别它们的主次来确定适宜的设备类型或结构, 优惠的操作条件或经济而适用的加工方案等。又如在反应过程中, 如何根据反应平衡和反应速率 (包括催化剂的应用) 以得出反应的适宜条件, 以及如何进一步综合技术的、经济的以至环境保护的要求得出较好的工艺流程。再例如在工业实际生产中, 化学反应自身的特性 (如可逆或不可逆, 简单或复杂, 吸热或放热, 反应的级数和历程等) 固然对反应器的选型和结构有重要的作用, 而反应器的操作方式和反应物的流动形态也会对反应的转化率和产物的分布有一定程度的影响; 即对影响因素要从多方面来考虑和分析。通过本课程的学习, 可以初步了解化工生产中涉及到的问题的特点, 分析的思路, 以及怎样来判别和解决。

(3) 有助于指导化学科研工作: 将实验室试验结果应用到实际生产, 称之为过程的开发; 将小型或中型试验扩大为工厂规模的生产, 称之为过程的放大。过程是否能开发放大或值得开发放大, 是评价科研成果能不能取得实效的重要标志。这些不单纯取决于是否在实验室中探索出反应的适宜条件, 而是有相当多的工程因素和实际条件应当予以考虑。例如有不少化学科研工作在实验室取得较好的结果, 但并不能用于生产。究其原因, 主要是因为有关人员缺乏化工生产的基本知识, 有的在确定原料路线时没有考虑到技术经济原则, 有的在选择加工方案时没有考虑到能量或原料的充分利用, 有的在确定工艺条件时没有考虑到实际生产的情况, 有的在制订流程时忽略了某些环境保护的要求, 有的虽然获得优惠的工艺条件, 但没有提供必要的工程放大数据等等。从另一个角度讲, 学习化学工程也有助于改进实验室的装置及其组合, 以及实验的操作方式、方法和条件, 即对实验的优化可提供指导性的意见, 使科研取得更好的成果。

各门学科都有它自身的特点。学习时要针对学科的特点改进学习方法, 才能取得较好效果。现提出以下几点供学习时参考:

(1) 化工基础是一门综合性的课程, 它处理实际化工生产的有关问题并探讨其原理和规律时, 涉及的面很广, 牵连的因素很多, 显然, 对这些因素不能等量齐观, 而应当通过分析, 分清主次, 搞清主次间的相互关系。只有这样, 才可以理解得较深刻, 所获得的知识不是零碎的和孤立的, 而是较系统和较完整的。

(2) 与其他课程一样, 学习时首先要理解各章中的基本概念、基本原理和基本运算方法, 然后在此基础上联系实际, 逐步深入。

以《流体的流动与输送》这一章为例, 在基本概念方面, 除了了解有关流体的物理概念之外, 对新引入的工程学中的流体流动形态、流动边界层和无量纲的雷诺准数的含义及作用要充分理解。在此基础上才能对有关的基本原理和阻力计算公式 (泊稷耳公式及范宁公式) 有

清晰的了解并懂得其应用条件。基本原理中还有柏努利公式，只有对该公式的本质（能量守恒在流体流动中应用时的特殊表达形式）和各项的意义搞清楚，才能灵活应用。

(3) 化学工程中需要相当重视物理量的意义、单位和量纲。这是因为工程上涉及到相当多的计算，而计算中又涉及到众多的物理量。如果对物理量缺乏明确的理解，就容易引起混淆。

(4) 化学工程中要求对基本计算方程的物理意义及应用的条件有清晰的了解，但并不要求记熟经验公式或准数关联式（但重要的准数应当记住）。根据以往经验，工程运算中的大部分错误主要来自三个方面：套用公式而不明确公式的物理意义，不掌握公式应用的前提或条件；物理量的运用不严格，单位或量纲不统一，或物理量单位没有经过必要的换算；计算时没有选用一定的基准，以致先后数据混淆。

### § 1-3 化学工程和工艺中的一些基本规律

化学工程和工艺中普遍地起作用的基本规律有：质量守恒，能量守恒，以及有关平衡和过程速率的规律

#### 1-3.1 质量守恒

质量守恒定律在化学工程和工艺中表现为物料衡算。在稳态条件下，物料衡算指出：

$$\text{输入物料} = \text{输出物料}$$

物料衡算虽然简单，但在化工生产过程中起重要的作用，例如：

- (1) 根据处理的物料量，确定设备的某些主要尺寸或规模（如吸收塔的塔径）。
- (2) 拟订加工的方案和选择流程（如按所处理的量确定是否应当综合利用以及三废的处理方案）。
- (3) 确定实际转化率下物系距平衡的远近，从而了解过程推动力的大小（如传质过程中的操作线）。
- (4) 揭示操作偏离正常情况的程度，为进一步改进提供依据。

#### 1-3.2 能量守恒

能量守恒定律在化学工程和工艺中表现为能量衡算。能量衡算指出：

$$\text{输入能量} = \text{输出能量}$$

在有反应热效应的场合下：

$$\text{输入能量} + \text{反应释出能量} = \text{输出能量} + \text{系统中积累能量}$$

化学工程和工艺中也常用到热量衡算。

象物料衡算一样，能量衡算主要起以下作用：

- (1) 根据能量的形式及其转化，确定能量输入或输出的基本方法和措施（如加压或减压，加热、冷却或冷冻，蒸发或冷凝等）。
- (2) 根据过程需要输入或输出能量的数值，确定设备的基本尺寸（如流体输送泵的功率、换热器的面积等）。

(3) 根据能量的关系, 确定能量综合利用的途径(如副产蒸汽或研究过程能否利用过程释出的能量等)。

(4) 根据能量衡算, 预计反应或过程进行的情况及必需采用的措施(例如预先估算出放热反应可能引起的绝热温升等)。

(5) 考察操作偏离正常情况或设计条件的程度。

### 1-3.3 平衡关系

有关平衡的规律可以预告过程能够到达的极限, 例如连通器中的液面最终是处于同一水平面, 换热的极限是换热终了处冷热液体温度相同, 气体吸收的极限是当时条件下气体在液体中的溶解度, 反应的极限是当时条件下的平衡转化率等。因此, 平衡条件指出:

(1) 当时条件下物料或能量能够利用的极限, 从而可以确定加工的方案(如转化率低的用循环利用的方法)。

(2) 考察外界参数(如系统的压强和温度)对平衡的影响和体系物性(如反应物浓度、添加剂的数量)对平衡转化率的作用, 可以找出最大程度利用物料或能量所应选择的条件。

(3) 可以用实际操作结果与平衡的数据的比较作为衡量过程的效率, 从而找出改进的方法(如塔设备的塔板效率, 或是改进塔板结构, 或是改进操作条件)。

### 1-3.4 过程速率

过程速率决定设备的生产能力。显然, 过程速率越高, 设备生产能力越大, 或设备的尺寸越小。过程速率可用如下的基本关系表达:

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

过程的推动力是过程在该瞬时距平衡的差额, 它可以是压强差、温度差或浓度差等。实际生产中都力求有较高的过程速率, 它可以用增大过程的推动力来得到, 如流体流动过程中加大压强差, 热交换时提高温度差, 传质时提高浓度差, 反应时提高浓度差等。过程速率也可以通过减少阻力的办法来提高, 如流体输送时加大管径, 对流传热时附加搅拌, 传质时提高流体的湍动程度, 多相传质时降低扩散阻力, 反应时用催化剂降低活化能等。采用各种措施来提高过程速率时, 要考虑到所选用的措施不应降低物料和能量的利用率, 或引起副作用或副反应的发生, 也不宜增添过多设备而使投资过分提高。总之, 由于化工生产的多样和复杂, 要针对具体过程的特点采用合适的手段和措施。

在考察过程速率时, 要注意到对整个过程起决定作用的控制步骤或控制因素。一个过程常由多个步骤或单元组成。如流体流动要通过由多个管子、管件和测量仪表构成的管路; 加热或蒸发时热量要由高温介质经器壁再传入被热物质; 蒸馏或萃取时组分要从一相中扩散、再经界面后进入另一相中。此时, 过程的总阻力为各步骤的阻力之和。然而, 当其中某一步骤的阻力远远大于其他步骤的阻力时, 该步骤就对过程速率起关键作用。如管内通蒸汽加热管外空气时, 由于空气传热差, 空气这一侧就成为传热的控制步骤。当推动力一定时, 要提高过程速率, 应着重降低控制步骤的阻力。

此外, 化学工程和工艺除引用物理、化学、工程学中的重要原理和定律外, 本身也有其

重要的基本概念（如压头、准数、比摩尔分率等）、基本原理（如边界层理论、双膜理论、扩散模型等）和基本运算（如图解积分、解析积分等）。这些在学习以下各章时应注意并掌握。

## §1-4 化工过程开发

化工过程开发是指将实验室研究扩大为生产规模，使新产品、新工艺或新技术在工业装置中运转或转变为生产的全过程。开发工作涉及到化学、化学工艺、化学工程、机械工程、测量控制、材料与防腐、技术经济等多个学科领域。过程中包括有：研究和实验、扩大试验、设计、施工、试生产以至正规生产等环节，需要各方面的专业人员配合。将科研成果迅速转变为生产力，缩短从实验过渡到工业化的开发周期，提高放大倍数和减少开发的中间步骤，已成为人们密切关注的课题。随着化学科学中的不断创新和化学工程的迅速发展，尤其是化学反应工程的创设和充实，以及新材料和先进装备的应用，在化工过程开发中已不再全凭经验，而是运用化学工程的理论和方法，用数学模拟放大，加速化工新过程的开发和化学工业的发展。

化工过程开发的步骤主要有：实验室研究，可行性研究（包括资料收集、概念设计或工艺方案设想，过程评价），中间试验，工业装置设计和评价，工业装置建立等。

### 1-4.1 实验室研究

化工过程开发中的实验室研究是指对要开发的项目进行技术方案、原料路线、生产方法和操作条件等方面的实验研究。为区别于实验室的基础理论研究和探索性研究，过程开发所进行的一系列研究称为开发性实验室研究，因规模较小，一般也称为小试。

开发性实验室研究通常完成以下任务：

(1) 评选研究的原料路线和工艺方案，确定操作的合宜条件。

这方面的任务包括有：确定反应实现的可能性和必要条件，通过一系列的实验和依据必要的理论指导，归纳出为获得高的目的产物产率或其他生产指标的合宜条件，观测可能发生的副反应及其进行的程度，以及为得到产品的指定纯度而确定应采用的分离，提纯或提浓的方法。

在实验室的开发性研究中，要对制得同一产品的不同过程和方法作出比较。其中，评选原料路线时要考虑到原料供应应有保证，价格合宜；易于精选，性能稳定，贮运方便；加工步骤相对简单，技术条件不过于苛刻；能制得合乎质量标准的产品；对环境不污染或少污染，三废易于治理而达到排放标准。

此外，分离过程在化学科研和化学实验室中很少受到特殊关注，但在实际生产中却起很大作用，在投资、设备、操作各方面都占相当比重。开发研究中应当对目的产物的分离方法进行探索 and 选择。

(2) 获得开发所需要的热力学和动力学数据，尤其是有关反应速率资料，并且测定一些必要的物性数据。

### 1-4.2 可行性研究

可行性研究是对要开发的项目进行研究,并作出评价,判断是否宜于开发主要包括:

(1) 技术上的可行性:工艺是否合理,技术是否先进,生产是否安全,开发的风险如何,操作控制技术难易程度,产品质量指标能否符合要求,开发的周期,过程的能耗,腐蚀及耐腐蚀措施等。

(2) 过程的经济效益:工业化的投资和盈利估测,产品的成本,经济价值和社会效益,原料和能源的来源及供应,产品的市场需求及其发展预测等。

(3) 环境保护的研究:三废的数量及治理方案,可能对环境的沾污程度,劳动保护或安全生产措施等。

#### 1-4.3 中间试验

中试目的是为求取建造大型工业装置所缺少的数据资料,并验证已掌握的数据。中间试验装置也称为试验工厂,是按照小试归纳的数据和资料设计建立的。中试为解决以下任务:

(1) 在中试装置中,因小型工业设备处理实际的原料,按照实验室获得的合宜条件,制取合乎规格的产品,以考察按小试制订的流程是否完善,在中试过程中对工艺充实和修改。

(2) 在中间工厂中考察设备设计的情况,通过中试的操作经验,检验和修正数学模型,完善设备的造型和设计。

(3) 在中间试验中确定生产的测量、调节和控制方法,包括编制微机控制程序。

(4) 考核杂质积累或设备材料等对过程和产品质量的影响。

(5) 确定材料的耐腐蚀程度,评选出器械的结构材料或宜采用的防腐蚀措施。

(6) 根据中试操作的经验,拟订出产品质量指标和正确的操作规程。

(7) 提供小批量产品,供用户使用或开发其用途,考核产品的加工或使用性能。

(8) 编制接近于实际生产条件下的物料衡算和能量衡算表,制订物料和能量综合利用的方案,确定实际的消耗指标,预测工厂生产所能取得的产率,组成经济核算,估测经济效益。

中试装置取得成果,进行了不同条件下的比较试验,找出优惠条件,或取得成功的操作经验和确定设备造型后,通过评价或再次可行性调研,开始工业装置的设计。

#### 1-4.4 工业装置的设计和投产

工业装置的设计由专职人员进行,以下仅介绍一些有关的基本概念。

(1) 装置规模是指装置在正常运转时每年可生产的合格产品的产量。规模大小取决于市场对产品的需要量、技术上的可能、经济核算等因素。也可以分期扩建。在确定装置规模时,各部分的处理能力要匹配,使装置的投资费用最小。

通常规定装置每年操作300~330天,即7200~8000小时(对连续操作),其余为维修时间。一般预计每年或每两年停车大修一次,特殊情况则机动处理。

(2) 设计前要有较精确的费用估算。各项费用有:开发费、投资费(包括基建、设备和机器等)、原料费、生产费(指生产必须的能量和辅助原料的费用,能量有蒸汽、电能、燃料以及冷却水、冷剂和压缩空气,典型的辅助材料有惰性气体、溶剂、催化剂等)、工资和其他费用。通过费用估算,求得产品成本。

多数化学生产过程耗能很大。一个化工装置的经济性往往与能量的合理分配和利用有关,