



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

化
学
工
程
基
础

武
汉
大
学
主
编

高
等
教
育
出
版
社



化学工程基础

武汉大学 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

面向 21 世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century

化学工程基础

武汉大学 主编



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

内容提要

本书是教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”的研究成果,是“面向 21 世纪课程教材”。本书既介绍了一些传统的化工过程及设备,又介绍了一些化学工程技术的新进展,内容侧重于理科化学及应用化学专业学生所必须了解或掌握的化学工程学及化学反应工程学方面的基本知识,包括流体流动与输送、传热、吸收、精馏、新型分离技术以及均相反应器、气固相催化反应器和生化反应器。

本书可作为综合性大学或师范院校理科化学类专业的化工基础课程教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础/武汉大学主编. —北京:高等教育出版社,

2001.7

面向 21 世纪课程教材

ISBN 7-04-009329-4

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 07884 号

化学工程基础

武汉大学 主编

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>

<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所

印 刷 国防工业出版社印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 2001 年 7 月第 1 版

印 张 28.75

印 次 2001 年 7 月第 1 次印刷

字 数 530 000

定 价 24.10 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

前 言

根据教育部关于高等理科教育面向 21 世纪进行教学内容和课程体系改革的精神,在高等教育出版社的积极支持和具体组织下,由武汉大学、南开大学、兰州大学和厦门大学四校共同编写了这本《化学工程基础》教材,供理科化学专业和应用化学专业开设“化工基础”课程使用。

在理科化学系开设化学工程方面的课程由来已久,自建国以来其教学内容已由“工业化学”、“化学工艺学”和“化工原理”逐渐演变成为今日的“化学工程基础”。

理科化学和应用化学专业培养的人才,应当既具有扎实的基础理论知识,又具有联系实际分析问题和解决问题的能力。化工基础课程担负的任务是:传授化工基础知识、培养学生的技术经济观点、提高他们从事应用和开发研究的能力,使他们在科技成果转变为生产力的过程中能较好地与工程技术人员相互配合。

本书在编写过程中着重考虑了以下几点:

一、针对理科学子缺乏工程技术知识的实际情况,增加了关于化学工业与化工生产过程的一般性介绍,以便学生在接受化学工程知识之前,对化学工业和化工生产过程有所了解。

二、在“流体流动”、“传热”和“传质”等三个传递过程的内容中,着重介绍了过程的基本原理和处理工程问题的思想方法,适当削减了以设备设计为目的的有关工科专业视为重点的内容,增加了反映学科发展的若干新知识,如膜分离技术、超临界萃取技术、反应与分离联用技术、变压吸附技术以及新型加热技术等。

三、在化学反应工程学的内容中,将基础知识单列一章,着重介绍建立数学模型的思想方法,同时将均相反应过程和多相催化反应过程各单列一章,试图加强有关内容的深度和广度。

四、考虑到现代化学工业和生物技术的相互渗透,增加了生化反应器一章。由于生化反应器和化学反应器有许多相似之处,故在介绍了化学反应工程的基本知识后,再介绍生化反应器,所占篇幅不大,但内容却获得了较宽的拓展,扩大了学生的工程技术知识视野。

参加本书编写的有武汉大学马玉龙(第一章,第八章,第九章)、周新花(第二章和第十章),南开大学李富生(第六章)、刘展红(第十一章),兰州大学严世强(第四章和第五章),厦门大学凌敬祥(第三章)、邓旭(第七章),全书最后由马玉

龙整理定稿。

本书初稿承蒙福建师范大学蒋家俊老师审阅,提出了许多宝贵意见;武汉大学化学系郑洁修老师对初稿又作了多处修改,付出了辛勤的劳动;在编写和出版过程中,浙江大学俞庆森老师、北京师范大学王定锦老师、高等教育出版社王蕙婍老师和南京大学芮必胜老师等提出了许多很好的意见和建议,在此一并致谢。

由于作者学识水平有限,本书还会有许多不足之处,恳请读者指正,并将改进意见反馈给我们,以便再版时修改。

编 者

2000年11月

责任编辑 殷继祖 王蕙婵
封面设计 张楠
责任绘图 李维平及社外
版式设计 周顺银
责任校对 康晓燕
责任印制 杨明



目 录

第一章 化学工业与化学工程	(1)
§ 1 化学工业概述	(1)
1-1 化学工业发展概况	(1)
1-2 我国化学工业的发展和现状	(3)
1-3 化学工业的特点和发展趋势	(4)
1-4 化学工业分类	(8)
§ 2 化工生产过程	(10)
2-1 化工生产工艺及流程	(10)
2-2 三废治理和环境保护	(12)
§ 3 化学工程学科	(13)
3-1 化学工程学的内容	(14)
3-2 几个常用基本概念	(15)
§ 4 实验室研究与化工生产的差别	(16)
4-1 化学实验室研究与化工生产的差别	(17)
4-2 从实验室研究到工业化生产	(18)
第二章 流体流动与输送	(20)
§ 1 流体静力学	(20)
1-1 密度和相对密度	(20)
1-2 压强	(21)
1-3 流体静力学方程	(22)
1-4 流体静力学方程应用举例	(23)
§ 2 流体流动	(24)
2-1 流体的流量和流速	(25)
2-2 定常态流动与非定常态流动	(26)
2-3 流动型态	(26)
2-4 牛顿粘性定律	(28)
2-5 流动边界层	(29)
2-6 动量传递概念	(31)
2-7 流速分布	(32)
§ 3 流体流动系统的质量衡算	(34)
§ 4 流体流动系统的能量衡算	(35)
§ 5 管内流动阻力	(38)

5-1 沿程阻力损失计算和量纲分析方法	(39)
5-2 局部阻力损失计算	(43)
§6 流体流量的测量	(48)
6-1 孔板流量计	(48)
6-2 转子流量计	(50)
§7 流体输送设备	(52)
7-1 离心泵	(52)
7-2 往复压缩机和往复泵	(60)
7-3 旋转泵	(64)
7-4 真空泵	(65)
习题	(66)
第三章 传热过程	(70)
§1 热传导	(70)
1-1 傅立叶定律	(70)
1-2 导热系数	(71)
1-3 单层及多层平面壁的定常态热传导	(72)
1-4 单层和多层圆筒壁定常态热传导	(74)
§2 对流传热	(75)
2-1 牛顿冷却定律	(76)
2-2 有效膜的概念	(76)
2-3 用量纲分析法求无相变时流体的传热膜系数 α	(77)
2-4 流体无相变时强制对流传热膜系数的关联式	(79)
§3 热辐射	(82)
3-1 基本概念	(82)
3-2 斯蒂芬-波尔兹曼定律	(83)
3-3 实际物体间的辐射能力	(83)
3-4 实际物体间的辐射传热	(84)
§4 热交换的计算	(85)
4-1 热流量方程与传热系数	(85)
4-2 传热的平均温度差	(87)
§5 间壁式热交换器	(94)
5-1 夹套式换热器	(94)
5-2 蛇管式换热器	(95)
5-3 套管式换热器	(95)
5-4 列管式换热器	(95)
5-5 板式换热器	(96)
5-6 翅片管换热器	(97)
5-7 板翅式换热器	(98)

5-8 热管换热器	(99)
5-9 各种间壁式换热器的比较和强化传热的途径	(100)
§ 6 加热技术	(102)
6-1 高频介质加热和微波加热	(103)
6-2 红外线加热技术	(104)
习题	(105)
第四章 传质过程	(108)
§ 1 传质分离过程概述	(108)
1-1 传质分离操作在化工生产中的作用	(108)
1-2 传质分离操作的种类	(109)
§ 2 传质过程机理	(110)
2-1 单相中的传质	(111)
2-2 相间传质	(125)
习题	(126)
第五章 吸收	(128)
§ 1 化工生产中的吸收操作	(128)
1-1 吸收操作的类型	(128)
1-2 吸收操作	(129)
1-3 吸收剂的选择	(132)
§ 2 气液相平衡关系	(133)
2-1 溶解度曲线	(134)
2-2 亨利定律	(135)
2-3 亨利定律的其他形式	(135)
2-4 相平衡与吸收过程的关系	(139)
§ 3 吸收速率方程	(143)
3-1 分吸收速率方程	(143)
3-2 总吸收速率方程	(146)
§ 4 吸收塔的计算	(151)
4-1 吸收塔物料衡算和操作线方程	(152)
4-2 吸收剂用量的确定	(155)
4-3 吸收塔塔径计算	(162)
4-4 吸收塔填料层高度计算	(162)
§ 5 多组分吸收简介	(176)
习题	(177)
第六章 精馏	(182)
§ 1 气液相平衡	(182)
1-1 $x-y$ 相图	(182)

1-2 气液相平衡方程	(184)
§2 精馏原理	(187)
2-1 精馏基本原理	(187)
2-2 精馏流程	(189)
§3 双组分连续精馏的物料衡算和能量衡算	(190)
3-1 恒物质的量流假定	(190)
3-2 物料衡算和热量衡算	(191)
§4 理论塔板数的计算	(197)
4-1 逐板计算法	(197)
4-2 图解法	(199)
4-3 回流比的影响及选择	(203)
4-4 进料热状况的影响	(207)
4-5 简捷法求理论塔板数	(208)
4-6 塔板效率和实际塔板数	(209)
§5 间歇精馏	(212)
5-1 间歇精馏的特点	(212)
5-2 恒回流比操作时的间歇精馏计算	(213)
§6 多组分精馏和其他精馏方法简介	(217)
6-1 多组分精馏	(217)
6-2 共沸精馏	(218)
6-3 萃取精馏	(220)
§7 传质设备	(221)
7-1 评价塔设备的指标	(221)
7-2 填料塔	(222)
7-3 板式塔	(226)
习题	(232)
第七章 新型分离技术	(235)
§1 膜分离技术	(235)
1-1 分离用膜和膜分离设备	(236)
1-2 反渗透	(240)
1-3 超滤	(244)
1-4 电渗析	(247)
1-5 气体的膜分离	(250)
1-6 液膜分离	(252)
§2 超临界萃取	(256)
2-1 超临界萃取	(257)
2-2 用超临界技术处理废水	(263)

§3 反应和分离联用技术	(264)
3-1 反应精馏	(264)
3-2 反应萃取	(267)
§4 变压吸附分离	(271)
4-1 概述	(271)
4-2 变压吸附操作原理	(272)
4-3 变压吸附工艺流程	(273)
4-4 变压吸附的应用	(274)
习题	(275)
第八章 化学反应工程学基本原理	(276)
§1 工业反应器的基本类型	(276)
1-1 间歇操作搅拌釜式反应器	(277)
1-2 连续操作搅拌釜式反应器	(277)
1-3 连续操作管式反应器	(278)
1-4 多釜串联反应器	(278)
§2 化学反应的转化率和收率	(279)
2-1 反应进度	(279)
2-2 转化率	(280)
2-3 收率和选择性	(281)
§3 流动系统的反应动力学	(282)
3-1 流动系统的反应速率和反应时间	(282)
3-2 气相反应的膨胀因子	(284)
3-3 气相流动系统的动力学方程	(285)
§4 反应器内物料的流动模型	(287)
4-1 全混流模型	(287)
4-2 活塞流模型	(287)
4-3 非理想流动模型	(288)
§5 反应器内物料的停留时间分布	(289)
5-1 分布函数的概念	(290)
5-2 停留时间分布函数的测定	(292)
5-3 停留时间分布函数的数字特征	(296)
§6 几种流动模型的停留时间分布函数	(298)
6-1 活塞流模型	(299)
6-2 全混流模型	(299)
6-3 多级全混流模型	(301)
6-4 轴向扩散模型	(304)
习题	(307)

第九章 均相反应过程	(310)
§1 均相反应动力学	(310)
§2 间歇操作反应器	(311)
§3 连续操作管式反应器	(313)
§4 连续操作釜式反应器	(316)
§5 多釜串联反应器	(321)
§6 均相反应过程优化和反应器选择	(325)
6-1 以生产强度为优化目标	(325)
6-2 以产率和选择性为优化目标	(327)
习题	(329)
第十章 气-固相催化反应过程	(334)
§1 气-固相催化反应动力学	(334)
1-1 表面反应动力学模型	(335)
1-2 外扩散的影响	(339)
1-3 内扩散的影响	(341)
§2 固定床催化反应器	(344)
2-1 固定床催化反应器的类型	(344)
2-2 固定床催化反应器计算	(346)
§3 固体流态化和流化床反应器	(350)
3-1 固体流态化	(350)
3-2 流化床反应器	(353)
3-3 流化床反应器放大应考虑的问题	(357)
§4 反应器操作温度最佳化	(359)
4-1 最佳温度和平衡温度	(359)
4-2 最佳温度分布的测定和实施	(362)
§5 反应器的热稳定性	(367)
5-1 反应器热稳定性判断	(367)
5-2 化学反应的生热曲线	(368)
5-3 反应器的去热曲线	(369)
5-4 反应器热稳定性的控制	(370)
5-5 工业上保证热稳定性的措施	(372)
习题	(376)
第十一章 生化反应器	(378)
§1 生物和酶催化反应	(379)
1-1 生物和酶催化反应的特点	(379)
1-2 酶催化剂的主要类型和用途	(380)
§2 生物和酶反应动力学	(385)

2-1 酶催化反应动力学	(385)
2-2 生物反应动力学	(396)
§3 生化反应器	(401)
3-1 生化反应器类型	(401)
3-2 生化反应器的计算	(405)
习题	(409)
附录	(412)
索引	(438)
主要参考文献	(444)

第一章 化学工业与化学工程

化学工业是综合运用化学和物理方法将原料加工成化学产品的加工工业。我国的化学工业主要包括生产化学肥料、化学农药、三酸两碱(硫酸、硝酸、盐酸、烧碱和纯碱)、无机盐、染料、涂料、化学试剂、助剂、感光材料、磁性记录材料、有机化工原料、合成橡胶、塑料和化学纤维等的企业和部门。化工产品的应用十分广泛,几乎渗透到国民经济的各个领域和人类衣、食、住、行的各个方面。如合成橡胶、塑料和合成纤维现已取代许多传统的天然材料;而大量的化肥、农药等农用化学品使农业丰收有了保障;各种合成新药已为人类的健康发挥了重要作用;而许许多多微电子工业专用的化工产品又是当今信息社会发展的支柱。因此,化学工业在国民经济中的地位和作用将会愈来愈显著。

§ 1 化学工业概述

1-1 化学工业发展概况

化工生产走出作坊,发展成为具有一定规模的化学工业始于18世纪生产酸、碱和盐的无机化学工业。当时在英国发生了以机械行业为先导的世界第一次产业革命,推动了纺织工业和化学工业的迅速发展。1746年,英国人罗巴克(Robuck J)首创铅室法制取硫酸,被称为世界上第一个典型化工厂。1791年法国人路布兰(Leblanc N)提出用食盐、石灰石、硫酸和煤炭为原料的制碱方法获得专利并投入生产,带动了玻璃和肥皂等工业的发展,成为近代化学工业发展的重要里程碑。路布兰法的缺点是,固相反应原料利用率低,不易实现连续化生产,且产品的纯度较低。1861年,比利时人索尔维(Solvay E)用食盐和石灰石为原料,并以氨作媒介,合成了纯碱,成为近百年来最普遍采用的制碱方法——氨碱法。氨碱法虽然比路布兰法优越得多,但该法使过半的原料生成了用途有限的氯化钙废渣,影响了氨碱法的制碱成本。我国化工先驱侯德榜,1941年发明了侯氏制碱法(现称联碱法),他将纯碱与合成氨的生产结合起来,利用氨和副产物二氧化碳与氯化钠作用,制成碳酸钠和氯化铵,使食盐的利用率提高到95%以上。因此侯氏制碱法很快被不少国家所采用。

1905年,德国化学家哈伯(Haber F)发现在高温高压下用铁催化剂可以使氢气和氮气反应生成氨,并获得专利。德国巴斯夫公司(BASF)充分估计到了合成氨的巨大经济效益,立即购买了哈伯的专利,并协助哈伯研制了价廉易得的铁催化剂,于1913年正式投产。该工艺技术的成功,被看成是现代化学工业的起点。

在无机化学工业发展的同时,只能从天然资源中提取有机化合物的局限终于被突破。1828年,从氰酸铵合成尿素获得成功,标志着人工合成有机化合物的开始。从19世纪中叶到20世纪初,人工生产醋酸和糖精的技术都有了一定进展。在这一时期内,生产有机物的原料均以煤和农副产品为主,如用煤焦油为原料生产了染料、医药、农药和香料,用农副产品为原料生产了酒精、丙酮和醋酸等。进入20世纪30年代,随着石油和天然气的开发,极大地丰富了有机化学工业的原料来源,从而使有机化学工业进入了蓬勃发展的新阶段。

有机合成化学的发展,又推动了人工合成高分子材料的兴起,1909年,美国人贝克兰(Baekeland L)取得了第一个热固性高分子材料——酚醛树脂(又称电木)的专利权,次年在柏林投产。20世纪30年代又先后合成了丁钠橡胶和尼龙,从此,各种合成橡胶、合成纤维和塑料如雨后春笋般地发展起来,形成了近代化学工业发展的新格局。从19世纪中叶到20世纪中叶一些重要的化工产品开发 and 化工技术发明见表1-1。

表 1-1 化学工业发展概况

年 代	主 要 发 明
1809年	法国布莱P用硫酸使乙醇脱水制取了乙醚,迄今仍被采用
1839年	固特异(Goodyear C)首创用硫磺硫化天然橡胶,解决橡胶制品的定型和发粘问题
1842年	英国建成世界上第一个过磷酸钙磷肥厂
1845年	舍恩拜因CF制得纤维素硝酸酯
1849年	曼斯菲尔德C从煤焦油中分离出苯
1856年	珀金(Perkin W H)合成了第一个合成染料——苯胺紫
1862年	瑞典诺贝尔I及其子诺贝尔AB建厂生产炸药——硝化甘油
1869年	美国海厄特JW以樟脑作增塑剂,由硝酸纤维素制得最早的塑料赛璐珞,1872年投产
1890年	德国建成了世界上第一个电解食盐水溶液工厂制取氯气和氢氧化钠
1895年	第一座电石厂在美国投产
1912年	德国克拉特F等发明第一个热塑性树脂——聚醋酸乙烯酯
1929年	英国弗莱明A发现青霉素
1930—1931年	德国法本公司分别用本体和乳液法生产了聚苯乙烯和聚氯乙烯
1934年	英国福西特EW等制成高压聚乙烯
1935年	德国发明了第一个磺胺药物,随后几年又合成了多种同类药物
1939年	杜邦公司(美国)成功地将尼龙66工业化,这是最早工业化生产的合成纤维
1941年	我国科学家侯德榜发明了联合制碱法,当时称为侯氏制碱法
1942—1946年	先后合成了农药DDT、六六六、2,4-滴(除草剂),有机硫和有机磷杀虫剂等

续表

年 代	主 要 发 明
1949 年	美国谢克特 M S 合成了拟除虫菊酯——丙烯菊酯
1950 年	美国杜邦公司首先使仿毛型聚丙烯腈纤维工业化
1957 年	美国杜邦公司生产出最早的特种纤维——聚四氟乙烯纤维
1965 年	中国完成了牛胰岛素的全合成工作
1968 年	黎念之最先研究乳化液膜的形成方法和渗透机理,为液膜分离技术奠定了基础

从化学工业的发展历程看,其高速发展阶段是在 20 世纪 30 年代后从石油化工发展开始的,在短短的 60 多年里,其生产技术、产品种类和生产规模都已远远超过了前 100 多年的发展速度,而且,化学工业的发展速度和对国民经济的影响与其他工业相比都处于前列,已成为世界各国经济发展的支柱产业之一(见表 1-2)。

表 1-2 化学工业年均增长率(%)

国 别	1950—1960		1960—1970		1970—1980		1980—1990	
	Z*	H**	Z	H	Z	H	Z	H
中 国	25.3	39.5	3.9	8.0	9.45	9.70	12.6	7.4
美 国	3.9	7.9	5.0	7.9	3.1	5.6	2.81	4.2
日 本	16.5	17.9	13.5	14.6	4.6	5.2	4.3	5.1
英 国	3.0	6.2	2.7	6.2	0.8	2.9	1.66	3.60
法 国	6.6	12.1	6.0	10.4	2.8	4.4	1.58	3.3

* Z 表示整个工业年均增长率; ** H 表示化学工业年均增长率。

1-2 我国化学工业的发展和现状

我国是化学技术发展最早的国家之一,早在纪元前已经有了酿酒、冶铜、漂染和发酵等生产技术。但是由于我国封建社会的时间过长,阻碍了化学工业的发展。在 1949 年以前,我国化学工业已处于十分落后的状态,如农药、基本有机合成产品和石油化工产品等几乎为空白,而仅有的少数染料,制药和涂料生产厂家也大多是采用进口原料进行生产或半成品的加工,而发展比较早并已形成一定生产能力的三酸两碱工业也处于设备陈旧、技术落后,产量和质量都不能与发达国家相比的局面。表 1-3 列出了 1949 年以前我国化学工业的概况,由表可见,我国第一座铅室法硫酸厂比国外晚了 100 多年。

新中国成立以后,我国化学工业的发展取得了辉煌的成就,不仅化工生产所需要的原料已经做到了基本自给,而且基本无机化工产品、基本有机化工产品、化肥、农药、医药、涂料、染料、塑料、合成橡胶和合成纤维等产品也已基本配套齐全,除了满足国内需求外,许多产品还可以出口创汇,成为我国出口贸易的支柱产业之一。1998 年我国已有多种主要化工产品产量跃居世界前列,见表 1-4。

我国人口众多,可耕地面积少,解决食、衣、住、行是党和政府制定政策的出发点。解放后我国的化学工业始终把发展支农化工产品放在首位,支农化工产品的投资额约占化工总投资的53%。1998年我国化肥产量为2 955万吨(以有效成分计),居世界第一位,现在每亩耕地平均可以施肥23.11 kg(不含进口化肥),是1952年的77.1倍。

表 1-3 1949 年以前的我国化学工业

年 份	兴建的化工厂和投产的化工产品
1876 年	我国第一座铅室法硫酸厂在天津投产,日产 2 吨
1889 年	第一座水泥厂在唐山建成(即今启新水泥厂)
1895 年	第一座无烟火药厂在上海投产
1905 年	建立我国第一座石油开采和炼制企业
1915 年	开林油漆厂在上海投产,广州建成我国第一个橡胶制品厂
1918 年	硫化黑染料在大连投产
1921 年	赛璐珞在上海胜德化工厂投产
1924 年	永利碱厂在天津落成
1925 年	石家庄焦化厂投产(汉冶萍铁厂的配套厂)
1937 年	我国第一座合成氨厂在南京投产
1944 年	DDT 在重庆药械制造实验厂批量生产

表 1-4 1998 年我国居世界前列的几种主要化工产品

产 品 名 称	产量(万吨)	世界排名顺序
化肥(折纯)	2955	1
染料	23.8	1
农药(折纯)	38.2	2
合成橡胶*	60	4
乙烯	383.48	5

* 为 1997 年的产量

近年来,我国还积极研究开发了一些高效、低毒和低残留量的有机磷和拟除虫菊酯类农药,停止了高残留量农药“六六六”、“DDD”等品种的生产。这些高效农药的开发和生产为农业丰收和粮食的安全生产提供了保障。随着石油化工的发展,我国合成材料的产量也有了大幅度的增长,并迅速跃居世界前列。

1-3 化学工业的特点和发展趋势

从工业发展速度看,化学工业之所以能够迅速发展,是因为它的产品已直接应用到国民经济的各个部门和人民生活的各个方面,如石油、电力、冶金、交通运