



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化学工程基础

第三版

李德华 编著

HUAXUE
GONGCHENG
JICHU



化学工业出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化学工程基础

第三版

• 李德华 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《化学工程基础》(第三版)根据高等学校理科化学、应用化学专业“化学工程基础”教学基本要求编写。为适应工科少学时环境工程、生物工程、制药工程等专业的需要做了相应修订。主要论述化学工程中典型单元操作及化学反应工程——典型反应器基本原理及其应用。内容包括化学工业与化学工程、流体流动过程、沉降与过滤、传热、蒸发、吸收、精馏、萃取、新型分离技术、干燥和化学反应工程学——反应器基本原理。

《化学工程基础》(第三版)可作为高等学校理科化学、应用化学以及工科少学时环境、生物、制药工程等专业的基础课程教材,亦可供从事化学应用研究人员和上述专业从事设计、开发、运行的工程技术人员参考。

化学工程基础

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础/李德华编著.—3版.—北京:
化学工业出版社,2017.8
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
ISBN 978-7-122-29874-4

I. ①化… II. ①李… 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(2017)第128310号

责任编辑:刘俊之
责任校对:王 静

装帧设计:韩 飞

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:北京市振南印刷有限责任公司
装 订:北京国马印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张22 字数571千字 2017年8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:49.00元

版权所有 违者必究

前言

《化学工程基础》为教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材。自《化学工程基础》(第二版)2007年问世以来,使用了近十年,教材几乎年年重印,这次修订是作者在听取了广大同行和学生意见和建议的基础上进行的。

本次修订的指导思想是:教材必须以提高学生的科学素养为宗旨,以培养学生创新精神和实践能力为重点,为促使学生变被动式接收学习为主动探究式学习为突破口,不断加强基础,拓宽学生知识面,培养其创新能力,坚持“以生为本”,注重阐述重要概念和规律的形成背景、问题提出和解决的过程,重思路的编写思想和安排,力求使新版教材更有利于培养理工院校学生的思维方法和创新能力。既保持原有特色,又与时俱进,力求使其成为一本真正有用的、受广大读者喜爱的好教材。

《化学工程基础》(第三版)根据应用型本科办学的定位,以更好地适应化学、应用化学、环境工程、生物工程及制药工程等专业的专业基础课程教学需要。

第三版教材删减少学时教学过程较少使用的内容,修改个别繁复内容。通过修订,力求做到概念准确、表述正确、数字精确。增补沉降和过滤等单元操作内容。这样既便于理工院校师生选择教材,又能达到科学性、先进性和适用性的统一。在系统介绍单元操作知识的基础上,加强单元操作共性与特殊性的综合分析,介绍过程或典型设备的强化、优化途径,以利于拓宽理工院校学生分析和解决工程实际问题的思路,增强工程观念和创新意识。

《化学工程基础》(第三版)各章除开篇教学基本要求予以保留外,在每章结束处增加图示小结,并在相关章节安排适量工程背景的实例和习题。此外,与本书配套的《化学工程基础全程导学与习题详解》、《化学工程基础实验》等教材均早已出版。

在第三版教材修订编写过程中,华中师范大学化学学院领导和同行给予了大力支持和关注,在此深表感谢。再次对本书引用的文献资料的作者和单位表示衷心感谢。

诚望广大读者不吝赐教,并提出宝贵的意见和建议。

李德华

2017年4月

第二版前言

本书于2000年由化学工业出版社出版以后,在国内一些高等院校经过近八年的使用,得到了广大读者及同行的充分肯定,并获得许多有益的建议和支持。值此本书被列为教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”之际,作者仍将按照教育部化学类专业教学指导委员会制定的普通高等学校本科化学和应用化学专业化学工程基础教学基本要求,修订和进一步完善教材内容。

在高等院校理科化学和应用化学专业教学大纲、教学计划的指导下,为突出教材内容的规范性、适用性和创新性,从教与学两个方面考虑,在教材编写体例上着手:各章前安排教学基本要求;正文通过内容创新,以体现教材的应用性;例题尽可能解析详实、针对性强,以利于学生逐步突破难点;各章习题给出参考答案,从而做到既可满足“教”本,又能满足“学”与“练”之本。

为满足化学和应用化学专业的教学需要,方便教师选择教学内容,作者首先在《化学工程基础》教材“三传一反”的内容上增加了蒸发和干燥两个单元操作,从而进一步充实“三传”过程,形成以流体流动过程为基础的动量传递过程,以传热和蒸发操作为基础的热量传递过程,以吸收、精馏、萃取和新型分离技术为基础的质量传递过程,以及以干燥操作为基础的热、质同时传递过程,以丰富和强化“一反”——化学反应工程学的概念和方法。并在化学反应工程学一章,尽量反映其利用理论推演、结合工程实践、研究化学反应在工业上实现时所必须克服的传递和流动等因素对化学反应结果的影响,建立数学模型应用于反应器的设计放大和操作控制。以期培养学生的工程方法论、工程能力、技术经济观念及将实验室科研成果开发放大和技术创新打下良好基础。与本书配套使用的实验课程教材也即将出版。

本书此次修订仍贯彻以下初衷:文字叙述力求严谨、清晰、突出重点,以利于教学 and 不同层次读者自学。对第一版中的不妥之处予以修正;部分章节和习题作了适当增删;对于以算术平均值代替对数平均值的问题,结合数学推导和形势的发展,提出了不必再做替代的看法,使教材内容尽可能做到与时俱进。然而,作者虽尽力修订本书,但难免挂一漏万,书中疏漏之处,敬祈读者不吝赐教。

本书得到华中师范大学教务处和化学学院领导的支持,在此表达诚挚的谢意。对书中引用文献资料的作者和单位,谨表衷心感谢。

欢迎使用本书的同行及广大读者批评指正。

李德华

2007年4月

目 录

第一章 化学工业与化学工程	1
第一节 化学工业概述	1
一、化学工业的重要性及其发展	1
二、化学工业的分类及其特点	1
三、化工产品的市场及其前景	3
第二节 化学工程的发展趋势	3
一、化学工程的兴起与发展	4
二、化学工程的前沿研究领域	5
第三节 化工过程与单元操作	7
一、化工过程简介	7
二、化工单元操作	7
三、常用基本概念	8
第四节 化工过程开发简介	10
一、化工过程开发的基本要求	10
二、化学实验与化工生产过程的联系与区别	10
三、化工过程开发步骤	11
四、化工过程开发最优化概念	13
第五节 化工数据	14
一、化工数据的分类	14
二、单位与单位制	15
三、单位换算	15
第二章 流体流动过程	16
第一节 概述	16
第二节 流体静力学基本方程式	16
一、流体的热力学属性	16
二、流体静力学基本方程式	18
三、流体静力学基本方程式的讨论	19
四、流体静力学基本方程式的应用	19
第三节 流体流动的基本方程式	21
一、流体的流动属性	21
二、流体的运动状态	22
三、连续性方程式	22
四、伯努利方程式	23
第四节 管内流体流动现象	27
一、牛顿黏性定律与流体的黏度	27
二、流体流动的内部结构	28
第五节 管内流体流动的阻力	31

一、流体在直管中的流动阻力	31
二、流体在非圆形管内的流动阻力	33
三、局部阻力	34
第六节 管路计算	35
一、简单管路	35
二、复杂管路	37
第七节 流量的测量	40
一、变压头流量计	41
二、变截面流量计	43
第八节 流体输送机械	44
一、离心泵	44
二、其他类型的化工用泵	52
三、泵的选择	54
四、气体输送机械	55
小结	61
习题	61
第三章 沉降与过滤	65
第一节 概述	65
第二节 沉降	65
一、重力沉降	66
二、重力沉降设备	68
三、离心沉降及设备	71
第三节 过滤	73
一、过滤的基本概念	74
二、过滤基本方程式	76
三、恒压过滤与恒速过滤	78
四、过滤常数的测定	80
五、过滤设备	82
小结	85
习题	85
第四章 传热	86
第一节 概述	86
一、热量传递的三种基本方式	86
二、传热过程在化工生产中的应用	87
三、传热学与热力学关系	87
第二节 热传导	87
一、热传导方程	88
二、传导传热计算	89
第三节 对流传热	94
一、对流传热分析	94
二、壁面和流体间的对流传热速率	94
三、管内湍流流动的传热膜系数	96

四、管外湍流流动的传热膜系数	99
五、大空间内自然对流的传热膜系数	99
第四节 辐射传热	100
一、基本概念	100
二、斯忒藩-玻耳兹曼定律	101
三、克希霍夫定律	102
四、两固体间的相互辐射	102
五、设备热损失的计算	104
第五节 传热计算	104
一、换热器的热负荷计算	105
二、传热平均温度差的计算	106
三、总传热系数	113
第六节 热交换器	118
一、间壁式换热器的类型	118
二、板式换热器	119
三、换热器发展概况	121
第七节 传热过程的强化	123
一、换热器热交换过程的强化	123
二、强化技术及能耗研究	124
第八节 管壳式换热器的设计与选用	125
一、确定设计方案的基本原则	125
二、设计内容	125
三、管壳式换热器的选用	125
小结	126
习题	126
第五章 蒸发	129
第一节 概述	129
一、蒸发操作及特点	129
二、蒸发操作的经济性及多效蒸发流程	130
第二节 蒸发过程计算	132
一、蒸发过程的传热系数	132
二、浓缩热和溶液的焓浓图	132
三、溶液的沸点和传热温度差损失	132
第三节 单效蒸发计算	134
一、水分蒸发量	135
二、加热蒸汽消耗量	135
三、蒸发器的传热面积	136
第四节 多效蒸发计算	137
第五节 蒸发器的类型与选择	141
一、蒸发器的类型	141
二、蒸发器的性能比较与选型	146
三、蒸发器的改进与研究	147

小结	147
习题	147
第六章 吸收	149
第一节 概述	149
一、吸收在化工生产中的应用	149
二、吸收剂的选择	149
三、吸收设备与吸收操作	150
第二节 吸收过程的相平衡关系	150
一、气体在液体中的溶解度	150
二、亨利定律	151
三、相平衡关系在吸收过程中的应用	153
第三节 吸收过程机理	154
一、物质在单相中的扩散	155
二、双膜理论	156
第四节 传质速率方程	157
一、气相传质速率方程	158
二、液相传质速率方程	158
三、总传质速率方程	158
四、总传质系数与膜传质系数的关系	159
第五节 填料吸收塔计算	163
一、物料衡算与操作线方程	163
二、吸收剂用量的确定	164
三、填料塔塔径的计算	166
四、填料层高度的计算	166
第六节 填料塔	170
一、填料塔的构造和填料	170
二、填料塔的流体力学特性	171
三、填料塔的附件	174
小结	177
习题	177
第七章 精馏	180
第一节 概述	180
第二节 双组分溶液的气液相平衡	180
一、双组分溶液的气液相平衡	181
二、相对挥发度	183
第三节 简单蒸馏和平衡蒸馏	185
一、简单蒸馏	185
二、平衡蒸馏	185
第四节 精馏基本原理	186
第五节 双组分连续精馏塔的计算	187
一、全塔物料衡算	188
二、精馏段物料衡算和精馏段操作线方程	189

三、提馏段物料衡算和提馏段操作线方程	189
四、加料板的物料衡算与热量衡算	190
五、理论塔板数的计算	194
六、塔板效率与实际塔板数	202
七、塔高、塔径及板压降的计算	203
第六节 间歇精馏	205
一、馏出液浓度维持恒定的操作	205
二、回流比维持恒定的操作	206
第七节 特殊精馏	206
一、恒沸精馏	207
二、萃取精馏	208
第八节 精馏塔及其选择	208
一、有溢流装置的板式塔	208
二、无溢流装置的板式塔	211
三、新型塔板	212
四、精馏装置的选择	214
小结	214
习题	214
第八章 萃取	217
第一节 概述	217
一、液-液萃取简介	217
二、萃取过程的适用性与经济性	218
三、萃取技术在工业上的应用	218
四、萃取剂的选择与发展	219
五、萃取基本流程	219
第二节 三元体系的液-液平衡关系	220
一、三角形坐标	220
二、杠杆规则	221
三、三角形相图	222
第三节 萃取过程的计算	225
一、单级萃取的计算	225
二、多级错流萃取的计算	226
三、多级逆流萃取的计算	228
第四节 液-液萃取设备及其选择	232
一、混合-澄清萃取器	232
二、离心式萃取设备	233
三、塔式萃取设备	233
四、液-液萃取设备的选择	236
小结	237
习题	237
第九章 新型分离技术	239
第一节 膜分离技术	239

一、膜分离技术的发展	239
二、膜及膜分离技术的定义和分类	240
三、膜过滤的基本概念	241
四、膜过滤的基本理论	242
五、膜组件的结构及其特点	243
六、超滤和反渗透的应用	245
第二节 超临界流体萃取	245
一、超临界流体的性质	246
二、超临界流体萃取过程	247
三、国产超临界二氧化碳萃取装置生产工艺	248
四、超临界流体萃取的应用	249
第十章 干燥	251
第一节 概述	251
一、干燥过程的目的和应用	251
二、干燥过程的分类	251
三、对流干燥的特点及流程	252
第二节 湿空气的性质和湿度图	253
一、湿空气的性质	253
二、空气的湿度图	258
三、湿度图的用法	259
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	260
一、物料衡算	260
二、热量衡算	262
三、干燥器出口空气状态的确定	263
四、干燥器的热效率和干燥效率	264
第四节 干燥速率和干燥时间	265
一、物料与水分的结合状态	265
二、干燥速率及其影响因素	266
三、恒定干燥条件下的干燥时间计算	268
第五节 干燥器及其选择	270
一、对干燥器的要求	270
二、干燥器的分类	271
三、工业常用的对流干燥器	271
四、干燥器的选型	274
小结	275
习题	275
第十一章 化学反应工程学——反应器基本原理	277
第一节 概述	277
一、化学反应工程学的基本任务和研究方法	277
二、化学反应过程和化学反应器的分类	278
三、理想均相反应器	284
第二节 物料在反应器内的流动模型	286

一、理想流动模型	286
二、非理想流动模型	288
第三节 理想均相反应器计算	288
一、基本原理	288
二、间歇反应器	289
三、活塞流反应器	291
四、全混流反应器	296
五、多级全混流反应器	298
第四节 反应器型式和操作方法的评比与选择	301
一、反应器生产能力的比较	301
二、反应产物收率的比较	303
第五节 非理想流动	305
一、实际反应器对理想类型的偏离	305
二、停留时间分布的表示方法	306
三、停留时间分布的实验测定	306
四、停留时间分布的数字特征	308
五、理想反应器中的停留时间分布	309
六、非理想反应器中的停留时间分布	311
七、停留时间分布曲线的应用	314
第六节 气-固相催化反应器	317
一、气-固催化反应过程	318
二、气-固催化反应动力学	318
三、固定床催化反应器简介	320
四、流化床反应器简介	322
小结	324
习题	324
附录	327
一、物理量的单位、量纲与换算	327
二、水的重要物理性质	328
三、水在不同温度下的黏度 (0~100℃)	329
四、饱和水蒸气性质 (以温度为准)	330
五、饱和水蒸气的性质 (以压强为准)	331
六、管子规格	332
七、泵规格	333
八、物质的热导率	335
九、列管式换热器总传热系数 K 的范围	336
十、某些气体溶于水时的亨利系数	337
十一、物质的扩散系数	338
十二、某些二元物系气液平衡组成	338
十三、干空气的物理性质 ($p=101.325\text{kPa}$)	339
参考文献	340

第一章 化学工业与化学工程

教学基本要求

1. 了解化学工业及化学工程基础课程的发展、性质、地位和作用；
2. 了解化工生产过程的构成，单元操作的内容、分类以及研究内容；
3. 了解实验室研究与化工生产之间的差别，以及化工过程开发的基本步骤；
4. 理解化学工程学常用的几个基本概念，掌握化工过程的物料衡算与能量衡算的基本计算步骤；
5. 掌握量纲与量纲一致性、单位与单位一致性以及相互换算。

化学工业是以天然物质或其他物质为原材料，利用这些物质的性质或形态变化，或以这些物质组合，加工成对国计民生有价值的化学产品的一种工业。在这种工业中，以化学反应过程为核心。化学专业学生在学习了无机化学、有机化学、物理化学等课程以后，进一步学习生产和加工化学产品的应用技术知识，则必须了解化学工业生产基本知识，以及化学工程学科的基础理论和技术对化学工业发展所起的重要促进作用。

第一节 化学工业概述

一、化学工业的重要性及其发展

化学工业是国民经济重要的基础工业，是工业经济中最具活力，有待开发且竞争力极强的一个部门。其特点是产品品种多、服务面广、配套性强。其重要性可以大致归纳为如下几个方面：

- (1) 为农业提供化肥、农药、塑料薄膜等农用生产资料；
- (2) 为轻纺、建材、冶金、国防、军工及其他工业提供各种配套原材料；
- (3) 为微电子、信息、生物工程、航天技术等为代表的高技术产业提供新型化工材料和新产品；
- (4) 为人们的衣、食、住、行提供各种化工产品。

化学工业和其他工业有着广泛的联系，它既对外提供化工产品或原料，又从其他工业和化学工业本身获得原料或中间体，因此，化学工业的发展对相关产业的供需稳定有很大的影响，它们之间相互依存、相互促进的关系特别明显。

当前，化学工业在世界范围内正发生日新月异的变化，其发展的速度和规模都相当大，且产品已渗入国民经济的各个领域。就我国化学工业而言，已经发展成为具有化学肥料、塑料、合成纤维、合成橡胶、酸、碱、染料、油漆、农药和无机盐类等行业比较完整的化学工业体系。许多化工产品增长速度非常迅速，如化肥、农药、塑料、纯碱等。

二、化学工业的分类及其特点

化学产品的原材料及供应市场所涉及的范围是相当广泛的，很难对化学工业做出简单明确的分类。按照美国标准工业分类手册（standard industrial classification, SIC）确定的分类法，化学及有关产业的工业是较大的一类。它包括生产基本化工产品的企业和以化学方法为主进行产品加工的企业，以及与石油炼制有关的企业。它们一般生产三类产品：基本化工产品；进一步加工用产品以及供最终消费的化工产品。而在我国，目前大致分为：基本化学

工业、化肥工业、石油化学工业和其他化学工业，即所谓“大化工”。主要化工行业及其相关产品如表 1-1 所示。

表 1-1 主要化工行业及其相关产品

化工行业	主 要 产 品 或 用 途
化学矿山	磷矿、硫矿、硼矿、矾矿和石灰石矿等
酸、碱	硫酸、烧碱、纯碱
无机盐	磷酸、碳酸钾、小苏打、无水硫酸钠、氰化钠、硫酸铝、硝酸钠、氯化锌、轻质碳酸钙、过氧化氢、沉淀硫酸钡等
化肥	氮肥(硫酸铵、硝酸铵、尿素、氯化铵、碳酸氢铵、氨水、石灰氮等)、磷肥(普通过磷酸钙、钙镁磷肥等)、钾肥
化学农药	敌百虫、乐果、甲胺磷、杀虫双、草甘膦、多菌灵等
电石	可作为生产聚氯乙烯、聚乙烯醇、氯丁橡胶、乙酸、乙醛、乙炔黑、双氰胺、硫脲等工业的原料
热固性塑料和工程塑料	酚醛塑料、氨基塑料、环氧树脂、不饱和聚酯树脂等，聚碳酸酯、聚甲醛、ABS 树脂、尼龙 1010、尼龙 6、尼龙 66、聚砜等
合成橡胶	顺丁橡胶、丁苯橡胶、氯丁橡胶、丁腈橡胶等
染料	硫化染料、直接染料、酸性染料、活性染料、碱性染料、还原染料、分散染料、冰染染料、阳离子染料等
涂料	天然树脂漆、酚醛树脂漆、醇酸树脂漆、氨基树脂漆、过氯乙烯漆、聚酯漆、聚氨酯漆、硝基漆、有机硅漆等
增塑剂	邻苯二甲酸酯、对苯二甲酸二辛酯、己二酸二辛酯、烷基磺酸苯酯、氯化石蜡、磷酸酯等
橡胶加工助剂	防老剂、促进剂
工业表面活性剂	阳离子型、阴离子型、非离子型、两性型等
造纸化学品	脱墨剂、助留剂、助滤剂、表面处理剂、浆内施胶剂、纸张增强剂、涂布胶黏剂、分散剂等
感光材料	电影胶片、照相胶片、特种胶片、彩色相纸等
磁性记录材料	磁带、磁盘等
橡胶加工	轮胎、运输带、胶管、胶鞋、炭黑等

与化工行业相关的部门包括：石油化工、塑料制品、化学纤维、炼焦化学、日用化工、皮革化工业以及医药等。

随着社会生产力和人们生活水平的不断提高，化工新技术开发的进度不断加快，化工产品的结构日趋合理，产品质量也在不断提高，已适应和满足了不同消费的需求。近年来，我国十分重视精细化工的发展，把精细化工，特别是新领域的精细化工作为化学工业发展的战略重点之一和新材料的重要组成部分，列入多项国家计划中，从政策和资金上给予重点支持。目前，伴随精细化工产品产值在化学工业产值中的比重逐年上升，精细化工产品工业已经成为我国化学工业中一个重要的独立分支和新的经济效益增长点。依据精细化工产品的功能和结构特征，其大致可分类如下：

- ①医药和兽药；②农药；③黏合剂；④涂料；⑤染料和颜料；⑥表面活性剂和合成洗涤剂；⑦塑料、合成纤维和橡胶用助剂；⑧香料；⑨感光材料；⑩试剂和高纯物；⑪食品和饲料添加剂；⑫石油用化学品；⑬造纸用化学品；⑭功能高分子材料；⑮化妆品；⑯催化剂；⑰生化酶；⑱无机精细化学品。

- 从上述如此繁多门类的化学工业在国内外发展状况来看，化学工业有如下特点：
- (1) 增长速度快；
 - (2) 化工科研和新产品开发费用高；
 - (3) 化工产品、工艺路线、技术创造性上竞争激烈；
 - (4) 大规模连续化生产和技术的复杂性促使化学工业投资加大；
 - (5) 新工艺的投入、生产规模的扩大以及设备的腐蚀，致使化学工业的工厂寿命缩

短、报废快；

- (6) 在资金足够的条件下，化工产品进入市场的自由度大；
- (7) 市场需求在产品过剩与短缺之间循环变化；
- (8) 运输便利、均相及价值高的化工产品贸易具有国际性；
- (9) 化学工业与整个工业相辅相成，在经济发展中起着支柱作用。

三、化工产品的市场及其前景

对化工产品的需求依赖于产品用途的开拓和市场消费的程度。其中，化学工业本身就是化工产品的最大消费市场，因为在对化工产品的深加工过程中，它需要依赖本工业生产的约一半的初级产品。从这种意义上来说，化学工业发展容易受其相关产业左右，如合成纤维、塑料、农药、合成洗涤剂、包装材料和建筑材料等。正因如此，对于化工产品市场的调查和预测也就显得非常重要。因为市场需求是化工企业生产发展和经营开拓的依据，是企业赖以生存的前提条件。通过市场调查和预测了解和认识市场对产品的需求，分析和研究产品生产的生命周期；以此制定新产品开发、改造或淘汰老产品的规划；确定产品在其生命周期中各阶段的市场策略；制定产品生产销售计划；以保持企业在市场竞争中的优势。只有在产品营销过程中不断进行调查，掌握市场动向和发展趋势，及时反馈信息、储存信息，企业才能获得长足的进步和发展。

值得注意的是，化学工业中有些应用领域已经在数量和质量方面达到饱和，在这些领域内今后不可能会有很大发展，因此，发展化学工业的关键，应为满足人们现有需要的同时，开拓新用途并开发与新的需要相适应的产品。近年来，我国精细化工已发展成包含约 25 个门类，近 3 万个品种的产品，应用于国民经济的各个领域。精细化工已成为我国化学工业中一个重要的独立分支和新的经济效益增长点。

2009 年版《石油和化工产业振兴支撑技术指导意见》指出，我国精细化工领域科技创新的主要任务是以绿色化、高性能化、专用化和高附加值化为目标，以解决催化技术、过程强化技术、精细加工技术、生物化工技术等制约我国精细化工行业发展的关键技术为突破口，大力开发新农药创制技术、再生纤维造纸专用化学品制备技术、功能有机硅橡胶产业化技术、含氟精细化学品生产技术等，推动相关产业的发展。

“十二五”期间，我国精细化工行业发展较为迅速，经济由资源消耗型转变为节约型，由高污染型转变为清洁型。在此期间，精细化工行业迎来了很大发展。按照中国石油和化学工业规划院的初步规划，“十三五”期间是石化行业的产业转型期——大部分传统化工产品面临调整，化工行业洗牌难免，精细化工产品将是石化行业下一阶段发展的重点和热点。该期间我国精细化工行业产值将达 1.6 万亿元，比 2008 年增长一倍以上，精细化工自给率达到 80% 以上，进入世界精细化工大国与强国之列。

展望 21 世纪，化学工业将会由传统工业过渡到以新材料、精细化学品和专用化学品、生物技术为主体的技术密集型产业。正如有人所说，精细化、个性化、绿色化将是知识经济时代化学工业、化学工艺及化学工程的大趋势。

第二节 化学工程的发展趋势

化学工程作为一门工程技术学科，迄今已有近百年历史了。它以物理学、化学和数学为基础，并结合工业经济基本法则，主要研究化学工业中的物理变化和化学变化过程及其有关机理和设备的共性规律，并把这些规律应用到化工装置的开发、设计、操作、控制、管理、强化以及自动化等过程中，在化工工艺与化工设备之间起着承上启下的桥梁和纽带作用。

一、化学工程的兴起与发展

化学工程是随着大规模化学工业的发展而形成和发展起来的。早在 1887 年,戴维斯 (G. E. Davis) 就在英国曼彻斯特工学院做了一系列化学工程问题的讲演,但由于当时还缺乏数据和对过程开发的全面认识,戴维斯并未能对化工操作做出定量的处理。1888 年美国麻省理工学院 (MIT) 以诺顿 (L. M. Norton) 为首,设置了关于应用化学工程教育问题研究委员会,并于同年 12 月做出设置化学工程课程的决定,世界上第一次讲授“化学工程”这门课程。1915 年利特尔 (A. D. Little) 提出了“单元操作”(unit operation) 的概念,沃尔克 (W. H. Walker) 则通过“单元操作”重新组织了麻省理工学院化学工程的讲授,并进一步改造了化学工程的指导方针和实验室建设。“单元操作”这个概念至今仍是化学工程之表征。1923 年,麻省理工学院的沃尔克、刘易斯 (W. K. Lewis) 和麦克亚当斯 (W. H. McAdams) 合著了化学工程第一本教科书——《化工原理》(principles of chemical engineering)。书中包括了流体流动、过滤、传热、蒸发、蒸馏、干燥、粉碎等单元操作,并对它们从理论上做了很好的总结和阐述,形成了一个体系,即以单元操作为中心,紧密结合应用化学,并明确指出在化学工程教学中不应忽视的化学与物理化学的作用。

20 世纪 40 年代以来,以合成纤维、合成橡胶、合成塑料三大合成材料为代表的石油化工的迅速发展,促使化学工程从经验向科学演变。经过对各种单元操作分析、综合,发现所有的单元操作均有着共同的基本规律,亦即动量、热量和质量传递等三种传递过程是化学工程的本质问题。

20 世纪 50 年代,美国威斯康星大学的伯德 (R. B. Bird) 等开始从“三传”的角度研究化学工业中的物理变化。由于高速电子计算机的出现,解决了过去人们不能解决的复杂工程计算问题。这也就有了把化学反应规律与生产规模装置中的传递过程规律综合起来进行分析和处理的可能。于是,1957 年在荷兰阿姆斯特丹举行的第一次欧洲化学反应工程会议上,正式提出了“化学反应工程”(chemical reaction engineering) 的概念。围绕着返混与停留时间分布、反应体系内和相间的传热与传质、反应器的稳定性、微观混合效应等观点的引入,为化学反应工程奠定了基础。至此,“三传一反”(mass transfer, heat transfer, momentum transfer and reaction engineering) 就形成了化学工程的主要内容。这一时期内,原子能工业的诞生,环境科学被提到重要位置,气体扩散、气体离心分离、热扩散、超滤、反渗透、泡沫分离等技术相继问世,进一步促进了化学工程的发展。

20 世纪 60 年代后期,随着传递过程原理和化学反应工程的开拓,计算机用于化学工程以解决过程的最优规划、最优设计、最优控制及最优操作,又促成了“化工系统工程”的诞生,为化学工程的决策及方法论提供了有力的依据。

20 世纪 70 年代以来,随着电子计算机的进一步发展,同时由于化学工程基础理论的成熟和数学模型化方法的普遍应用,化工系统工程又有了较大发展。目前,这门学科在化工过程的开发、设计,现有工厂技术改造方面发挥着越来越大的作用,取得了良好的效果。

1983 年在美国化学工程师学会 (AIChE) 第 75 周年年会上,人们把化学工程定义为“经济地开发利用物质和能量的方法为人类造福的工学”,从而展现了化学工程及其广阔的领域和应用前景。

面对环境、能源等可持续发展挑战,化学工程的发展特征也在逐渐演变,1987 年美国国家研究理事会出版了《化学工程研究调查:前沿及机遇》的报告,为人们展示了不同年代化学工程特征的演变(见表 1-2),并向业内人士呼吁:化学工程要与化学及“对其他所有工程科目都适用的物理和数学”加深交融,凸现其具有的“最广阔知识基础之工程科目”的特质。

表 1-2 化学工程特征的演变

20 世纪 60 年代	20 世纪 90 年代	20 世纪 60 年代	20 世纪 90 年代
均相材料	组合及结构性材料	价格竞争	质量竞争
低价格、低功能	高价值、高功能	效率高	快捷的创新及商业化
大宗化学品	特殊产品、生化产品	加强资本	加强信息
合成	设计生产	国家性	全球性
宏观	微观	生产	服务及生产
大规模加工	小规模且具灵活性	短期回报	长期投资
连续过程	间歇且灵活/连续且灵活	学科内	跨学科
注重过程	注重产品和过程	宏观理解	微、亚、介观的理解

1996 年 5 月，在美国圣地亚哥召开的第五届世界化学工程年会上，法国化学工程学家维莱莫克斯 (J. Villemaux) 从世界经济、技术全球化发展的新形势出发，考虑到化学工程所面临的机遇和挑战，指出“化学工程学在总体变化的世纪中，其自身需要重新定义”。由于持续发展的本质要求环境、经济和社会决策的总体化，化学工程师必须开发一种多尺度、多目标的途径，瞄准化工生产过程的总体优化，即“用尽量少的资源和消耗，能更好、更便宜、更快地完成特定的生产，并对环境和生态是友好的”，这就是新的化学工程学。

随着时间的推延，化学工程学在发展过程中还在不断地向科学技术新领域渗透和拓展，其应用对象涵盖了所有物质的化学、物理转化过程。同时，它也正被化学工业、石油炼制、合成材料、能源工业、冶金工业、核能工业、建材工业，以及农业、军事、航空、宇航、环境、资源、生物、医药、食品饮料、纸浆造纸等过程工业的研究和开发人员用于各种过程，因此，使得化学工程学事实上已经发展成为了“过程工程学”(process engineering)。

综上所述，学科要继续保持旺盛的活力，求得更大的发展，只有不断地适应社会层出不穷的新需要，不断加强自身的理论建设。图 1-1 示意化学工程的发展过程，从中可以看出它已经建立起了一套完整的理论体系。

二、化学工程的前沿研究领域

从 20 世纪 80 年代开始，科学技术发展速度惊人。一场以高技术为中心的新技术革命正蓬勃发展起来。许多工业发达国家都以信息技术为先导、以新材料技术为基础、以新能源技术为支柱，沿微观尺度向生物技术开拓，沿宏观尺度向空间和海洋扩展。他们以这六大高技术领域为其发展战略，从而导致了許多学科发生了巨大的变化。这场新技术革命无疑为化学工程提供了新的发展机会，其范围已经不局限于传统的化工领域。化学工程已经面临处理更多边缘目标，并将成为更为通用和广泛范围的学科。

1. 材料化学工程

随着高技术的发展，迫切需要开发具有高强度特殊性能的新型材料。在新材料领域，研究高聚物、陶瓷材料、复合材料等微结构材料的分子结构与性质之间的关系；研究原料选用及材料加工与所生成的微结构之间的关系；研究材料表面及界面上的物理化学现象；用化学方法而非机械方法制造部分复杂材料等，都需要进行化学工程方面的研究。而研制得到的新材料应力求达到：结构与功能相结合，具有智能，环境污染小，可回收再生，且能耗要低。

2. 能源与资源化学工程

化学工业是一个高能耗工业，它利用各种形式的能量来合成和生产人们所需要的各种化

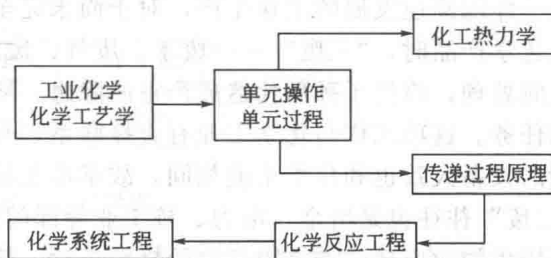


图 1-1 化学工程理论发展过程示意图