



湖北省化学工程与工艺专业校企合作联盟系列教材

Chemical Technology

化学工艺学

▪ 闫福安 主编 ▪ 刘少文 副主编



化学工业出版社

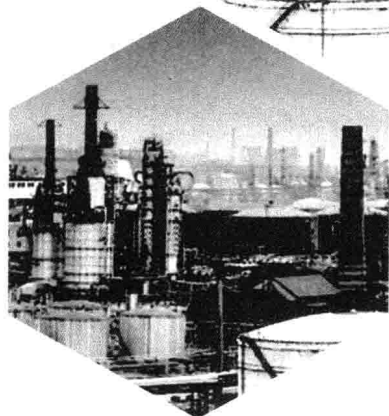


湖北省化学工程与工艺专业校企合作联盟系列教材

Chemical Technology

化学工艺学

▪ 闫福安 主编 ▪ 刘少文 副主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是“湖北省化学工程与工艺专业校企合作联盟系列教材”之一。

本书是适应高等化工类专业教学改革、拓宽专业面的一本新教材。除了对现代化学工业基本概念、基本理论进行介绍之外，以典型产品为实例对无机化工工艺学、有机化工工艺学、煤化工工艺学和石油化工艺学进行了重点介绍。

本书为高等院校化学工程与工艺专业本科生教材，也可供化学和相关专业的化学工艺学课程选用，教学内容可以根据具体专业方向进行取舍，还可供从事化工生产、设计的工程技术人员及化工管理、销售的相关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学工艺学/闫福安主编. —北京: 化学工业出版社,
2013. 7
ISBN 978-7-122-17367-6

I. ①化… II. ①闫… III. ①化工过程-工艺学
IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 100592 号

责任编辑: 杜进祥
责任校对: 战河红

文字编辑: 刘砚哲
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 装: 三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张 19 $\frac{3}{4}$ 字数 526 千字 2014 年 1 月北京第 1 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: 40.00 元

版权所有 违者必究

序

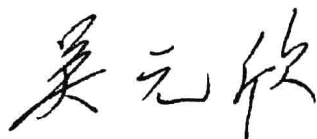
高等教育竞争的本质是人才培养质量的竞争。《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》对高等教育的未来发展提出了明确要求,即全面提高高等教育质量、提高人才培养质量、提升科学研究水平、增强社会服务能力、优化结构办出特色,力争到2020年,高等教育结构更加合理,特色更加鲜明,人才培养、科学研究和社会服务整体水平全面提升。为此,教育部发布了《关于实施卓越工程师教育培养计划的若干意见》(教高[2011]1号)以及《关于“十二五”期间实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的意见》(教高[2011]6号),其目的是进一步深化本科教育教学改革,提高本科教育教学质量,大力提升人才培养水平和创新能力。

武汉工程大学(原武汉化工学院)建校于1972年,经过40年的发展,办学特色日趋鲜明:化工及相关学科为主、多学科协调发展的学科专业特色;适应复合应用型、创新型人才培养目标要求的工程教育特色;“立足湖北、辐射全国,服务行业和区域经济社会发展”的服务面向特色。学校紧密围绕人才培养、科学研究、服务社会、传承文化的主题,确立了“质量立校、科技强校、人才兴校、突出特色、协调发展”的办学思路以及“以质量为本,以网络为基础,以开放为特点,以创新为动力”的教学指导思想。作为一所有着较强行业背景的地方高校,积极参与实施协同创新和卓越工程师教育培养计划,既是推动教育与科技、经济、文化紧密结合,建设创新型国家的战略行动,也是提高学校核心竞争力、服务行业和区域经济发展、实现学校新跨越的重要过程。

为了充分发挥高等学校的教学科研优势,加快建设以企业为主体、市场为导向、产学研相结合的技术创新体系,探索化工类人才培养的改革创新之路,服务地方经济建设,按照“学科引领、合作发展、共建共享、彰显特色、服务地方”的指导思想,2011年7月,由武汉工程大学倡议发起的“湖北省化学工程与工艺专业校企合作联盟成立大会”在武汉顺利召开,加入联盟的有华中科技大学、武汉理工大学、湖北大学、长江大学、三峡大学等20余所高校以及中石化武汉分公司、武汉有机实业有限公司、湖北祥云(集团)化工股份有限公司等10余家企业。“湖北省化学工程与工艺专业校企合作联盟”的成立不仅有利于加强湖北省内各高校之间化学工程与工艺专业之间的联系,有效实现资源共享,而且有利于促进高等学校和企业之间的交流与合作,共同探讨新形势下如何提高化工类专业人才的培养质量和针对性,为化学工业的发展培养优秀的工程技术人才,进而推动化工行业和区域经济发展。

在国家建设资源节约型、环境友好型社会的大背景下，石油化工、矿产资源等领域发展空间巨大，化学工业发展将是国家新型工业化的战略重点，化学工业也是湖北省国民经济的支柱产业之一。在40年的办学历程中，学校始终注重学生工程实践能力和创新能力的培养，注重教学与科研和生产实际相结合，逐步构建了以实训-实验-实习-创新为主要内容的“三实一创”实践教学体系。本次由化学工业出版社出版的《环境与化工清洁生产创新实验教程》、《化工原理课程设计》、《化工设计》、《化学工程与工艺实习指南》、《化学工艺学》、《化工原理实验（双语）》、《物理化学实验（双语）》等系列教材汇集了“湖北省化学工程与工艺专业校企合作联盟”部分高校和企业的教学科研开发成果，旨在紧跟化工行业发展前沿和社会需求，适时调整人才培养计划，更新教学内容和教学方法，创新课程体系，深化教学改革，为逐步形成专业发展与社会需求相适应的人才培养体系添砖加瓦。

谨此为序。

A handwritten signature in black ink, reading '吴元欣' (Wu Yuanxin).

2012年7月于武汉工程大学

前 言

化学工艺学是研究综合利用天然原料和半成品，将其加工成生产资料和生活资料的一门学问，是化学工程与工艺专业的一门专业课程，也是一门时代性很强的综合性学科。它是按化工生产的不同部门和不同产品种类，分别研究其原料特点、生产原理、生产流程、适宜操作条件以及所用机械设备的材料和构造等。根据所研究的对象，化学工艺学又可分为无机化工工艺学、有机化工工艺学、煤化工工艺学和石油化工工艺学等很多门类。

在化学工艺学中涉及许多基本的概念。在进行工艺过程的开发、设备的设计和生产操作时，经常运用物料衡算、能量衡算、平衡关系、过程速率和经济核算等基本概念和有关理论。

本书作为化学工程与工艺专业化学工艺学课程的教材，结合现行专业设置特点，从矿物原料（包括化学矿物、煤炭、石油和天然气等）出发，以无机化工、有机化工、煤化工和石油化工为主线组织编写。在现有教材的基础上，结合最新教学实践，注重工艺理论原理及工程实践应用，兼顾深度与广度，尽量介绍典型产品、典型技术、典型工艺，落实节能减排、保护环境、提高经济效益的理念，凸显内容的时代性、新颖性。通过学习，使学生获得基本的化学工艺知识和解决化学工程实践问题的素质，为将来从事化工过程的研究、开发、设计、建设和管理奠定理论和实践基础。

全书共 11 章，由武汉工程大学组织湖北省化学工程与工艺专业校企合作联盟共同编写，闫福安负责全书策划、统编定稿，其余具体分工如下：

- 第 1 章 绪论——余响林（武汉工程大学）
- 第 2 章 化学工艺学基础——金放，杨小俊（武汉工程大学）
- 第 3 章 氯碱化工工艺——汪锋（武汉工程大学）
- 第 4 章 湿法磷酸工艺——刘少文（黄冈师范学院）
- 第 5 章 环氧乙烷生产工艺——薛亚男（武汉工程大学）
- 第 6 章 酞菁颜料生产工艺——邹群（武汉工程大学）
- 第 7 章 煤的气化与焦化工艺——史世庄（武汉科技大学）
- 第 8 章 合成氨工艺——陈文（黄冈师范学院）
- 第 9 章 石油炼制与加工——付家新（长江大学），汪锋（武汉工程大学）
- 第 10 章 聚丙烯生产工艺——官仕龙（武汉工程大学）
- 第 11 章 聚酯生产工艺——杨世芳（湖北大学）

本书为高等院校化学工程与工艺专业教材，也可供化学和相关专业的化学工艺学课程选用，还可供从事化工生产、设计的工程技术人员及化工管理、销售的相关人员参考。

本书由武汉工程大学闫福安教授任主编，黄冈师范学院刘少文教授任副主编。在编写过程中得到了武汉工程大学教务处及武汉工程大学化工与制药学院和湖北省化工联盟高校的大力支持，承蒙武汉工程大学校党委书记吴元欣作序，在此一并表示感谢。由于本书内容广泛，限于作者水平，不妥之处在所难免，敬请读者不吝指正。

编 者
2013 年 1 月

目 录

第一篇 基础篇

| | | | |
|-----------------------|---|------------------|----|
| 第1章 绪论 | 2 | 2.1.1 无机化学矿 | 9 |
| 1.1 化学工艺学的基本概念 | 2 | 2.1.2 煤 | 10 |
| 1.1.1 物料衡算 | 2 | 2.1.3 石油 | 10 |
| 1.1.2 能量衡算 | 3 | 2.1.4 天然气 | 14 |
| 1.1.3 平衡关系 | 3 | 2.1.5 生物质 | 15 |
| 1.1.4 过程速率 | 3 | 2.2 化学反应过程基本概念 | 16 |
| 1.1.5 设备和装备的生产能力及设计能力 | 3 | 2.2.1 反应过程主要效率指标 | 16 |
| 1.1.6 经济核算 | 4 | 2.2.2 反应装置的类型 | 19 |
| 1.1.7 化工安全生产技术 | 4 | 2.2.3 反应条件的影响 | 22 |
| 1.2 化学工艺学的研究内容与方法 | 4 | 2.3 化工反应过程流程设计 | 23 |
| 1.2.1 化学工艺学的研究范畴 | 4 | 2.3.1 反应过程的物料衡算 | 23 |
| 1.2.2 化学工艺过程分类 | 5 | 2.3.2 反应过程的热量衡算 | 25 |
| 1.2.3 化学工艺过程流程 | 5 | 2.4 产物的分离 | 27 |
| 1.3 化学工艺学研究的现状与发展方向 | 7 | 2.4.1 产物分离原理 | 28 |
| 1.3.1 现代化学工业过程特点 | 7 | 2.4.2 分离技术 | 30 |
| 1.3.2 现代化学工业过程发展方向 | 7 | 2.4.3 产物分离流程设计 | 41 |
| 参考文献 | 8 | 2.5 三废治理 | 42 |
| 第2章 化学工艺学基础 | 9 | 2.5.1 环保标准 | 42 |
| 2.1 化工原料资源的分类与加工利用 | 9 | 2.5.2 废气处理技术 | 43 |
| | | 2.5.3 废水处理技术 | 43 |
| | | 2.5.4 废渣处理技术 | 45 |
| | | 2.5.5 噪声控制技术 | 45 |
| | | 参考文献 | 46 |

第二篇 无机化工工艺学

| | | | |
|---------------------|----|-------------------|----|
| 第3章 氯碱化工工艺 | 48 | 3.3.2 隔膜法电解制碱原理 | 55 |
| 3.1 概述 | 48 | 3.3.3 隔膜法电解制碱工艺流程 | 56 |
| 3.1.1 氯碱工业发展概况 | 48 | 3.3.4 电解过程中的副反应 | 56 |
| 3.1.2 中国氯碱工业发展概况 | 48 | 3.3.5 电解液蒸发 | 57 |
| 3.1.3 氯碱工业的特点 | 48 | 3.4 离子交换膜法电解制碱 | 60 |
| 3.1.4 氯碱工业在国民经济中的地位 | 49 | 3.4.1 离子交换膜的进展 | 60 |
| 3.2 原盐的性质及盐水精制 | 49 | 3.4.2 离子交换膜电解槽的进展 | 61 |
| 3.2.1 原盐的性质 | 49 | 3.4.3 离子膜法制碱原理 | 61 |
| 3.2.2 盐水精制 | 50 | 3.4.4 离子膜法制碱工艺流程 | 62 |
| 3.3 隔膜法电解制碱 | 53 | 3.4.5 影响离子膜寿命的因素 | 63 |
| 3.3.1 电化学基本原理 | 53 | 3.4.6 离子膜电解工艺先进性 | 64 |
| | | 参考文献 | 64 |

| | | | |
|--------------------|----|----------------------|----|
| 第4章 湿法磷酸工艺 | 66 | 4.3.2 半水-二水物流程 | 71 |
| 4.1 概述 | 66 | 4.3.3 二水-半水物流程 | 71 |
| 4.1.1 硝酸法 | 66 | 4.4 浓缩 | 72 |
| 4.1.2 盐酸法 | 66 | 4.4.1 浓缩原理和方法 | 72 |
| 4.1.3 硫酸法 | 66 | 4.4.2 磷酸浓缩工艺流程 | 73 |
| 4.2 化学原理 | 67 | 4.5 应用 | 74 |
| 4.2.1 主要化学反应 | 67 | 4.5.1 磷酸盐 | 74 |
| 4.2.2 硫酸钙的结晶 | 68 | 4.5.2 磷石膏 | 75 |
| 4.3 工艺流程 | 70 | 参考文献 | 76 |
| 4.3.1 二水物流程 | 70 | | |

第三篇 有机化工工艺学

| | | | |
|------------------------|----|---|-----|
| 第5章 环氧乙烷生产工艺 | 78 | 6.1 酞菁颜料的化学结构及性质 | 92 |
| 5.1 概述 | 78 | 6.1.1 酞菁的化学结构 | 92 |
| 5.1.1 氯醇法 | 78 | 6.1.2 酞菁的性质 | 93 |
| 5.1.2 直接氧化法 | 78 | 6.2 酞菁的合成技术 | 95 |
| 5.2 化学原理 | 79 | 6.2.1 原料及合成路线 | 95 |
| 5.3 催化剂 | 80 | 6.2.2 苯酞-尿素工艺 | 95 |
| 5.3.1 催化剂简介 | 80 | 6.2.3 邻苯二腈工艺 | 101 |
| 5.3.2 催化氧化机理 | 81 | 6.3 颜料化加工 | 103 |
| 5.3.3 催化反应动力学 | 82 | 6.3.1 酸处理法 | 103 |
| 5.3.4 催化剂制备与研究进展 | 84 | 6.3.2 研磨法 | 104 |
| 5.4 工艺条件 | 85 | 6.3.3 颜料粒子的微胶囊化 | 105 |
| 5.4.1 温度 | 85 | 6.3.4 挤水转相法 | 105 |
| 5.4.2 压力 | 86 | 6.3.5 衍生物的表面改性处理 | 105 |
| 5.4.3 原料纯度 | 86 | 6.4 主要品种和性能 | 105 |
| 5.5 空速 | 87 | 6.4.1 α 型 CuPc 颜料 | 105 |
| 5.6 流程 | 87 | 6.4.2 β 型及 ξ 型 CuPc 颜料 | 106 |
| 5.6.1 工艺流程 | 87 | 6.4.3 C. I. 颜料绿7及 C. I. 颜料 绿36 | 107 |
| 5.6.2 氧化反应器 | 89 | 6.4.4 其他颜料品种 | 107 |
| 5.7 应用 | 90 | 6.5 展望 | 107 |
| 参考文献 | 91 | 参考文献 | 108 |
| 第6章 酞菁颜料生产工艺 | 92 | | |

第四篇 煤化工工艺学

| | | | |
|---------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 第7章 煤的气化与焦化工艺 | 110 | 7.3.5 炼焦化学品的回收与制取 | 167 |
| 7.1 煤化学基础 | 110 | 7.3.6 焦炭性质与应用 | 178 |
| 7.1.1 煤的生成、组成、性质及分类 | 110 | 参考文献 | 182 |
| 7.1.2 煤的利用 | 116 | 第8章 合成氨工艺 | 183 |
| 7.2 煤的气化 | 119 | 8.1 概述 | 183 |
| 7.2.1 气化原理 | 120 | 8.1.1 氨的性质和用途 | 183 |
| 7.2.2 气化方法及工艺 | 121 | 8.1.2 合成氨工业概况 | 183 |
| 7.3 煤的焦化 | 141 | 8.1.3 我国合成氨工业发展 | 183 |
| 7.3.1 炼焦生产原理 | 142 | 8.1.4 合成氨生产方法简介 | 184 |
| 7.3.2 炼焦煤料的制备 | 145 | 8.2 煤气化气体(原料气)的净化 | 185 |
| 7.3.3 炼焦炉及其设备 | 152 | 8.2.1 原料气脱硫 | 185 |
| 7.3.4 炼焦生产操作 | 161 | 8.2.2 一氧化碳的变换 | 187 |

| | | | |
|------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 8.2.3 二氧化碳的脱除 | 190 | 方程 | 193 |
| 8.2.4 原料气的最终净化 | 191 | 8.3.3 催化剂及氨合成的工艺条件 | 193 |
| 8.3 氨的合成 | 192 | 8.3.4 氨合成工艺流程 | 195 |
| 8.3.1 氨合成反应的化学平衡 | 192 | 8.3.5 氨合成塔 | 196 |
| 8.3.2 氨合成的反应机理和动力学 | | 参考文献 | 199 |

第五篇 石油化工工艺学

| | | | |
|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|
| 第9章 石油炼制与加工 | 202 | 第10章 聚丙烯生产工艺 | 269 |
| 9.1 石油的化学组成 | 202 | 10.1 概述 | 269 |
| 9.1.1 石油的一般性质、元素组成和 馏分组成 | 202 | 10.1.1 聚丙烯的发展历史 | 269 |
| 9.1.2 石油气体及石油馏分的烃类 组成 | 205 | 10.1.2 国内聚丙烯的发展状况 | 269 |
| 9.1.3 石油中的非烃类化合物 | 208 | 10.1.3 聚丙烯的牌号 | 269 |
| 9.2 石油的物理性质 | 209 | 10.2 聚丙烯树脂结构与性能 | 270 |
| 9.2.1 油品的蒸发特性 | 210 | 10.3 丙烯聚合机理 | 272 |
| 9.2.2 油品的质量特性 | 211 | 10.3.1 聚合原料 | 272 |
| 9.2.3 油品的流动特性 | 211 | 10.3.2 聚合机理 | 275 |
| 9.2.4 油品的燃烧特性 | 211 | 10.4 聚丙烯生产工艺 | 278 |
| 9.2.5 油品的热性质特性 | 212 | 10.4.1 淤浆法聚合工艺 | 278 |
| 9.2.6 油品的其他特性 | 212 | 10.4.2 溶液法聚合工艺 | 278 |
| 9.3 燃料油生产 | 213 | 10.4.3 液相本体法聚合工艺 | 278 |
| 9.3.1 原油预处理 | 214 | 10.4.4 气相法聚合工艺 | 282 |
| 9.3.2 原油常减压蒸馏 | 220 | 10.4.5 液相-气相组合式连续本体 聚合工艺 | 285 |
| 9.3.3 催化裂化 | 231 | 10.4.6 共聚合工艺 | 288 |
| 9.3.4 催化加氢 | 234 | 10.5 加工与应用 | 288 |
| 9.4 润滑油生产 | 240 | 10.5.1 聚丙烯的流变性 | 288 |
| 9.4.1 润滑油的分类与性能 | 240 | 10.5.2 加工成型 | 289 |
| 9.4.2 润滑油基础油的分类与加工 路线 | 243 | 10.5.3 应用领域 | 290 |
| 9.4.3 润滑油的精制 | 244 | 参考文献 | 292 |
| 9.5 石油烃裂解 | 257 | 第11章 聚酯生产工艺 | 293 |
| 9.5.1 裂解原理 | 258 | 11.1 概述 | 293 |
| 9.5.2 裂解炉 | 259 | 11.2 聚酯合成原理 | 293 |
| 9.5.3 裂解气的净化与分离 | 260 | 11.2.1 聚酯合成化学反应原理 | 293 |
| 9.6 芳烃生产及转化 | 261 | 11.2.2 聚酯合成的主反应 | 294 |
| 9.6.1 芳烃的生产 | 262 | 11.2.3 聚酯合成反应动力学 | 297 |
| 9.6.2 芳烃的转化 | 265 | 11.3 聚酯生产工艺条件 | 299 |
| 参考文献 | 268 | 11.4 聚酯生产工艺流程 | 303 |
| | | 11.5 聚酯的应用 | 305 |
| | | 参考文献 | 306 |

第一篇

基础篇

A series of horizontal lines for writing, consisting of 20 lines.

第 1 章 绪论

1.1 化学工艺学的基本概念

化学工艺学是研究将化学原料加工成化学产品的一门学问，是化学工程与工艺专业的一门专业课程，也是一门时代性很强的综合性学科。它研究不同化工产品的原料特点、生产原理、生产流程、适宜操作条件以及所用机械设备的构造和材料等。根据所研究的化工产品类型不同，化学工艺学又可分为无机化工工艺学、有机化工工艺学等很多门类。

在化学工艺学中涉及许多基本概念，如物料衡算、能量衡算、平衡关系、过程速率和经济核算等，它们对化工过程开发、设备设计和操作等具有重要意义。下面逐一加以介绍。

1.1.1 物料衡算

工艺设计中，物料衡算是在工艺流程确定后进行的。目的是根据原料与产品之间的定量转化关系，计算原料的消耗量，各种中间产品、产品和副产品的产量，生产过程中各阶段的消耗量以及组成，进而为热量衡算、其他工艺计算及设备计算打基础。

物料衡算是以质量守恒定律为基础对物料平衡进行计算。物料平衡是指“在单位时间内进入系统（体系）的全部物料质量必定等于离开该系统的全部物料质量再加上损失掉的和积累起来的物料质量”。

物料衡算通式如下：

$$\sum G_{\text{投入}} = \sum G_{\text{产品}} + \sum G_{\text{回收}} + \sum G_{\text{流失}}$$

式中 $\sum G_{\text{投入}}$ —— 投入系统的物料总量；
 $\sum G_{\text{产品}}$ —— 系统产出的产品和副产品总量；
 $\sum G_{\text{流失}}$ —— 系统中流失的物料总量；
 $\sum G_{\text{回收}}$ —— 系统中回收的物料总量。

其中产品量应包括产品和副产品；流失量包括除产品、副产品及回收量以外各种形式的损失量，污染物排放量也包括在其中。

环境影响评价中的物料平衡算法即是通过这个物料平衡的原理，在计算条件具备的情况下，估算出污染物的排放量。

物料平衡计算包括总物料平衡计算、有毒有害物料平衡计算及有毒有害元素物料平衡计算。进行有毒有害物料平衡计算时，当投入的物料在生产过程中发生化学反应时，可按下列总量法或定额工时进行衡算：

$$\sum G_{\text{排放}} = \sum G_{\text{投入}} - \sum G_{\text{回收}} - \sum G_{\text{处理}} - \sum G_{\text{转化}} - \sum G_{\text{产品}}$$

式中 $\sum G_{\text{投入}}$ —— 投入物料中的某物质总量；
 $\sum G_{\text{产品}}$ —— 进入产品结构中的某物质总量；
 $\sum G_{\text{回收}}$ —— 进入回收产品中的某物质总量；
 $\sum G_{\text{处理}}$ —— 经净化处理的某物质总量；
 $\sum G_{\text{转化}}$ —— 生产过程中被分解、转化的某物质总量；
 $\sum G_{\text{排放}}$ —— 某物质以污染物形式排放的总量。

采用物料平衡法计算污染物排放量时，必须对生产工艺、物理变化、化学反应及副反应

和环境管理等情况进行全面了解，掌握原料、辅助材料、燃料的成分和消耗定额、产品的产收率等基本技术数据。

1.1.2 能量衡算

物料衡算完成后，对于没有传热要求的设备，可以由物料处理量、物料性质及工艺要求进行设备的工艺设计，以确定设备的型式、台数、容积以及重要尺寸。对于有传热要求的设备则必须通过能量衡算，才能确定设备的主要工艺尺寸。无论是进行物理过程的设备或是化学过程的设备，多数伴有能量传递过程，所以必须进行能量衡算。

能量衡算是基于能量守恒定律。根据此定律，输入操作过程的能量恒等于操作后所输出的能量。能量可以同进入设备的物料一起输入和随物料一起输出，或者是分别输入或输出。同物料一起输入或输出的能量包括这些物料的内能（热能、化学能等）、位能和动能；而不随物料输入或输出的能量则有通过器壁加热而输入的热量，泵和压缩机所消耗的机械功，以及设备损失于周围的热量等。

通过能量衡算可以求得在流体输送和压缩时所需要的动力，在加热和冷却时所需要供给和导出的热量，在绝热情况下进行混合或反应时物系的温度变化等。为了便于了解能量衡算，采用由磷灰石矿升华制磷的热平衡图解来进行说明，如图 1-1 所示。

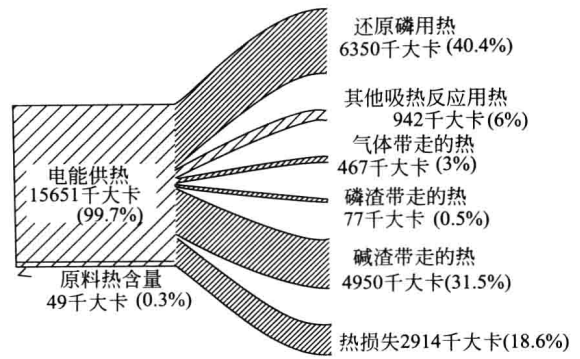


图 1-1 制磷之热量平衡图解

1.1.3 平衡关系

不论是传热、传质还是化学反应过程，在经过足够的时间后，最终均能达到平衡状态。例如，热量从热的物体传向冷的物体，一直进行到两物体的温度相等为止。又如，盐在水中溶解时，一直进行到溶液达到饱和为止。此时，液相与固相处于平衡状态。在吸收、蒸馏、萃取、结晶等过程中也都存在着相平衡关系。在化学反应中，当正逆两反应速率相等时，反应达到平衡。

平衡是在一定条件下物系变化可能到达的极限。除非影响平衡的条件发生变化，否则物系变化的极限不会改变。通过平衡关系可以判断物系变化能否进行，以及能进行到何种程度。因此，平衡关系对于许多化工生产过程具有重要的意义。

1.1.4 过程速率

过程速率是指物理或化学变化过程在单位时间内的变化率。

一般用单位时间过程进行的变化量表示过程的速率。如传热过程速率用单位时间传递过的热量，或用单位时间单位面积传递过的热量表示；传质过程速率用单位时间单位面积传递过的质量表示。

过程进行的速率决定设备的生产能力，过程速率越大，设备生产能力也越大，或在同样产量时所需的设备尺寸越小。在工程上，过程的速率问题往往比物系平衡问题显得更重要。

过程的速率可用如下基本关系表示：

过程速率 = 过程推动力 / 过程阻力

1.1.5 设备和装备的生产能力及设计能力

生产能力 (production capacity) 一般是指在单位时间内实际生产出的产品量。设备或装备在最适宜的条件下所可能达到的生产能力称为设计能力 (designed capacity)。

每个设备的生产能力是与生产过程的速度有直接关系的。因此，研究过程速率以找出加速过程的方法，对于多数化工过程，特别是具有速率特征的化工过程具有重要的意义。

1.1.6 经济核算

企业经济核算包括生产经营全过程的核算，主要是：①生产消耗的核算，又称生产成本的核算，包括物质消耗与劳动消耗两方面；②生产成果的核算，包括质量和数量两个方面；③资金的核算，又称经济核算，包括固定资金和流动资金两方面；④财务成果的核算，又称利润的核算。各项核算内容通过一系列技术经济指标来体现。经济核算的指标体系一般包括产量指标（实物产量、工时产量）、产值指标（总产值、商品产值、净产值）、品种指标（产品品种数量、新产品数量等）、质量指标（产品或零部件合格率、优质品率、成品或部件一次装配合格率等）、劳动指标（全员或生产工人劳动生产率、工时利用率等）、物资消耗指标（单位产品消耗量、万元产值物资消耗量等）、设备利用指标（设备利用率等）、成本指标（主要产品单位成本、可比产品成本降低率等）、资金占用指标（固定资金利润率、流动资金利润率、流动资金周转天数等）、利润指标（资金利润率、产值利润率）等。

为保证经济核算工作正常进行，必须做好企业内部的原始记录、定额管理、计量工作、清产核资和厂内计划价格等基础工作。通过经济核算，职工个人的经济利益要同工厂的经济利益挂起钩来，做好考核、分析、评比工作，提高核算的效果。中国国营企业的经济核算普遍采取统一领导，分级归口管理，专业核算与群众核算相结合的方法。大型企业一般实行厂级、车间、班组三级核算，中、小型企业一般实行厂级、车间二级核算或厂级一级核算。科室的核算属于专业核算。企业经济核算的日常工作，通常由计划、财务部门组织有关科室、车间的职能人员进行。实行经济核算，有利于加强企业管理，调动职工的积极性，促进企业改善生产经营。

1.1.7 化工安全生产技术

由于在许多化工生产中使用各种有毒的、爆炸性的及其他对健康有害的物质，安全生产是必须考虑的问题。对于安全隐患，如高温和低温，有害灰尘、蒸气和气体，有害物质等，应采取有效措施防止安全事故的发生。化工安全生产技术包括防火防爆技术、防尘防毒技术、防静电技术、电气安全技术和压力容器安全技术等，在化工生产中通过工艺设计和操作，防止安全事故的发生，确保国家、企业财产和人民生命安全。

1.2 化学工艺学的研究内容与方法

1.2.1 化学工艺学的研究范畴

化学工业又称化学加工工业，泛指生产过程中化学方法占主要地位的制造工业。由原料到化学产品的转化要通过化学工艺来实现。化学工艺即化工生产技术，系指将原料物质主要经过化学反应转变为产品的方法和过程，包括实现这种转变的全部化学的和物理的措施。

在早期，人类进行化工生产仅处于感性认识的水平，随着生产规模的发展，各种经验的积累，特别是许多化学定律的发现和各种科学原理的提出，使人们从感性认识提升到理性认识的水平，利用这些定律和原理来研究和指导化工生产，从而产生了化学工艺学这门学科。

化学工艺学是根据化学、物理和其他科学的成就，来研究综合利用各种原料生产化工产品的方法原理、操作条件、流程和设备，以创立技术上先进、经济上合理、生产上安全的化工生产工艺的学科。

化学工艺具有个别生产的特殊性，即生产不同的化学产品要采用不同的化学工艺，即使生产相同产品但原料路线不同时，也要采用不同的化学工艺。尽管如此，化学工艺学所涉及的范畴是相同的，一般包括原料的选择和预处理；生产方法的选择及方法原理；设备（反应器和其他）的作用、结构和操作；催化剂的选择和使用；其他物料的影响；操作条件的影响和选定；流程组织；生产控制；产品规格和副产物的分离与利用；能量的回收和利用；对不

同工艺路线和流程的技术经济评比等问题。

化学工艺学与化学工程学都是化学工业的基础学科。前者主要研究化工生产工艺，范畴如前所述；后者主要研究化学工业和其他过程工业生产中进行的化学过程和物理过程的共同规律，它的一个重要任务就是研究有关工程因素对过程和装置的效应，特别是放大中的效应。化学工艺与化学工程相配合，可以解决化工过程开发、装置设计、流程组织、操作原理及方法等方面的问题；此外，解决化工生产实际中的问题也需要这两门学科的理论指导。化学工业的发展促进了这两门学科不断发展和完善，它们反过来能更加促进化学工业迅速发展和提高。

化学工业分类比较复杂，过去把化学工业部门分为无机化学和有机化学工业两大类，前者主要有酸、碱、盐、硅盐酸、稀有元素、电化学工业等；后者主要有合成纤维、塑料、合成橡胶、化肥、农药等工业。随着化学工业的发展，跨类的部门层出不穷，逐步形成酸、碱、化肥、农药、有机原料、塑料、合成橡胶、合成纤维、染料、涂料、医药、感光材料、合成洗涤剂、炸药、橡胶等门类繁多的化学工业。

1.2.2 化学工艺过程分类

化学工艺过程可以按不同特征来进行分类，如按照原料、产品、反应物质形态、反应系统性质、过程能量特征以及设备特征等进行分类。

根据原料来源不同，化学工艺学可分为矿物、植物和动物原料的加工工艺学，煤化工工艺学，石油化工工艺学等等。

根据化工产品特性不同，化学工艺学又可分为肥料、染料、药剂、食品、人造燃料等工艺学。

根据反应物形态不同，可将工艺学分为液态、气态、固态和多相系统工艺学。这种分类法，虽然在研究生产过程之物理化学基础时具有很大的优越性，但在课堂教学中还很少采用。

根据化学元素不同，化工工艺过程又可分为酸金属工艺学、重金属工艺学、卤素族工艺学等等。

根据化学反应的类别不同，可将化工工艺过程分为还原、氧化、氯化、磺化、分解、电解等工艺学。

根据化工设备特征不同，化学工艺学可分为粉碎及研磨、相分离、热过程及其他物理过程工艺学等。此种分类一般不考虑化学过程的本质，它是在操作过程和设备过程中所采用的分类法，这些过程主要包括机械、热和电过程。

1.2.3 化学工艺过程流程

化工原料经过一系列衔接或平行的工序最终变成产品的过程称为工艺流程。为表达清楚起见，常用图例说明这些工序互相联系的情况，这种图称为工艺流程图。

在化工工艺流程图上，可以清楚看到主要反应物料的流向、主要生产设备及它们排列的次序和相对高度，以及选用的仪器仪表和控制方式，这对了解生产全过程是十分有用的。

化学工艺过程流程一般由间歇过程、连续过程以及物料流向与处理次数、再生等一系列过程组成。

(1) 间歇过程及连续过程

工艺过程一般包括间歇过程和连续过程。间歇过程的特征就是在同一个部位上进行该过程的相似步骤，而过程的化学条件和物理条件（反应物间的数量比、浓度、温度、压力及反应速率等）是随时间而变化的。这些化学和物理条件在设备的每一点上都在随时间而变化。一次操作完成后，把产品卸出，再装入新反应物以重复操作。而连续过程

的特征是过程的各阶段系在各个连串起来的设备内或在一个设备的各不同部分内同时进行，而实现过程各阶段的条件并不随时间而改变。所以对连续过程来说，在设备每一点上过程进行的条件是恒定的。换言之，连续过程从空间的观点看是稳定的过程，而间歇过程则是不稳定的过程。

(2) 流向

工艺过程的流向一般包括顺流和逆流。顺流过程特征是各反应物或热流和物料的运动方向是一致的。逆流过程的特征是各反应物或热流和物料的运动方向是彼此相向的(或彼此相反的)。另外，假若各反应物或热流和物料系彼此成一定角度而运动，则这类流程称为错流过程。可作为错流过程的例子有：在某些设备(如水管式锅炉)中的热交换过程，在这些设备中，气体或液体系从管内流过，而在管子的外面用沿垂直方向流动的气流或液流加热(或冷却)；在塔中使液体或气体呈交错流动以进行某些物质的蒸馏和分馏过程；在某种构造的塔中进行的精馏过程。用图来进一步地说明三种不同的流向，如图 1-2 和图 1-3 所示。

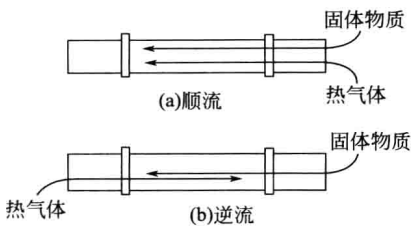


图 1-2 物料在回转干燥器内干燥时的流向

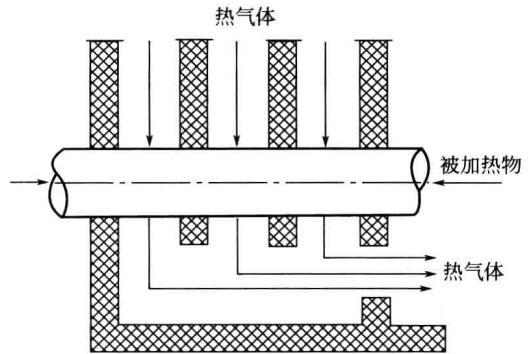


图 1-3 烟道气和通过管内的被加热物间的交错流向

以上的图使我们更清晰地了解了三种不同流向的特征。

(3) 物料处理次数

从物料的处理次数出发，将过程分为开链式和循环式两种。循环(环状的)过程是把未起反应的物质多次送回(全部或部分)和新的反应物混合后再重新进入循环系统的开端。循环的概念可以是对某一个设备、对反应物的某一物流或对它们的某些组成部分而言。

在循环过程中，物料处理次数的极限是无限大，而对于开链式的过程说来，则等于一。在一般情况下，物料的处理次数以取整数表示之。此整数表示物料在离开设备以前，所完成的循环次数。循环过程和开链过程可以是逆流的也可以是顺流的。实际上，常常将各种流程配合使用。

(4) 再生

对于“再生”一词我们并不陌生，许多工艺流程都实行物质的再生(regeneration)，也就是说将反应过的物质转变为原始状态而重复加以利用。再生的例子有很多，如：由于吸收了气体中的酸性物质而衰老的气体净化剂之活性的恢复；长期使用后的催化剂之活性的恢复；用酸和碱处理后的橡胶制品，以除去其中的杂质重新把橡胶加以利用；以加热、加入软化剂、机械处理等方法使老化后之硫化橡胶再具有可塑性等。除此之外，不仅物质可以再生，能量也可以再生。如在热过程中排出气体在热交换器中隔一层器壁把热量传给空气(或带热的气体)，热交换器也因此被叫做回热器。

1.3 化学工艺学研究的现状与发展方向

1.3.1 现代化学工业过程特点

(1) 原料、生产方法和产品的多样性与复杂性

用同一种原料可以制造多种不同的化工产品；同一种产品可采用不同原料或不同方法和工艺路线来生产；一个产品可以有不同用途，而不同产品可能会有相同用途。由于这些多样性，化学工业能够为人类提供越来越多的新物质、新材料和新能源。

(2) 向大型化、综合化发展，精细化率也在不断提高

装置规模增大，其单位容积单位时间的产出率随之显著增大，比能耗下降。

(3) 多学科合作、生产技术密集

现代化学工业是高度自动化和机械化的生产部门，进一步朝着智能化发展。当今化学工业的持续发展越来越多地依靠采用高新技术和迅速将科研成果转化为生产力，如生物与化学工程、微电子与化学、材料与化工等不同学科的相互结合，可创造出更多优良的新物质和新材料；计算机技术的高水平发展，已经使化工生产实现了远程自动化控制，也将给化学品的合成提供强有力的智能化工具；将组合化学、计算化学与计算机方法结合，可以准确地进行新分子、新材料的设计与合成，节省大量实验时间和人力。因此化学工业需要高水平、有创造性和开拓能力的多种学科不同专业的技术专家，以及受过良好教育及训练的、懂得生产技术的操作和管理人员。

(4) 重视能量合理利用，积极采用节能工艺和方法

化工生产是由原料物质主要经化学变化转化为产品物质的过程，同时伴随有能量的传递和转换，必须消耗能量。化工生产部门是耗能大户，合理用能和节能显得极为重要，许多生产过程先进性体现在采用了低能耗工艺或节能工艺。

(5) 资金密集，投资回收速度快，利润高

现代化学工业的装备复杂，技术程度高，基建投资大，产品更新迅速，需要大量的投资。然而化工产品产值较高，成本低，利润高，一旦工厂建成投产，可很快收回投资并获利。化学工业的产值是国民经济总产值指标的重要组成部分。

(6) 易燃、易爆、有毒仍然是现代化工企业首先要解决的问题

要采用安全的生产工艺，要有可靠的安全技术保障、严格的规章制度及其监督机构。创建清洁生产环境，大力发展绿色化工，采用无毒无害的方法和过程，生产环境友好的产品，这是化学工业赖以持续发展的关键之一。

1.3.2 现代化学工业过程发展方向

近年来，控制论方法和计算技术的广泛应用使得化学和化学工艺学领域中，无论实验室研究，还是工业化生产，都可以运用“系统分析”的方法。“系统分析”的核心概念是“系统”的概念。将化工企业看作大的控制系统，可以将完整的界区分成三个相互联系和作用的界区：原料准备区、化学变化区和目标产品分离区。每个界区内都存在设备间物料、能量和工艺联系。整个系统的复杂性取决于它所包含信息的多少，系统所含信息越多它就越复杂。从这种观点出发，化工厂或联合企业可以看作是三个不同层次水平信息的集合。对任何化工或石油化工生产都具有典型性的工艺过程处于低层次水平。这些过程是：液体和气体的加工，加工产物和热载体之间的传热，反应器中的化学变化，目标产品的分离过程（吸收、蒸馏、萃取）。

对于典型过程低等级水平的数学模型，目前不但已经建成，而且已经系统化，因此，可以很容易地实现单个设备工艺条件的优化。例如，进行换热设备、反应器、分离塔（精馏、吸收、萃取等）最佳化工况的计算和选择。

“系统分析”首先打开了在化工企业第二层次，也即工艺流程的界区上计算过程并控制过程的可能性。因为它能保证完成提高劳动生产率这一主要任务。

另外，在目前化学工艺与工程研究方法中，随着计算机软硬件及计算技术的发展，通过建立过程机理模型，进行过程的模拟与优化，深化对全过程进行安全性、可靠性、有效性、最佳经济性分析已成为化学工艺与工程研究的必不可少的步骤和重要任务之一。而进行过程模拟与优化的前提就是建立适宜的数学模型。美国 Mathworks 公司开发的 MATLAB 数值计算软件目前已被广泛应用于化工模拟的建模中，并取得了良好效果。美国麻省理工学院开发的 Aspen Plus 软件、Simulation Science 公司开发的 PROCESS/II、美国帝国理工学院开发的 SPEEDUP 软件、美国卡耐基-梅隆大学开发的 Ascend 软件、美国佛罗里达大学开发 Hysys 软件、美国 Monsanto 公司开发的 FLOWTRAN 软件、美国休斯敦大学开发的 CHESS 软件、英国 Process Systems Enterprise 公司开发的 G Program 软件、青岛科技大学开发的 ECSS 模拟软件、美国密歇根大学开发的 DYSCO 软件、杜邦公司开发的 DYFLO 软件、日本科学家与工程师协会同英国 CAD 中心联合开发的 DPS 软件、日本东亚化工公司开发的 MODYS 软件等众多化工过程模拟优化辅助工具在国内外均得到了普遍应用。

在现代化学工艺与工程的研究中，工艺路线与方案的设计选择可以借助相应软件以提高效率和实现最优化。例如，在计算机上进行药物分子设计及合成工艺路线设计最典型的实例是催化剂设计与药物分子设计。长期以来催化剂的筛选（包括活性剂组分、助催化剂等）制备工艺主要依靠实验。现在已能根据反应的类型和特征进行有效预测，缩短了开发进程。药物分子的设计也是如此。现在借助相应软件可以预测药物分子各官能团的作用，从而加快研制进度，缩短研制周期。

随着计算机系统的飞速发展，化学工艺的研究方法发生了重大变化，实现了自动化学反应实验室的集成，使工艺放大与过程安全技术有了重大进展，另外，由于 DCS 控制系统已经普遍应用于国内外的各种工艺及工程装置中，灵活的现场技术应用也日趋成熟，在线故障检测与诊断工具越来越完善，高效环保分离手段使大型工业装置的设备尺寸变小，集成化程度越来越高，全厂规划、节能减排理念已深入人心，进而使得化学工艺的研究水平有了更进一步的提高。

参考文献

- [1] 蔡强. 化学工业产业发展趋势. 现代化工, 1993 (3): 3-6, 12.
- [2] 钱鸿元. 世界化工现状、趋势和展望. 化工进展, 1994 (3): 1-5.
- [3] 崔恩选. 化学工艺学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [4] 姚虎卿, 刘晓勤, 吕效平. 化工工艺学. 南京: 河海大学出版社, 1994.
- [5] 崔恩选. 化学工艺学 [M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- [6] 米镇涛. 化学工艺学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [7] 马新宾, 王胜平, 王华, 韩金玉. 化学工艺学——化工基础知识与工程实践的桥梁 [J]. 化学工业与工程, 2005, 22 (增刊): 73-74.
- [8] 沃里福科维奇. 普通化学工艺学: 第一卷 上册. [M]. 北京: 重工业出版社, 1955.
- [9] 黄仲九. 化学工艺学概论 [M]. 浙江: 浙江大学出版社, 1999.
- [10] 曾之平, 王扶明. 化工工艺学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [11] 张锁江, 张香平. 绿色过程系统集成. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [12] 屈一新. 化工过程数值模拟及软件. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [13] 黄仲九, 房鼎业. 化学工艺学. 北京: 高等教育出版社, 2008: 8-15.