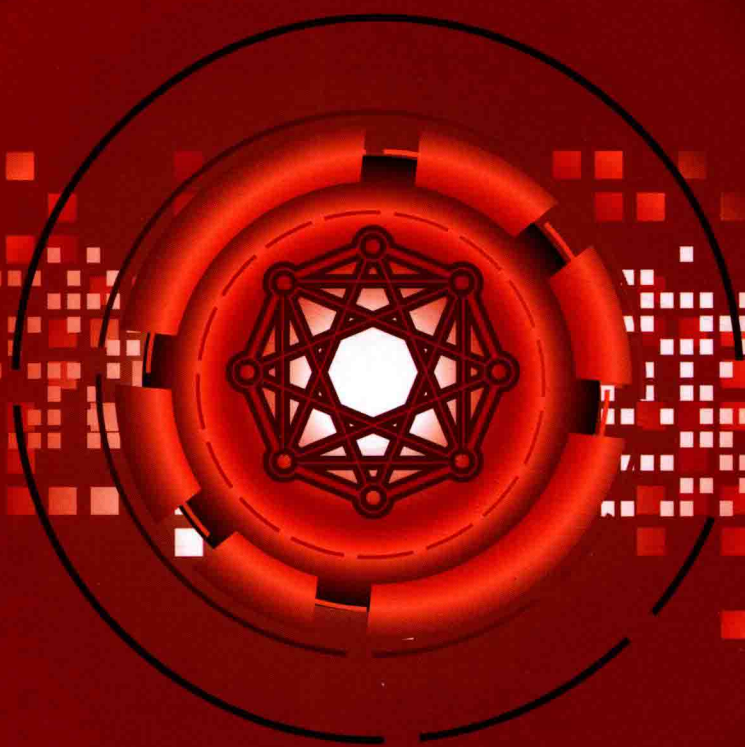


过程设备与工业应用丛书

# 反应过程、设备 与工业应用

廖传华 王重庆 梁荣 著



化学工业出版社

过程设备与工业应用丛书

# 反应过程、设备 与工业应用

廖传华 王重庆 梁荣 著



化学工业出版社

· 北京 ·

《反应过程、设备与工业应用》是“过程设备与工业应用丛书”的一个分册，本书在系统介绍化学反应基本理论的基础上，分别详细介绍了釜式反应器、管式反应器、塔式反应器、固定床反应器、流化床反应器、离子交换反应器、电化学反应器、膜生物反应器以及其他一些新式化学反应器的工作特性、设计原理、工业应用及评价。

《反应过程、设备与工业应用》不仅适用于石油、化工、生物、制药、食品、医药、环境、机械等专业的高等学校的教师、研究生及高年级本科生阅读，同时对相关行业的工程技术人员、研究设计人员也会有所帮助。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

反应过程、设备与工业应用/廖传华, 王重庆, 梁荣  
著. —北京: 化学工业出版社, 2017. 11

(过程设备与工业应用丛书)

ISBN 978-7-122-29658-0

I. ①反… II. ①廖…②王…③梁… III. ①反应设  
备 IV. ①TQ052

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 102283 号

---

责任编辑: 卢萌萌 仇志刚

装帧设计: 王晓宇

责任校对: 王 静

---

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: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 24 $\frac{3}{4}$  字数 611 千字 2018 年 6 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: 138.00 元

版权所有 违者必究

# 前言

## FOREWORD

过程工业的最大特点是在原料生产过程中要经过化学变化才能实现产品的生产。在国民经济的各个部门中，过程工业得到了广泛应用，其产品遍及工农业生产的各个部门和人们生产生活中的各个领域。

化学反应是过程工业的中心环节。为使反应进行得迅速、完全，需要维持一定的温度、压力和流量等操作条件，多数情况下还要使用催化剂。因此，在过程工业中，要创造良好的传热、传质和流体流动条件，以实现反应过程最优化，包括设计最优化与操作最优化。为此，在江苏高校品牌专业建设工程资助项目（PPZY2015A022）的资助下，我们撰写了这本《反应过程、设备与工业应用》，除理论阐述外，还针对各种反应设备列举了工业应用实例，具有很强的实践性，力求使读者能通过本书的学习，对目前过程工业中涉及的反应设备及其应用特性有一个概括性的了解。

全书共分11章。第1章根据过程工业所用原料和生产产品的特性，提出了对反应设备的要求；第2章对化学反应过程的基本理论进行了介绍；第3章介绍了釜式反应器及其工业应用；第4章介绍了管式反应器及其工业应用；第5章介绍了塔式反应器及其工业应用；第6章介绍了固定床反应器及其工业应用；第7章介绍了流化床反应器及其工业应用；第8章介绍了离子交换反应器及其工业应用；第9章介绍了电化学反应器及其工业应用；第10章介绍了膜生物反应器及其工业应用；第11章介绍了除上述几种反应器之外的其他化学反应器及其工业应用。

全书由南京工业大学廖传华、王重庆和南京三方化工设备监理有限公司梁荣合著，其中第1章、第3章、第7章、第8章、第10章由廖传华著，第2章、第4章、第9章、第11章由王重庆著，第5章、第6章由梁荣著。全书最后由廖传华统稿。

全书从选题到材料的收集整理、文稿的写作及修订等方面都得到了南京工业大学黄振仁教授的大力支持，在此深表感谢。南京三方化工设备监理有限公司赵清万、许开明、李志强、南京工业大学李政辉对本书的撰写工作提出了大量宝贵的建议，南京朗润机电进出口公司朱海舟提供了大量图片资料，研究生赵忠祥、闫正文、王太东、李洋、刘状、汪威、李亚丽、廖玮、宗建军等在资料收集与文字处理方面提供了大量的帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书的写作与修订工作历时三年，虽经多次审稿、修改，但由于作者水平有限，不妥及疏漏之处在所难免，敬请广大读者不吝赐教。在写作过程中参考了大量的相关资料，但书中没有一一列出，在此谨对原文作者致以衷心的感谢。

著者

2017年8月于南京工业大学

# 目录

# CONTENTS

## 第1章 绪论

- 1.1 过程工业与工业化学过程 /001
  - 1.1.1 过程工业 /001
  - 1.1.2 工业化学过程 /002
- 1.2 化学反应过程的基本规律 /004
- 1.3 反应过程与设备的关系 /006
  - 1.3.1 最优化的经济目标 /006
  - 1.3.2 最优化的技术目标 /007
- 1.4 化学反应与反应设备的分类 /008
  - 1.4.1 化学反应的分类 /008
  - 1.4.2 工业反应设备的类型 /009
- 1.5 化学反应器的设计与放大 /012
  - 1.5.1 化学反应器的设计原则 /012
  - 1.5.2 工业反应器的放大 /013
- 1.6 化学反应过程与设备的发展 /015

## 第2章 化学反应过程基本理论

- 2.1 化工原料资源 /018
  - 2.1.1 煤炭 /019
  - 2.1.2 石油 /021
  - 2.1.3 天然气 /023
  - 2.1.4 生物质 /023
  - 2.1.5 工业“三废” /025
- 2.2 化学反应动力学基础 /026

- 2.2.1 化学反应速率 /026
- 2.2.2 反应速率的影响因素 /027
- 2.2.3 复杂反应的动力学表达 /030
- 2.3 反应器的操作方式 /032
- 2.4 反应器计算的基本方程式 /033
  - 2.4.1 反应动力学方程式 /034
  - 2.4.2 物料衡算式 /035
  - 2.4.3 热量衡算式 /035
- 2.5 均相理想反应器 /036
  - 2.5.1 均相反应器的特点 /036
  - 2.5.2 釜式反应器的设计与操作 /037
  - 2.5.3 管式反应器的设计与操作 /043
- 2.6 连续流动反应器的停留时间分布 /045
  - 2.6.1 非理想流动 /045
  - 2.6.2 停留时间分布函数 /046
  - 2.6.3 停留时间分布函数的应用 /048
- 2.7 非理想流动 /049
  - 2.7.1 非理想流动模型 /050
  - 2.7.2 非理想流动对反应结果的影响 /053
- 参考文献 /055

## 第3章 釜式反应器

- 3.1 间歇操作釜式反应器工艺计算 /057
  - 3.1.1 反应时间 /057
  - 3.1.2 反应器有效体积 /058
- 3.2 连续操作釜式反应器工艺计算 /059
  - 3.2.1 单段连续釜式反应器 /060
  - 3.2.2 多段连续釜式反应器 /060
- 3.3 搅拌器 /063
  - 3.3.1 搅拌的混合机理和液体流动特性 /064
  - 3.3.2 常用搅拌器的类型及性能特征 /067
  - 3.3.3 搅拌功率 /072
- 3.4 搅拌釜式反应器的传热 /078
  - 3.4.1 反应釜的传热装置 /078
  - 3.4.2 高温热源的选择 /080

- 3.5 搅拌反应釜传热系数的计算 /082
  - 3.5.1 反应器内壁对流传热系数的计算 /083
  - 3.5.2 蛇管外壁对流传热系数的计算 /084
- 3.6 立式搅拌反应釜的选用 /085
  - 3.6.1 搅拌器的选型 /085
  - 3.6.2 立式搅拌反应釜的选型 /086
- 3.7 釜式反应器在硝基苯生产中的应用 /088
  - 3.7.1 生产工艺 /088
  - 3.7.2 硝化剂 /090
  - 3.7.3 硝化反应器 /091
  - 3.7.4 硝化反应器的放大设计 /092
- 参考文献 /094

## 第4章 管式反应器

- 4.1 管式反应器的计算基础方程式 /096
  - 4.1.1 计算基础方程式 /097
  - 4.1.2 空间速度与空间时间 /097
- 4.2 液相管式反应器的设计 /098
  - 4.2.1 等温液相管式反应器 /098
  - 4.2.2 变温液相管式反应器 /099
- 4.3 气相管式反应器的设计 /101
- 4.4 管式反应器的数学模拟 /102
  - 4.4.1 管式反应器的数学模型 /103
  - 4.4.2 数学模型方程的求解 /104
- 4.5 反应器类型和操作方式的比较 /104
  - 4.5.1 生产能力的比较 /105
  - 4.5.2 反应选择性比较 /107
  - 4.5.3 操作与计算最优化 /109
- 4.6 管式反应器在环氧乙烷生产中的应用 /109
  - 4.6.1 乙烯氧化合成环氧乙烷的反应机理 /111
  - 4.6.2 反应过程的影响因素 /112
  - 4.6.3 氧化反应器的设计 /117
  - 4.6.4 氧化反应器的结构特点 /120
- 4.7 管式反应器在聚乙烯生产中的应用 /121
  - 4.7.1 聚乙烯的分子结构及分类 /122



- 4.7.2 聚乙烯的生产工艺 /123
- 4.7.3 乙烯自由基聚合原理及动力学 /126
- 4.7.4 高压管式反应器 /130
- 参考文献 /133

## 第5章 塔式反应器

- 5.1 塔式反应器的类型及构造 /135
  - 5.1.1 塔式反应器的分类 /135
  - 5.1.2 塔式反应器的一般构造 /136
  - 5.1.3 附属装置 /137
  - 5.1.4 塔类型的选择 /139
- 5.2 板式塔 /139
  - 5.2.1 板式塔的结构 /140
  - 5.2.2 塔板类型 /140
  - 5.2.3 浮阀塔的设计计算 /142
- 5.3 填料塔 /146
  - 5.3.1 物理吸收过程 /146
  - 5.3.2 化学吸收过程 /147
  - 5.3.3 填料塔的设计 /151
- 5.4 鼓泡塔 /156
  - 5.4.1 鼓泡塔的操作状态 /156
  - 5.4.2 鼓泡塔内的流动特性 /157
  - 5.4.3 鼓泡塔内的传热特性 /161
  - 5.4.4 鼓泡塔的工业应用 /162
- 5.5 塔设备设计常见错误 /171
- 5.6 喷射反应器 /173
  - 5.6.1 喷射反应器的研究现状及进展 /173
  - 5.6.2 喷射反应器的应用 /174
- 参考文献 /177

## 第6章 固定床反应器

- 6.1 固定床反应器的构造 /179
- 6.2 固定床反应器内的流体流动 /181



- 6.2.1 催化剂颗粒直径和形状系数 /181
- 6.2.2 床层空隙率 /182
- 6.2.3 流体在固定床中的流动特性 /183
- 6.2.4 流体流过固定床层的压力降 /184
- 6.3 固定床反应器内的传热 /185
  - 6.3.1 床层对壁总传热系数 /185
  - 6.3.2 床层有效导热系数 /187
  - 6.3.3 表观壁膜传热系数 /189
  - 6.3.4 流体与催化剂颗粒间的传热系数 /191
- 6.4 固定床反应器内的传质 /191
  - 6.4.1 流体与催化剂颗粒外表面间的传质 /192
  - 6.4.2 催化剂颗粒内部的传质 /194
  - 6.4.3 床层内的混合扩散 /196
- 6.5 固定床反应器的设计 /197
  - 6.5.1 总反应速率方程式 /197
  - 6.5.2 反应器的设计 /199
- 6.6 固定床反应器在合成氨生产中的应用 /201
  - 6.6.1 一氧化碳变换的基本原理 /202
  - 6.6.2 一氧化碳变换的工艺流程 /206
  - 6.6.3 变换反应器 /207
  - 6.6.4 变换反应器的新发展 /210
- 6.7 固定床反应器的日常运行与操作 /212
- 6.8 固定床反应器在二甲醚生产中的应用 /214
  - 6.8.1 二甲醚的合成技术 /215
  - 6.8.2 甲醇脱水工艺及反应器设计 /217
- 参考文献 /223

## 第7章

## 流化床反应器

- 7.1 流态床反应器的特性 /226
  - 7.1.1 流态化 /226
  - 7.1.2 散式流化床和聚式流化床 /227
  - 7.1.3 流化床中的气泡及其行为 /227
  - 7.1.4 流化床的异常现象及处理方法 /228
  - 7.1.5 流化床反应器内的传质 /229
  - 7.1.6 流化床反应器内的传热 /231

- 7.2 流化床反应器的设计 /232
  - 7.2.1 反应器直径与高度的确定 /232
  - 7.2.2 压力降的计算 /234
  - 7.2.3 反应器的数学模型 /237
- 7.3 流化床反应器的运行与操作 /239
- 7.4 流化床反应器在丙烯腈生产中的应用 /241
  - 7.4.1 丙烯腈生产工艺 /242
  - 7.4.2 丙烯氨氧化反应器 /245
- 7.5 流化床反应器在苯胺生产中的应用 /248
  - 7.5.1 苯胺的生产路线 /248
  - 7.5.2 加氢流化床反应器 /250
- 7.6 流化床反应器的研究发展 /255
- 参考文献 /257

## 第8章 离子交换反应器

- 8.1 离子交换法的基本原理 /260
  - 8.1.1 离子交换平衡 /260
  - 8.1.2 离子交换速率 /261
- 8.2 离子交换剂与离子交换树脂 /262
  - 8.2.1 离子交换剂 /262
  - 8.2.2 离子交换树脂 /263
  - 8.2.3 离子交换树脂的类型 /264
  - 8.2.4 离子交换树脂的物理性能 /266
  - 8.2.5 离子交换树脂的化学性质 /267
- 8.3 离子交换反应器的应用 /269
  - 8.3.1 离子交换反应的特性 /269
  - 8.3.2 离子交换软化除盐 /270
  - 8.3.3 软化与除碱 /272
  - 8.3.4 复床、混床除盐 /274
- 8.4 离子交换器的工作过程 /276
  - 8.4.1 固定床离子交换器间歇工作过程 /276
  - 8.4.2 一级复床的工作过程 /281
  - 8.4.3 连续式离子交换器工作过程 /282
- 8.5 离子交换器 /283
  - 8.5.1 固定床离子交换器 /283

- 8.5.2 移动床离子交换器 /287
- 8.5.3 连续床离子交换器 /287
- 8.5.4 混合床离子交换器 /288
- 8.5.5 浮动床离子交换器 /288
- 8.5.6 双室浮动床离子交换器 /290
- 8.5.7 回程式离子交换器 /291
- 8.5.8 离子交换柱 /293
- 8.6 离子交换装置的设计 /293
  - 8.6.1 设计依据 /293
  - 8.6.2 系统的参数计算 /294
- 参考文献 /295

## 第9章 电化学反应器

- 9.1 电化学反应器 /298
  - 9.1.1 电化学反应器的主要构件 /299
  - 9.1.2 二维反应器 /299
  - 9.1.3 三维反应器 /302
- 9.2 电解槽 /302
  - 9.2.1 电极反应 /303
  - 9.2.2 法拉第电解定律 /303
  - 9.2.3 分解电压与极化现象 /304
  - 9.2.4 电解槽的分类及构造 /305
  - 9.2.5 电解槽的工艺设计 /307
- 9.3 电化学反应器的工业应用 /309
  - 9.3.1 电解氧化法处理废水 /309
  - 9.3.2 电解还原法处理无机污染物 /310
  - 9.3.3 电解凝聚与电解气浮 /314
  - 9.3.4 电解消毒 /316
- 9.4 电化学技术的发展方向 /317
  - 9.4.1 阳极材料 /317
  - 9.4.2 电化学反应器 (electrochemical reactor) /318
  - 9.4.3 电化学组合工艺 /319
  - 9.4.4 生物膜电极法 /319
- 参考文献 /320

## 第10章 膜生物反应器

- 10.1 膜反应器 /321
  - 10.1.1 分离膜 /321
  - 10.1.2 膜反应器 /326
- 10.2 生物反应器 /330
  - 10.2.1 生物反应器的特点及分类 /331
  - 10.2.2 大型生物反应器设计与放大 /332
  - 10.2.3 微型生物反应器 /333
  - 10.2.4 动物细胞及组织工程反应器 /335
  - 10.2.5 酶反应器 /338
- 10.3 膜生物反应器 /339
  - 10.3.1 膜生物反应器的形式 /339
  - 10.3.2 膜生物反应器的类型 /340
  - 10.3.3 新型膜生物反应器 /343
  - 10.3.4 膜生物反应器的应用 /345
- 10.4 膜污染控制技术 /347
  - 10.4.1 膜污染控制措施 /348
  - 10.4.2 膜污染的清洗 /349
- 参考文献 /350

## 第11章 其他反应器

- 11.1 气液固三相反应器 /352
- 11.2 涓流床反应器 /354
  - 11.2.1 涓流床的流体力学 /355
  - 11.2.2 涓流床反应器中的传质 /356
  - 11.2.3 涓流床反应器中的传热 /357
  - 11.2.4 涓流床反应器的结构 /359
  - 11.2.5 涓流床反应器的设计与放大 /360
- 11.3 热管反应器 /361
  - 11.3.1 热管的工作原理 /361
  - 11.3.2 热管的结构 /362
  - 11.3.3 热管的主要特性 /363

11.3.4	热管反应器的应用	/363
11.4	径向反应器	/364
11.4.1	乙苯脱氢反应原理	/365
11.4.2	乙苯催化脱氢生产过程	/365
11.4.3	脱氢径向反应器	/367
11.4.4	轴径向反应器的开发	/369
11.5	微反应器	/369
11.5.1	微反应器的结构	/370
11.5.2	微反应器的主要特点	/370
11.5.3	聚合反应器的类型	/371
11.5.4	微反应器在聚合反应中的应用	/372
	参考文献	/379

# 第1章

## 绪论

### 1.1 过程工业与工业化学过程

#### 1.1.1 过程工业

在工业生产中，很多生产过程处理的物料为流程性物料，如气体、液体、粉体等。在从原材料到最后产品的生产过程中要进行一系列的化学过程，以改变物质的状态、结构、性质。过程工业是以流程性物料为主要处理对象，完成上述各种过程或其中某些过程的工业生产的总称。过程工业中进行的各种化学过程往往在密闭状态下连续进行，它遍及几乎所有现代工业生产领域。化学工业是最传统、最典型的过程工业，此外，化肥、石油化工、生物化工、制药、农药、染料、食品、炼油、轻工、热电、核工业、公用工程、湿法冶金、环境保护等生产过程大都处理流程性物料，处理过程中几乎都包含改变物质的状态、结构、性质的生产过程，这些工业都属于过程工业。在这些过程中都需要使用各种类型的反应设备以完成生产过程中的各种化学反应。

石油化工的年产 30 万吨乙烯工厂以流程性物料石油及其某些产品为原料，经过各种化学变化，生产出状态、结构、性质完全不同的聚乙烯、聚丙烯、乙二醇等产品，它是一种过程工业。随着工业的发展，工业生产产生的废气、废液、废渣越来越多，严重污染了人类的生存环境。“三废”的治理已越来越引起人们的广泛重视，其中很多治理过程处理的物料也往往是流程性的，也要进行化学过程，也要用到各种反应设备，经过处理，物质的状态、结构、性质发生了变化，所以它们也是一种过程工业。同样的道理，制药、农药、染料、食品、轻工、热电、核工业、公用工程、湿法冶金等许多工业领域中若干生产过程都可归入过程工业。

过程工业是我国国民经济的支柱产业，其生产涉及的化学反应多、工艺流程复杂，是高技术密集行业，与人民生活、工农业生产、文教卫生、国防事业等都有着密不可分的联系。其主要特点如下。

### (1) 多品种

### (2) 化学反应复杂

一个品种的生产往往要经过一连串的化学反应，有些反应本身常常是复杂反应，如平行反应、串联反应、可逆反应、链反应等。一个反应有时生成多种异构物，伴随生成主产物的同时还有副产物生成。

### (3) 反应物料相态多样化

在过程工业生产中，较少遇见均相物料体系，经常是非均相物料体系。

### (4) 反应介质腐蚀性强

在各种过程工业生产中，经常使用强腐蚀性介质，如硫酸、硝酸、盐酸、氯磺酸、有机酸和高温浓碱、湿氯化氢、二氧化硫、氯气等腐蚀性气体。

### (5) 高技术密集度

首先，在实际应用中，过程工业产品是以商品的综合功能出现的，这就需要在化学合成中筛选不同的化学结构，在剂型生产中充分发挥其自身功能及与其他配合物质的协同作用，完成从剂型到商品化的复配过程。其次，技术开发成功率低、时间长、费用高。其结果必然导致技术垄断性强，销售利润高。

特别是近年来过程工业发展迅猛，一方面，代表先进生产技术的大型企业不断发展；另一方面，中小生产规模的精细化工行业迅速出现，并且在过程工业内部的结构占比也在逐年上升。整个过程工业开始了由粗放型生产向集约型生产转变的新格局。低消耗，低污染，高产出，就是 21 世纪过程工业发展的潮流。在新企业、新产品不断涌现的同时，现有的过程工业企业正面临着前所未有的挑战与冲击。生产工艺、生产产品的更新换代，三废治理，自动控制技术的引进等已成为老企业迫在眉睫的任务。在一段时期内，过程工业行业对专业技术人员的需求将越来越大。

## 1.1.2 工业化学过程

工业化学过程的特点是以化学反应为中心，用化学方法和化学-物理方法对原料进行加工处理，通过物理变化和化学反应来制得化学产品、化工原料或其他化学加工产品。

所谓化学方法，就是根据化学反应原理，创造适当的条件，使原材料物质发生化学反应，改变其分子结构，以制得新物质的方法。应用化学方法可以使价廉易得的物质转变为具有一定特性、价值较高的物质，为人类创造更多的财富，这就是化学方法在许多场合往往优越于其他方法的一个重要标志。

过程工业生产过程纷繁复杂，不同的产品制造有着不同的工艺过程，从原料到产品需要进行一系列的处理过程，例如：乙炔法制取聚氯乙烯的生产，图 1-1 为乙炔法制取聚氯乙烯的示意图，原料乙炔、氯化氢经过净化提纯，然后在反应器中进行加成得到氯乙烯，然后进行进一步的精制，得到的单体在聚合反应器中聚合，得到的聚合物经过分离，脱水最后得到成品。在这个过程中有压缩、干燥等化工单元操作，也有加成、聚合反应这样的化学反应过程。再如硫酸的制造，原料硫黄经燃烧得到二氧化硫，再经过净化、转化成三氧化硫，最后用稀硫酸吸收得到浓硫酸，这个过程同样也包含物理过程和化学过程。





图 1-1 乙炔法制取聚氯乙烯示意图

工业化学过程涉及的化学反应种类多，而且附加价值高，技术密集度高，在国民经济和日常生活中发挥了重要的作用。其生产包括三个方面：a. 基本化工原料的生产；b. 化工中间体的生产；c. 化工终端产品的生产。其中基本化工原料是指从石油、煤、天然气或农副产品等天然资源经过一次或次数较多的化学加工而制得的化工产品。例如：乙烯、丙烯、乙炔、甲醇、乙醇和乙酸及苯、甲苯、二甲苯、萘和蒽等。化工中间体的生产是指将基本化工原料经过进一步的化学加工所制得的结构比较复杂，但还不具有特定用途的化工中间产物。例如：氯乙烷、氯乙酸、环氧乙烷、丙烯腈、硫酸二甲酯，以及异丙苯、苯酚、氯苯、硝基苯、苯胺、萘、蒽醌等。化工终端产品的生产是将化工中间体再经过化学加工而制得的具有特殊用途的产品。例如：染料、医药以及各种类型的塑料等。

化工中间体在现代过程工业生产中扮演了极其重要的角色。许多化工产品如合成染料、医药、农药和橡胶助剂等可以直接从化工中间体一步合成。这不仅增强了生产的灵活性，简化了复杂的生产工艺，而且产品利润很高，进一步刺激了过程工业的发展。

总之，化学工业生产过程从原料到产品都可以概括为下列三个组成部分。

### (1) 原料的预处理

按照化学反应的要求将原料进行处理，例如，提纯原料除去对反应有害的杂质；加热原料使其达到反应要求的温度；几种原料的配料混合以适应反应浓度要求等。这些预处理操作一般都属于物理过程。

### (2) 化学反应

化学反应是整个生产过程的核心和关键所在，主要功能是将一种或几种物质转化为所需的物质或从一组混合物中脱除某一组分，如汽车尾气中脱除烃和氮的氧化物，使气体净化达到排放标准等，这些属于化学过程。

### (3) 产物的分离

由于副反应的存在生成不希望生成的产物，又因反应不完全或某些反应物过量，致使反应产物需要进行分离获得符合规格的纯净产物。这一步主要也是物理过程，例如蒸馏、吸收、萃取、结晶、过滤等。

原料预处理和产物分离两步是化学反应的要求和结果。显然化学过程是化工生产过程的核心，物理过程的原理和设备是化工原理研究的内容。化学反应过程的原理和反应进行的场所——反应器，则是化学反应工程研究的内容。

但是，工业化学过程一般是比较复杂的，在工业上实现化学变化的条件往往又都是比较苛刻的，所以用化学方法组织工业生产，要求较高的技术和装备。为了对工业化学过程所涉及的化学反应有一个整体认识，有必要了解工业化学过程所涉及的一系列化学反应，对化工中间体以及怎样通过最初的原料资源来生产化工基本原料，从化工基本原料来生产化工中间体，最后生产出终端产品的原理及过程有一个充分而全面的认识。一般来说，化学反应过程

要求的原料比较纯净，有一定的配料比，要在适当的温度、压力和流动条件下进行。许多时候化学反应本身的反应速率很低，需用催化剂加速，并且反应往往不完全，产品需分离、提纯，未反应物需要回收利用。这样一来，整个化学反应过程必然牵连许多物理加工过程，整个工业化学过程变得十分复杂，实际上是采用一系列的化学、物理和化学-物理加工方法。这也是工业化学过程的一大特点。

在国民经济的各个部门中，工业化学过程得到了广泛应用，工业化学产品遍及工农业生产的各个部门和人民生活的各个领域。化学反应是工业化学过程的中心环节。为使反应进行得迅速、完全，需要维持一定的温度、压力和流量等操作条件，多数情况还要使用催化剂，因此，在化学反应过程中还要创造良好的传热、传质和流动条件，以保证化学反应的顺利进行。

## 1.2 化学反应过程的基本规律

化学反应过程往往是一项化工生产流程中重要的甚至是决定的因素，任何化学反应过程的进行和结果除了由该反应本身的特征及规律控制外，还会受到物料混合传质和传热等物理因素的影响。因此，一方面，要认识判断各种化学反应的化学热力学和动力学规律；另一方面，也要归纳各种物理传质因素的变化及其规律对化学反应过程的影响。这是化学反应工程的研究内容，具体来说就是研究不同生产规模下的化学反应过程和设备内的传递规律，它应用化学热力学和动力学知识，结合流体流动、传热、传质等传递现象，进行工业反应过程的分析、反应器的选择和设计及反应技术的开发，并研究最佳的反应操作条件，以实现反应过程的优化操作和控制。

工业反应器中进行的过程不仅发生化学反应过程，同时还伴有许多物理过程。这些物理过程与化学过程的相互影响、相互渗透，必然影响过程的特性和反应的结果，使工业反应过程复杂化。而化学变化是这个过程的本质，是由分子与分子之间的接触碰撞而发生的。因此，化学反应过程可以分为三类不同的情况加以考察。

### (1) 均相反应过程

反应过程在一定容积的气相或液相中进行的，均相反应过程就是两种典型的容积反应过程。对于某些非均相反应过程，尽管整个反应系统可能包括几个相态，但是只要实际化学反应仅在某一相内发生，则就化学反应过程而言，仍然是发生在反应相中的容积反应过程，此时，它的化学反应规律与均相容积反应过程并无二致，对于大多数气液非均相反应过程和部分液-液非均相反应过程都属于此例。

### (2) 表面反应过程

表面反应过程是在某一表面上发生的，在固体催化剂表面上进行的催化反应就是一例。

容积反应和表面反应这两类反应过程具有不同的特征，就单位时间内的反应转化量来说，前者正比于反应容积，后者则正比于反应表面积的大小。因而定义这两类反应过程时它们的反应速率定义也就有所不同，即应当分别以反应容积或反应表面积为基准。

化学反应速率随反应物料的浓度和反应温度而变化，是浓度和温度的函数。需要特别指出的是，这里所说的浓度和温度应当是指发生化学反应场所的浓度和温度，例如，