



普通高等教育“十三五”规划教材

# 化工原理

*Principle of Chemical Engineering*



王铭琦 王艳力◎主编

中国林业出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

# 化 工 原 理

王铭琦 王艳力 主 编



中国林业出版社

## 内容简介

化工原理是化工类及相近专业必修的一门专业基础课程,本课程的主要特点在于它的工程性。本书以培养学生树立工程意识,并学会用工程观点分析并解决实际问题为目标。

全书共包括流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、传热、吸收、蒸馏、萃取、膜分离、干燥等单元操作。

本书可作为高等院校化工相关专业(包括应用化学、食品工程、制药、材料、生物化工、环境工程、造纸等)的化工原理教材,也可作为从事上述专业的工程技术人员的学习参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 王铭琦, 王艳力主编. —北京: 中国林业出版社, 2017. 4

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-5038-8997-4

I. ①化… II. ①王… ②王… III. ①化工原理-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 080247 号

国家林业局生态文明教材及林业高校教材建设项目

**中国林业出版社·教育出版分社**

策划、责任编辑: 高红岩

电话: (010)83143554

传真: (010)83143516

---

出版发行 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

E-mail: jiaocai@public.163.com 电话: (010)83143500

http://lycb.forestry.gov.cn

经 销 新华书店

印 刷 北京市昌平百善印刷厂

版 次 2017年4月第1版

印 次 2017年4月第1次印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 26

字 数 655千字

定 价 58.00元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

**版权所有 侵权必究**

## 《化工原理》编写人员

主 编 王铭琦 王艳力

副主编 王艳红 曲 斌 武 光

编 者 (按姓氏笔画排序)

王艳红(黑龙江八一农垦大学)

王艳力(哈尔滨工程大学)

王铭琦(东北农业大学)

田亚新(黑龙江大学)

李冬梅(东北农业大学)

邢志勇(东北农业大学)

曲 斌(东北农业大学)

武 光(黑龙江大学)

徐国强(东北农业大学)

主 审 高爱丽(东北农业大学)

# 前 言

“化工原理”是化学工程与工艺及相近专业必修的一门专业基础课程，在培养从事化工科学研究和工程技术人才过程中发挥着重要的作用。本课程的主要特点在于它的工程性，对于从未走进过化工企业的青年学生，普遍感到该学科的理论知识抽象、计算公式多，不易理解，学习起来比较困难。编者在多年教学经验积累的基础上，根据本学科的特点和学生学习现状，在本书编写过程中，通过结合日常现象和对典型工程案例的剖析，努力培养学生的学科兴趣、工程意识以及经济分析观点。编者力求使教材基本概念准确，基本理论阐述清晰，注意汲取本学科发展的新成果和现代技术。编写格局由浅入深，易于学生的理解和自学。根据各单元操作的原理，每章都配有适当数量的例题和习题，以加深学生对基本原理的理解，同时有利于理论联系实际，提高分析和解决工程实际问题的能力。

本书为国家林业局普通高等教育“十三五”规划教材，重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备，全书共包括流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、传热、吸收、蒸馏、萃取、膜分离、干燥等单元操作。

本书主编王铭琦、王艳力，副主编王艳红、曲斌、武光。参加编写工作的有：王铭琦、曲斌(绪论、第1章)，王艳力(第5章)，王艳红(第7章、第8章)，武光(第3章、第9章)，李冬梅、徐国强(第4章)，王铭琦、邢志勇(第6章)，田亚新(第2章)。全书由东北农业大学高爱丽老师审阅，并提出了许多宝贵意见。本书在编写过程中得到了编者同事们热情帮助，在此向他们表示深切的谢意。

限于编者水平有限，书中难免有错误和不当之处，恳请读者批评指正。

编 者

2016年12月

# 目 录

## 前 言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 绪 论 .....                    | 1  |
| 0.1 化工生产过程与单元操作 .....        | 1  |
| 0.2 化工原理课程的性质与任务 .....       | 2  |
| 0.3 物理量的单位与量纲 .....          | 3  |
| 0.3.1 国际单位制与法定计量单位 .....     | 3  |
| 0.3.2 量纲 .....               | 3  |
| 0.3.3 量纲一致性方程 .....          | 4  |
| 0.4 单元操作中常用的基本概念和观点 .....    | 4  |
| 第 1 章 流体流动 .....             | 6  |
| 1.1 流体静力学 .....              | 6  |
| 1.1.1 流体的主要物理性质 .....        | 7  |
| 1.1.2 流体静力学基本方程式 .....       | 9  |
| 1.1.3 静力学基本方程的应用 .....       | 10 |
| 1.2 管内流体流动的基本方程 .....        | 13 |
| 1.2.1 基本概念 .....             | 13 |
| 1.2.2 连续性方程式 .....           | 14 |
| 1.2.3 伯努利方程式 .....           | 16 |
| 1.3 管内流体流动现象 .....           | 21 |
| 1.3.1 流体的黏性 .....            | 21 |
| 1.3.2 流体的流动类型与雷诺数 .....      | 23 |
| 1.3.3 流体在圆管内的速度分布 .....      | 25 |
| 1.3.4 流体流动边界层 .....          | 28 |
| 1.4 流体在管内的流动阻力 .....         | 30 |
| 1.4.1 直管中流体摩擦阻力损失测定 .....    | 30 |
| 1.4.2 层流的摩擦阻力损失计算 .....      | 30 |
| 1.4.3 湍流的摩擦阻力损失 .....        | 31 |
| 1.4.4 非圆形管道的当量直径 .....       | 36 |
| 1.4.5 局部摩擦阻力损失 .....         | 37 |
| 1.4.6 管内流体流动的总摩擦阻力损失计算 ..... | 39 |
| 1.5 管路计算 .....               | 41 |
| 1.5.1 简单管路 .....             | 41 |

|            |                      |           |
|------------|----------------------|-----------|
| 1.5.2      | 复杂管路 .....           | 44        |
| 1.6        | 流速与流量的测量 .....       | 45        |
| 1.6.1      | 变压头的流量计 .....        | 46        |
| 1.6.2      | 变截面的流量计 .....        | 50        |
|            | 思考题 .....            | 52        |
|            | 习题 .....             | 53        |
| <b>第2章</b> | <b>流体输送机械</b> .....  | <b>61</b> |
| 2.1        | 离心泵 .....            | 61        |
| 2.1.1      | 离心泵的主要部件与工作原理 .....  | 61        |
| 2.1.2      | 离心泵的性能参数与特性曲线 .....  | 64        |
| 2.1.3      | 离心泵的工作点和流量调节 .....   | 68        |
| 2.2        | 其他类型化工用泵 .....       | 78        |
| 2.2.1      | 往复泵 .....            | 78        |
| 2.2.2      | 计量泵 .....            | 81        |
| 2.2.3      | 隔膜泵 .....            | 81        |
| 2.2.4      | 齿轮泵 .....            | 82        |
| 2.2.5      | 旋涡泵 .....            | 83        |
| 2.3        | 气体输送机械 .....         | 83        |
| 2.3.1      | 离心式通风机 .....         | 84        |
| 2.3.2      | 鼓风机 .....            | 86        |
| 2.3.3      | 压缩机 .....            | 87        |
| 2.3.4      | 真空泵 .....            | 90        |
|            | 思考题 .....            | 91        |
|            | 习题 .....             | 92        |
| <b>第3章</b> | <b>沉降与过滤</b> .....   | <b>95</b> |
| 3.1        | 颗粒及颗粒床层的特性 .....     | 95        |
| 3.1.1      | 单颗粒的特性参数 .....       | 95        |
| 3.1.2      | 混合颗粒的特性参数 .....      | 96        |
| 3.1.3      | 颗粒与流体相对运动时所受阻力 ..... | 97        |
| 3.2        | 重力沉降 .....           | 98        |
| 3.2.1      | 沉降速度 .....           | 98        |
| 3.2.2      | 重力沉降分离设备 .....       | 102       |
| 3.3        | 离心沉降 .....           | 106       |
| 3.3.1      | 离心沉降速度 .....         | 106       |
| 3.3.2      | 离心沉降设备 .....         | 107       |
| 3.4        | 过滤 .....             | 111       |
| 3.4.1      | 过滤基本原理 .....         | 111       |
| 3.4.2      | 过滤速率基本方程式 .....      | 113       |



|            |                          |            |
|------------|--------------------------|------------|
| 3.4.3      | 恒压过滤 .....               | 115        |
| 3.4.4      | 过滤设备 .....               | 117        |
|            | 思考题 .....                | 119        |
|            | 习题 .....                 | 120        |
| <b>第4章</b> | <b>传热 .....</b>          | <b>122</b> |
| 4.1        | 概述 .....                 | 122        |
| 4.1.1      | 传热在化工生产中的应用 .....        | 122        |
| 4.1.2      | 传热的三种基本方式 .....          | 123        |
| 4.1.3      | 热载体及其选择 .....            | 124        |
| 4.1.4      | 间壁式换热器的传热过程 .....        | 124        |
| 4.2        | 热传导 .....                | 126        |
| 4.2.1      | 有关热传导的基本概念 .....         | 126        |
| 4.2.2      | 傅立叶定律 .....              | 127        |
| 4.2.3      | 导热系数 .....               | 127        |
| 4.2.4      | 通过平壁的稳定热传导 .....         | 129        |
| 4.2.5      | 通过圆筒壁的稳定热传导 .....        | 132        |
| 4.3        | 对流传热 .....               | 135        |
| 4.3.1      | 对流传热过程分析 .....           | 135        |
| 4.3.2      | 对流传热速率方程 .....           | 135        |
| 4.3.3      | 影响对流传热系数的因素 .....        | 136        |
| 4.3.4      | 对流传热系数经验关联式的建立 .....     | 138        |
| 4.3.5      | 流体无相变时对流传热系数的经验关联式 ..... | 139        |
| 4.3.6      | 流体有相变时的对流传热 .....        | 146        |
| 4.4        | 传热过程的计算 .....            | 152        |
| 4.4.1      | 热量衡算 .....               | 152        |
| 4.4.2      | 总传热系数和总传热速率方程 .....      | 153        |
| 4.4.3      | 平均温差计算 .....             | 158        |
| 4.4.4      | 壁温的计算 .....              | 164        |
| 4.5        | 热辐射 .....                | 170        |
| 4.5.1      | 基本概念 .....               | 170        |
| 4.5.2      | 辐射能力和辐射基本定律 .....        | 171        |
| 4.5.3      | 两固体间的相互辐射 .....          | 174        |
| 4.5.4      | 辐射和对流的联合传热 .....         | 178        |
| 4.6        | 换热器 .....                | 179        |
| 4.6.1      | 换热器的分类 .....             | 180        |
| 4.6.2      | 间壁式换热器的类型 .....          | 180        |
| 4.6.3      | 列管式换热器的设计和选用 .....       | 188        |
| 4.6.4      | 传热过程的强化措施 .....          | 193        |



## 4 目 录

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 思考题 .....                  | 194        |
| 习题 .....                   | 195        |
| <b>第 5 章 吸收 .....</b>      | <b>200</b> |
| 5.1 概述 .....               | 200        |
| 5.1.1 吸收设备及工业吸收过程 .....    | 200        |
| 5.1.2 吸收操作的应用 .....        | 201        |
| 5.1.3 吸收过程的分类 .....        | 201        |
| 5.1.4 吸收剂的选择 .....         | 201        |
| 5.2 气液相平衡 .....            | 202        |
| 5.2.1 气体在液体中的溶解度 .....     | 202        |
| 5.2.2 亨利定律 .....           | 203        |
| 5.2.3 相平衡关系在吸收过程中的作用 ..... | 206        |
| 5.3 吸收过程的速率 .....          | 207        |
| 5.3.1 分子扩散与费克定律 .....      | 207        |
| 5.3.2 等分子反向扩散及速率方程 .....   | 208        |
| 5.3.3 单向扩散及速率方程 .....      | 209        |
| 5.3.4 对流传质 .....           | 211        |
| 5.4 吸收传质速率 .....           | 213        |
| 5.4.1 相际间对流传质模型 .....      | 213        |
| 5.4.2 吸收过程的总传质速率方程 .....   | 213        |
| 5.4.3 传质阻力分析 .....         | 216        |
| 5.5 低浓度气体吸收操作过程的计算 .....   | 217        |
| 5.5.1 吸收过程的数学描述 .....      | 217        |
| 5.5.2 传质单元数的计算 .....       | 219        |
| 5.5.3 吸收塔的设计型计算 .....      | 222        |
| 5.5.4 吸收塔的操作型计算 .....      | 226        |
| 5.5.5 解吸塔的计算 .....         | 228        |
| 5.6 高浓度气体吸收 .....          | 230        |
| 5.6.1 高浓度气体吸收的特点 .....     | 230        |
| 5.6.2 高浓度气体吸收过程的计算 .....   | 230        |
| 5.7 填料塔 .....              | 231        |
| 5.7.1 填料塔及填料 .....         | 231        |
| 5.7.2 填料塔的内部构件 .....       | 235        |
| 5.7.3 填料塔的流体力学性能 .....     | 237        |
| 思考题 .....                  | 240        |
| 习题 .....                   | 240        |
| <b>第 6 章 蒸馏 .....</b>      | <b>243</b> |
| 6.1 概述 .....               | 243        |

|            |                         |            |
|------------|-------------------------|------------|
| 6.2        | 双组分溶液的气液相平衡 .....       | 244        |
| 6.2.1      | 理想体系的气液相平衡 .....        | 244        |
| 6.2.2      | 非理想体系的气液相平衡 .....       | 248        |
| 6.3        | 简单蒸馏和平衡蒸馏 .....         | 250        |
| 6.3.1      | 简单蒸馏 .....              | 250        |
| 6.3.2      | 平衡蒸馏 .....              | 250        |
| 6.3.3      | 精馏原理 .....              | 251        |
| 6.4        | 双组分连续精馏的计算 .....        | 252        |
| 6.4.1      | 理论板假定和恒摩尔流假定 .....      | 253        |
| 6.4.2      | 物料衡算和操作线方程 .....        | 254        |
| 6.4.3      | 进料热状况的影响和 $q$ 线方程 ..... | 257        |
| 6.4.4      | 理论板数计算 .....            | 260        |
| 6.4.5      | 回流比的影响及选择 .....         | 263        |
| 6.4.6      | 理论板数的简捷计算法 .....        | 266        |
| 6.4.7      | 精馏装置的热量衡算 .....         | 267        |
| 6.4.8      | 精馏过程的操作型计算 .....        | 270        |
| 6.4.9      | 双组分精馏过程的其他类型 .....      | 271        |
| 6.5        | 间歇精馏 .....              | 273        |
| 6.5.1      | 回流比恒定的操作 .....          | 274        |
| 6.5.2      | 馏出液组成恒定的操作 .....        | 274        |
| 6.6        | 恒沸精馏和萃取精馏 .....         | 275        |
| 6.6.1      | 恒沸精馏 .....              | 275        |
| 6.6.2      | 萃取精馏 .....              | 276        |
| 6.7        | 板式塔 .....               | 277        |
| 6.7.1      | 塔板的结构及其作用 .....         | 278        |
| 6.7.2      | 塔板上气液流动和接触状态 .....      | 278        |
| 6.7.3      | 塔板效率 .....              | 283        |
| 6.7.4      | 板式塔的设计 .....            | 285        |
| 6.7.5      | 板式塔的类型 .....            | 290        |
|            | 思考题 .....               | 292        |
|            | 习题 .....                | 293        |
| <b>第7章</b> | <b>萃取 .....</b>         | <b>297</b> |
| 7.1        | 基本概念 .....              | 297        |
| 7.2        | 液-液相平衡与萃取操作原理 .....     | 299        |
| 7.2.1      | 三角形相图 .....             | 299        |
| 7.2.2      | 溶解度曲线和平衡联结线 .....       | 300        |
| 7.2.3      | 辅助曲线和临界混溶点 .....        | 301        |
| 7.2.4      | 物料衡算和杠杆定律 .....         | 301        |

|              |                              |            |
|--------------|------------------------------|------------|
| 7.2.5        | 相平衡关系的数学描述 .....             | 302        |
| 7.2.6        | 萃取剂的选择 .....                 | 304        |
| 7.3          | 萃取过程计算 .....                 | 308        |
| 7.3.1        | 单级萃取过程的计算 .....              | 308        |
| 7.3.2        | 多级错流萃取过程的计算 .....            | 311        |
| 7.3.3        | 多级逆流萃取过程的计算 .....            | 313        |
| 7.3.4        | 梯级法确定理论级数 .....              | 315        |
| 7.3.5        | 适宜溶剂比 S/F 的确定和萃取剂的最少用量 ..... | 316        |
| 7.4          | 萃取设备 .....                   | 316        |
| 7.4.1        | 萃取设备 .....                   | 317        |
| 7.4.2        | 萃取设备的选择 .....                | 321        |
|              | 思考题 .....                    | 321        |
|              | 习题 .....                     | 322        |
| <b>第 8 章</b> | <b>膜分离 .....</b>             | <b>324</b> |
| 8.1          | 基本概述 .....                   | 324        |
| 8.1.1        | 膜的分类 .....                   | 324        |
| 8.1.2        | 膜技术的应用领域 .....               | 325        |
| 8.1.3        | 膜分离过程的特点及优势 .....            | 325        |
| 8.2          | 各种膜分离过程简介 .....              | 327        |
| 8.2.1        | 膜分离性能 .....                  | 327        |
| 8.2.2        | 膜分离的主要过程 .....               | 328        |
| 8.3          | 膜组件 .....                    | 336        |
| 8.3.1        | 管式膜组件 .....                  | 336        |
| 8.3.2        | 平板式膜组件 .....                 | 337        |
| 8.3.3        | 螺旋卷式膜组件 .....                | 337        |
| 8.3.4        | 中空纤维式膜组件 .....               | 338        |
|              | 思考题 .....                    | 339        |
|              | 习题 .....                     | 339        |
| <b>第 9 章</b> | <b>干燥 .....</b>              | <b>340</b> |
| 9.1          | 概述 .....                     | 340        |
| 9.1.1        | 干燥方法的分类 .....                | 340        |
| 9.1.2        | 对流干燥的特点 .....                | 341        |
| 9.2          | 湿空气的性质与湿度图 .....             | 341        |
| 9.2.1        | 湿空气的性质 .....                 | 341        |
| 9.2.2        | 湿空气的湿度图及其应用 .....            | 347        |
| 9.3          | 干燥过程的物料衡算与热量衡算 .....         | 350        |
| 9.3.1        | 湿物料中的含水量 .....               | 350        |
| 9.3.2        | 干燥过程的物料衡算 .....              | 350        |

|             |                          |            |
|-------------|--------------------------|------------|
| 9.3.3       | 干燥过程热量衡算 .....           | 352        |
| 9.3.4       | 干燥器的热效率 .....            | 353        |
| 9.4         | 干燥速率与干燥时间 .....          | 354        |
| 9.4.1       | 物料中所含水分的性质 .....         | 354        |
| 9.4.2       | 恒定干燥条件下的干燥速率 .....       | 355        |
| 9.4.3       | 恒定干燥条件下干燥时间的计算 .....     | 359        |
| 9.5         | 干燥器 .....                | 360        |
| 9.5.1       | 厢式干燥器 .....              | 361        |
| 9.5.2       | 转筒干燥器 .....              | 361        |
| 9.5.3       | 气流干燥器 .....              | 363        |
| 9.5.4       | 流化床干燥器 .....             | 364        |
| 9.5.5       | 喷雾干燥器 .....              | 366        |
|             | 思考题 .....                | 367        |
|             | 习题 .....                 | 368        |
| <b>附录</b>   | <b>.....</b>             | <b>370</b> |
| 附录一         | 水及蒸汽的物理性质 .....          | 370        |
| 附录二         | 黏度 .....                 | 374        |
| 附录三         | 比热容 .....                | 377        |
| 附录四         | 热导率 .....                | 381        |
| 附录五         | 液体相变焓共线图 .....           | 385        |
| 附录六         | 某些液体的重要物理性质 .....        | 387        |
| 附录七         | 某些气体的重要物理性质 .....        | 388        |
| 附录八         | 干空气的物理性质(101.3kPa) ..... | 389        |
| 附录九         | 管子规格 .....               | 391        |
| 附录十         | 离心泵规格(摘录) .....          | 391        |
| <b>习题答案</b> | <b>.....</b>             | <b>394</b> |
| <b>参考文献</b> | <b>.....</b>             | <b>399</b> |

# 绪 论

## 0.1 化工生产过程与单元操作

化学工程以化学工业的生产过程为研究对象。在化学工业中，对原料进行大规模的加工处理，使其不仅在状态与物理性质上发生变化，而且在化学性质上也发生变化，成为合乎要求的产品的过程称为**化工过程**。化工过程包括许多步骤，原料在各步骤中依次通过若干个或若干组设备，经历各种方式的处理之后才成为产品。化工过程的特点之一是步骤多，而且因为不同的化学工业所用的原料与所得的产品不同，所以各种化工过程的差别很大。

一个化工过程中所包括的步骤可以分成两类。一类以进行化学反应为主，通常是在反应器中进行。用于不同化学工业中的反应器在构造与操作原理上有很大差别，主要是因为所进行的化学反应不同，反应的机理相差很大。例如，石油裂解用的裂解炉、氨合成用的合成塔、高分子合成用的反应釜，在各方面都很不相同。化工过程中还有另一类很重要的并不进行化学反应的步骤。例如，乙醇生产与石油加工中都要进行蒸馏操作；尿素、聚氯乙烯及染料等的生产中都有干燥操作；而合成氨、硝酸和硫酸的生产过程中都需要通过吸收操作分离气体混合物，这些基本操作过程称为**单元操作**。单元操作有下列特点：①它们都是物理性操作，这些操作只改变物料的状态或其物理性质，并不改变其化学性质。②它们都是化工生产过程中共有的操作。化工过程虽然差别很大，但它们都是由若干个单元操作适当地串联而组成的。③某单元操作用于不同的化工过程，其基本原理并无不同，进行该操作的设备往往也是通用的。当然，具体运用时也要结合各化工过程的特点来考虑，如原料与产品的物理、化学性质，生产规模大小等。

图 0-1 所示为柠檬酸的生产工艺流程，它利用糖质原料，在多种霉菌及黑曲菌的作用下，控制较低的温度和 pH 值，用发酵法制得。在反应前，将白薯干粉碎，补充水分，送入发酵室，在黑曲霉菌等作用下进行发酵反应。反应后产物经过滤除去菌体和残

渣后，加入碳酸钙和石灰乳中和，柠檬酸与碳酸钙形成难溶性的柠檬酸钙，从发酵液中分离沉淀出来，达到与其他可溶性杂质(废糖液)分离的目的。将柠檬酸钙用水稀释成糊状，慢慢加入硫酸，酸解达到终点后，放入过滤槽过滤。在所得清液中，加入活性炭净化脱色，过滤后，将所得清液用减压法浓缩，柠檬酸结晶后，用离心机将母液脱净，然后用冷水洗涤晶体，最后用干燥箱除去晶体表面的水，获得精制的柠檬酸。

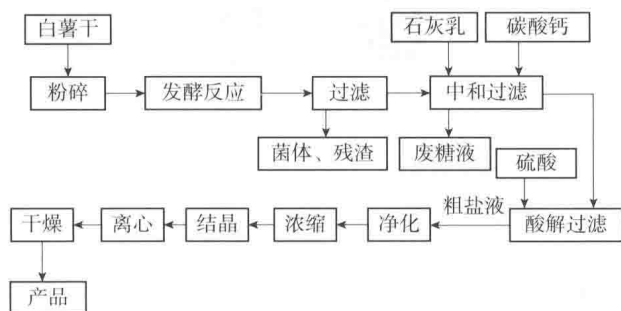


图 0-1 柠檬酸的生产工艺流程

上述生产过程除发酵属化学反应过程外，其余的步骤都是在对原料、反应物进行预处理和对产物进行提纯、精制分离，均为物理加工过程，流程中包括流体输送、沉降、过滤、干燥等单元操作。据资料报道，化学与石油化学、制药等工业中，物理加工过程的设备投资约为全厂设备投资的 90%，可见它们在化工生产中的重要地位。

本书的内容就是讨论比较重要且较常用的一些单元操作。单元操作按其所根据的内在理论基础，又可以进一步归并成为 3 类：

①流体流动过程 包括流体的输送、悬浮物的沉降和过滤、颗粒状物料的流态化等。

②热量传递过程 包括加热、冷却、蒸气的冷凝、溶液的蒸发等。

③质量传递过程 包括液体混合物的蒸馏、气体混合物的吸收、固体物料的干燥等。

流体流动时，流体内部由于流体质点(或分子)的速度不同，它们的动量也就不同，在流体质点随机运动和相互碰撞过程中，动量从速度大处向速度小处传递，称为动量传递。所以，流体流动过程也称为动量传递过程。

动量传递与热量传递和质量传递类似，热量传递是流体内部因温度不同，热量从高温处向低温处传递；质量传递是因物质在流体内存在浓度差，物质将从浓度高处向浓度低处传递。在流体中的这 3 种传递现象，都是由于流体质点(或分子)的随机运动所产生的。

## 0.2 化工原理课程的性质与任务

“化工原理”是化工及其相关专业学生必修的一门基础技术课程，它是利用数学手段，研究化学领域中的物理现象，涉及数、理、化三大学科，主要研究物理定律，属于物理类课程，是自然科学领域的基础课向工程科学的专业课过渡的入门课程。其

主要任务是介绍流体流动、传热和传质的基本原理及主要单元操作的典型设备构造、操作原理、过程计算、设备选型及实验研究方法等。这些都密切联系生产实际，以培养学生运用基础理论分析和解决化工生产中有关实际问题的能力，特别是要培养学生的工程观点、定量计算、设计开发能力和创新理念。具体要求有以下几点：

①选型 根据生产工艺要求，物料特性和技术、经济特点，进行“过程和设备”的选择，经济而有效地满足工艺要求。

②设计计算 根据选定的单元操作进行过程的计算和设备的设计。在缺乏数据的情况下，通过实验以取得必要的设计数据。

③操作 熟悉操作原理和操作方法，以适应生产的不同要求。在操作发生故障时，寻找故障的缘由，具备分析和解决问题的能力。

## 0.3 物理量的单位与量纲

### 0.3.1 国际单位制与法定计量单位

长期以来，工程计算中存在多种单位制度并用的局面，而同一物理量在不同单位制度中又具有不同的单位与数值，致使计算与交流极不方便，而且易引起错误。鉴于此，1960年国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制，其国际代号为SI。国际单位制的单位由7个基本单位：[长度，米(m)；质量，千克(kg)；时间，秒(s)；温度，开尔文(K)；物质的量，摩尔(mol)；电流，安培(A)；发光强度，坎德拉(cd)]、2个辅助单位[平面角—弧度(rad)；立体角—球面度(sr)]和一些重要的导出单位构成。1984年我国发布命令，确定我国统一实行以国际单位为基础，包括由我国指定的若干非国际单位在内的法定单位制。本书采用法定单位制，但在一些化学基础数据及化工参考书中可能会遇到非法定计量单位，需要进行换算。

### 0.3.2 量纲

量纲是将一个物理导出量用若干个基本量的幂的乘积表示出来的表达式。在SI制中，7个基本物理量——长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量、发光强度的量纲符号分别为L、M、T、I、 $\Theta$ 、N、J。

导出量Q的量纲的一般表达式为

$$\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\delta \Theta^\epsilon N^\zeta J^\eta$$

式中， $\dim$ 为量纲符号，指数 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 称为量纲指数。

例如，速度、加速度、力、压强、功和功率的量纲分别为：

$$\begin{aligned} \dim u &= LT^{-1} & \dim a &= LT^{-2} \\ \dim F &= MLT^{-2} & \dim p &= MT^{-2}L^{-1} \\ \dim W &= ML^2T^{-2} & \dim P &= ML^2T^{-3} \end{aligned}$$



若  $\alpha=\beta=\gamma=\delta=\zeta=\xi=\eta=0$ ,  $\dim Q=L^0M^0T^0\cdots=1$

$Q$  为量纲为 1 的量, 或称为无量纲的量。需要注意的是无量纲的量不一定是无单位的量。

### 0.3.3 量纲一致性方程

在化工研究中, 如果涉及的过程较复杂, 仅知道影响这一过程的物理量, 而不能列出该过程的微分方程时, 我们可以利用量纲分析法, 建立一个变量较少的关联式, 再通过实验的方法, 求出式中的系数、指数等常数, 就可得到一个经验公式。利用此方法, 可以有效地减少实验工作量, 尽快地得到一个经验关联式。

量纲分析法的基础之一是量纲一致性原则, 即每一个物理方程式的两边不仅数值相等, 而且量纲也必须相等。

例如, 理想气体状态方程式为:

$$pV=nRT$$

其中, 压强、体积、物质的量、温度的量纲分别为:

$$\dim p = \text{ML}^2\text{T}^{-3} \quad \dim V = \text{L}^3 \quad \dim n = \text{N} \quad \dim T = \Theta$$

根据量纲一致性原则, 摩尔气体常数  $R$  的量纲应为  $\dim R = \text{ML}^2\text{T}^{-2}\text{N}^{-1}\Theta^{-1}$ 。

## 0.4 单元操作中常用的基本概念和观点

在对化工单元操作进行分析和计算时, 不同的单元操作采用的处理方法各有特点, 但是不管何种方法都是以质量守恒、能量守恒、平衡关系、速率关系和经济核算观点为基础的, 它们贯穿于整个课程的始终, 在这里仅作简要说明。

### (1) 物料衡算

物料衡算的理论基础是质量守恒定律。即进入任何过程的物料质量, 必须等于从该过程离开的物料质量与积存于该过程中的物料质量之和:

$$\text{输入} = \text{输出} + \text{积存}$$

对于连续操作的过程, 任一点物理量(如温度、压力、流量)都不随时间变化, 此种过程属于稳定过程, 过程中物料的积存量为零, 则物料衡算关系可简化为:

$$\text{输入} = \text{输出}$$

利用物料衡算式可由过程的已知量求出未知量。物料衡算的基本步骤如下:

①选定适当的衡算系统 上述关系可在微元体上使用, 也可在整个过程的范围内使用, 或在一个或几个设备的范围内使用。计算时应画出流程图, 将所有原始数据标在图的相应位置, 并标出未知量。

②选定计算基准 一般选不再变化的量作为衡算的标准。例如, 用物料的总质量或物料中某一组分的质量作为标准, 对于间歇操作, 常取一批原料为基准, 对于连续操作, 通常取单位时间内处理的物料量为基准。

③列出物料衡算式, 用数学方法求解未知量。

## (2) 能量衡算

在许多单元操作(如传热、蒸发、吸收、蒸馏、干燥等)过程中,涉及物料的温度或聚集状态的变化以及能量的传递,其间的关系可通过能量衡算确定。能量衡算的理论基础是能量守恒定律。对于稳定过程,有“输入=输出”。

## (3) 物系的平衡关系

平衡状态是指物系的传热或传质过程进行的方向和所能达到的极限。例如,当两物体间有温度差存在,即温度不平衡时,热量就会从高温物体传向低温物体,直至温度相等为止,此时传热过程达到平衡,两物体间不再有热量的净传递。

在传质过程中,如用碱性吸收剂(如石灰浆液)吸收工业尾气中的  $\text{SO}_2$ ,当  $\text{SO}_2$  在两相间的分布不平衡时,尾气中的  $\text{SO}_2$  将进入碱液中,直至其含量增至饱和浓度时,  $\text{SO}_2$  在气液两相间平衡,即不再有质量的净传递。

## (4) 传递过程速率

任何一个物系,如果不是处于平衡状态,必然存在一个趋向平衡的过程。所谓的过程速率是指过程进行的快慢。过程速率的大小直接影响到设备的大小、工厂占地及经济效益等。过程速率与过程推动力成正比,与过程阻力成反比,即

$$\text{传递速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

过程的推动力是该过程距离平衡的差额,它可以是压力差、温度差或浓度差等。如流体流动时加大压差,热交换时提高温差,传质、反应时提高浓度差均可增大过程推动力,从而提高过程速率。提高过程速率也可通过减少过程阻力来实现。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,反应时用催化剂降低反应的活化能等。

## (5) 经济核算

在设计具有一定生产能力的设备时,根据设备的型式和材料的不同,可以有若干设计方案。对于同一设备,所选用的操作参数不同,会影响到设备费和操作费,因此,不仅要考虑技术先进,而且要通过经济核算来确定最经济的设计方案,此外,还要同时兼顾节能、环保及资源回收等因素。通过本课程的学习,使学生逐步树立工程观念,学会运用综合基础知识,有目的地解决工程实际问题。