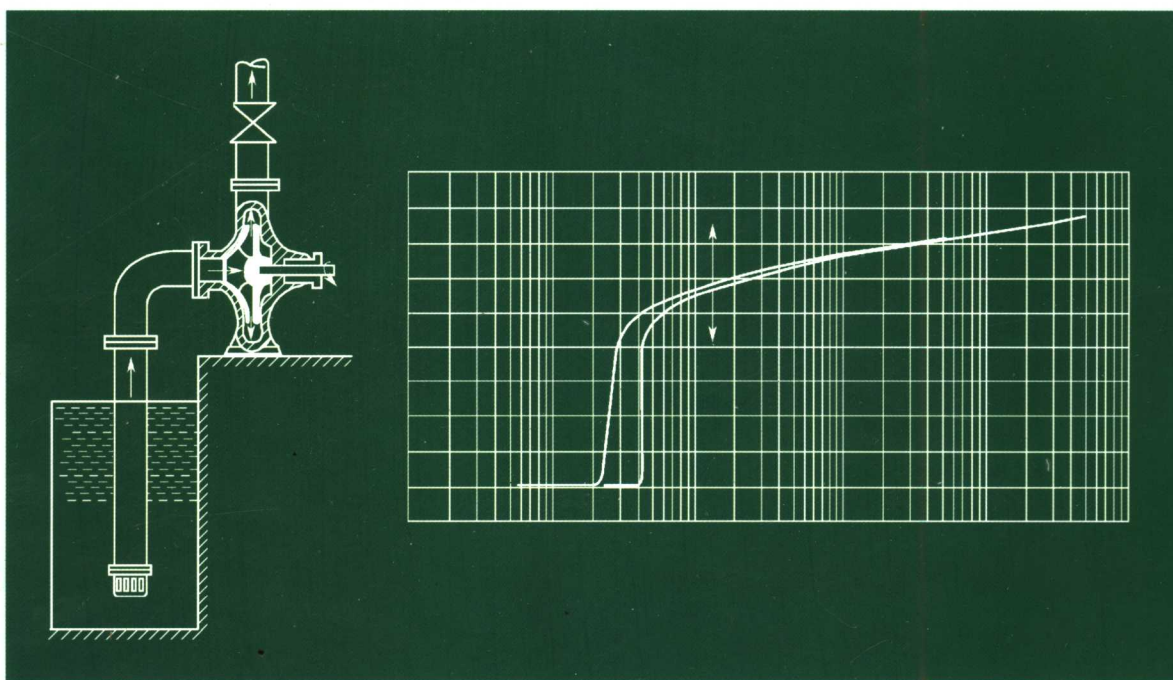


高等学校教材

# 制药化工原理

王志祥 主编



化学工业出版社  
教材出版中心

高等学校教材

# 制药化工原理

王志祥 主编



化学工业出版社  
教材出版中心

· 北京 ·

(京) 新登字 039 号

**图书在版编目 (CIP) 数据**

制药化工原理/王志祥主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 5

高等学校教材

ISBN 7-5025-7131-0

I. 制… II. 王… III. 药物-制造-化工过程-高等学校-教材  
IV. TQ460. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 051539 号

---

高等学校教材  
**制药化工原理**

王志祥 主编

责任编辑: 杨燕玲

文字编辑: 陈 雨

责任校对: 李 林

封面设计: 潘 峰

\*

化学工业出版社 出版发行  
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

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

\*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河市东柳装订厂装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 26 $\frac{3}{4}$  字数 662 千字

2005 年 8 月第 1 版 2005 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7131-0

定 价: 49.00 元

---

**版权所有 违者必究**

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

## 内 容 提 要

本书根据制药工业的特点和制药化工原理课程的教学要求，精选若干个典型单元操作进行介绍，包括绪论、流体流动、流体输送设备、液体搅拌、沉降与过滤、传热、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、干燥、冷冻、吸附与离子交换、膜分离技术。本书力求能全面系统地阐明制药化工过程的基本原理和工程方法，注重理论知识在工程实际中的应用，书中列举了大量示例。

本书既可作为高等院校制药工程专业、药物制剂专业以及相关专业的教材，也可供化工与制药行业从事研究、设计和生产的工程技术人员参考。

# 《制药化工原理》

## 编写人员

主 编 王志祥

副主编 史益强 黄德春

编写人员 (以姓氏笔画为序)

于 颖 王志祥 史益强 杨 照  
黄德春 崔志芹 戴 琳

# 前 言

---

1998 年根据国家教育部制定的“面向 21 世纪教学内容和课程体系改革”的要求，中国高等药学教育的专业设置发生了巨大变革。改革前，高等药学教育共有 15 个专业，改革后仅保留了药学、药物制剂和中药学 3 个专业，但在化工与制药类专业中却新增加了制药工程专业。在大幅度削减专业的情况下，国家却增设制药工程这一新的专业学科，反映了制药工业对制药工程型人才的需求。正因为如此，国内的许多高校相继设立了制药工程专业。由于是新建专业，因而普遍缺乏适用的制药工程类教材。

2004 年 8 月全国高等学校制药工程专业发展战略与规范研讨会在长春召开，会上制定了制药工程专业规范，并将制药化工原理定为制药工程专业课程体系的主要核心课程之一。虽然国内已有多种版本的化工原理教材，但仍缺乏反映制药工程专业特点的化工原理教材。本书正是根据长春会议的精神以及制药化工原理课程的教学要求而编写的，目的是为制药化工原理课程的教学提供较为适宜的教材。

制药化工单元操作的种类很多，每种单元操作均有十分丰富的内容。根据制药工业的特点和制药化工原理课程的教学要求，本书精选了若干个典型单元操作进行介绍，力求全面系统地阐明制药化工过程的基本原理和工程方法。全书共分 14 章，包括流体流动、流体输送设备、液体搅拌、沉降与过滤、传热、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、干燥、冷冻、吸附与离子交换、膜分离技术。

本书由中国药科大学王志祥教授主编。参加编写工作的人员有王志祥（绪论、流体流动、流体输送设备、液体搅拌、沉降与过滤、传热、蒸馏、萃取、干燥）、史益强（沉降与过滤、吸收、萃取）、黄德春（蒸发、结晶、吸收）、杨照（流体流动、传热）、崔志芹（吸附与离子交换、膜分离技术）、于颖（冷冻）、戴琳（流体输送设备、附录）。全书由王志祥教授统稿。

本书是王志祥教授编著的《制药工程学》（化学工业出版社出版）的姊妹篇，可作为高等院校制药工程专业、药物制剂专业及相关专业的教材，也可供化工与制药行业从事研究、设计和生产的工程技术人员参考。

四川大学肖泽仪教授、华东理工大学曾作祥教授对书稿进行了审阅，中国药科大学姚文兵教授、南京大学张志炳教授给作者提供了许多支持和帮助，在此谨向他们以及所有为本书出版提供过帮助的同志表示诚挚的谢意。

虽然作者在编写和修改过程中已作了很大努力，但由于水平所限，错误和不当之处在所难免，恳请广大读者批评指正，以利于该书的进一步修改和完善。

王志祥

2005 年 3 月于中国药科大学

# 目 录

---

绪论 .....	1
一、制药过程与单元操作 .....	1
二、制药化工原理的性质和任务 .....	2
三、单位换算 .....	2
第一章 流体流动 .....	4
第一节 流体静力学 .....	4
一、流体的密度 .....	4
二、流体的压强 .....	6
三、流体静力学基本方程式 .....	7
四、流体静力学基本方程式的应用 .....	9
第二节 流体在管内的流动 .....	14
一、流量与流速 .....	14
二、稳态流动与非稳态流动 .....	15
三、连续性方程式 .....	16
四、伯努利方程式 .....	17
第三节 流体在管内的流动现象 .....	23
一、牛顿粘性定律与流体的粘度 .....	23
二、流动类型与雷诺准数 .....	25
三、流体在圆管内的速度分布 .....	26
四、层流内层 .....	26
第四节 流体在管内的流动阻力 .....	27
一、直管阻力 .....	27
二、局部阻力 .....	31
三、管路系统的总能量损失 .....	33
四、降低管路系统流动阻力的途径 .....	35
第五节 管路计算 .....	36
第六节 流速与流量的测量 .....	37
一、测速管 .....	38
二、孔板流量计 .....	39
三、文丘里流量计 .....	40
四、转子流量计 .....	40

习题 .....	41
<b>第二章 流体输送设备</b> .....	44
第一节 液体输送设备 .....	44
一、离心泵 .....	44
二、其他类型泵 .....	59
第二节 气体输送设备 .....	63
一、离心式通风机 .....	64
二、鼓风机 .....	66
三、压缩机 .....	67
四、真空泵 .....	68
习题 .....	70
<b>第三章 液体搅拌</b> .....	71
第一节 搅拌器及其选型 .....	71
一、常见搅拌器 .....	71
二、搅拌器选型 .....	73
三、提高搅拌效果的措施 .....	75
第二节 搅拌功率 .....	76
一、均相液体的搅拌功率 .....	76
二、非均相液体的搅拌功率 .....	81
三、非牛顿型液体的搅拌功率 .....	83
习题 .....	84
<b>第四章 沉降与过滤</b> .....	85
第一节 重力沉降 .....	85
一、重力沉降速度 .....	85
二、降尘室 .....	88
三、沉降槽 .....	91
第二节 离心沉降 .....	91
一、惯性离心力作用下的沉降速度和分离因数 .....	91
二、离心分离设备 .....	93
第三节 过滤 .....	97
一、基本概念 .....	97
二、过滤基本方程式 .....	98
三、恒压过滤及恒压过滤常数的测定 .....	102
四、过滤设备 .....	105
五、滤饼的洗涤 .....	108
六、过滤机的生产能力 .....	110
习题 .....	111
<b>第五章 传热</b> .....	113
第一节 概述 .....	113
一、传热基本方式 .....	113
二、典型传热设备 .....	114



三、换热器的主要性能指标	116
四、稳态传热和非稳态传热	116
第二节 热传导	117
一、基本概念和傅里叶定律	117
二、平壁的稳态热传导	118
三、圆筒壁的稳态热传导	121
第三节 对流传热	124
一、对流传热分析	124
二、对流传热速率方程	125
三、对流传热系数	125
第四节 传热计算	138
一、能量衡算	138
二、总传热速率微分方程和总传热速率方程	139
三、总传热系数	140
四、平均温度差	143
五、设备热损失的计算	146
第五节 换热器	147
一、间壁式换热器	147
二、传热过程的强化	153
习题	153
<b>第六章 蒸发</b>	155
第一节 概述	155
一、蒸发过程的特点	155
二、蒸发的分类	156
第二节 单效蒸发	156
一、单效蒸发流程	156
二、单效蒸发的计算	156
第三节 温度差损失与总传热系数	160
一、蒸发过程的温度差损失	160
二、蒸发器的总传热系数	162
第四节 多效蒸发	163
一、多效蒸发原理	163
二、多效蒸发流程	163
三、多效蒸发的计算	165
第五节 蒸发器的生产能力、生产强度和效数的限制	173
一、生产能力和生产强度	173
二、效数的限制	174
第六节 蒸发过程的其他节能方法	174
一、额外蒸汽的引出	174
二、热泵蒸发	175
三、冷凝水自蒸发的利用	175

第七节 蒸发设备	175
一、蒸发设备的结构	175
二、蒸发器的选型	180
习题	181
<b>第七章 结晶</b>	182
第一节 基本概念	182
一、溶解度	182
二、过饱和度	183
第二节 结晶动力学	185
一、晶核的形成	185
二、晶体的生长	186
第三节 结晶操作与控制	187
一、结晶的操作方式	187
二、连续结晶的控制	187
三、间歇结晶的控制	188
第四节 结晶计算	188
一、物料衡算	188
二、热量衡算	190
第五节 结晶设备	191
一、冷却式结晶器	191
二、蒸发式结晶器	192
三、真空式结晶器	192
习题	193
<b>第八章 蒸馏</b>	194
第一节 概述	194
第二节 双组分溶液的气液平衡	195
一、溶液的蒸气压及拉乌尔定律	195
二、温度组成图 ( $t$ - $y$ - $x$ 图)	196
三、气液平衡图 ( $y$ - $x$ 图)	197
四、双组分非理想溶液	197
五、挥发度及相对挥发度	198
第三节 蒸馏与精馏原理	201
一、简单蒸馏与平衡蒸馏	201
二、精馏原理	202
第四节 双组分连续精馏塔的计算	204
一、理论板及恒摩尔流假设	205
二、全塔物料衡算	205
三、精馏段操作线方程	206
四、提馏段操作线方程	207
五、进料热状况和进料方程	208
六、理论板数的确定	212

七、回流比的影响与选择	215
八、理论板数的简捷计算	219
九、塔高和塔径的计算	220
十、连续精馏装置的热量衡算	222
第五节 精馏塔	223
一、板式塔	223
二、填料塔	226
第六节 水蒸气蒸馏	230
一、水蒸气蒸馏的基本原理	231
二、沸点和馏出液组成的计算	231
三、水蒸气消耗量的计算	232
第七节 分子蒸馏	233
一、分子蒸馏的基本概念	233
二、分子蒸馏过程及其特点	234
三、分子蒸馏器	235
四、分子蒸馏技术在制药工业中的应用	236
习题	236
<b>第九章 吸收</b>	<b>238</b>
第一节 概述	238
一、吸收过程的基本概念	238
二、吸收的工业应用	238
三、吸收的分类	239
四、吸收与解吸	239
五、吸收剂的选择	239
第二节 气液相平衡	240
一、溶解度曲线	240
二、气液相平衡关系式	241
第三节 传质机理与吸收速率	244
一、传质机理	244
二、对流传质与双膜理论	251
三、吸收速率方程式	252
第四节 吸收塔的计算	257
一、物料衡算与操作线方程	257
二、吸收剂用量与最小液气比	259
三、填料层高度的计算	261
四、吸收塔的操作型计算	266
五、体积吸收系数的测定	268
第五节 解吸及其他类型吸收	268
一、解吸操作及计算	268
二、化学吸收	269
习题	270

<b>第十章 萃取</b> .....	272
<b>第一节 液液萃取</b> .....	272
一、液液萃取流程 .....	272
二、部分互溶三元物系的液液萃取 .....	274
三、萃取剂的选择 .....	277
四、萃取过程的计算 .....	278
五、液液萃取设备 .....	283
<b>第二节 固液萃取</b> .....	285
一、药材有效成分的提取过程及机理 .....	286
二、常用提取剂和提取辅助剂 .....	287
三、提取方法 .....	288
四、提取过程的主要工艺参数 .....	288
五、提取设备 .....	289
<b>第三节 超临界流体萃取</b> .....	293
一、超临界流体 .....	293
二、超临界萃取原理 .....	293
三、超临界萃取的特点 .....	294
四、超临界萃取剂 .....	294
五、超临界萃取流程 .....	295
习题 .....	295
<b>第十一章 干燥</b> .....	296
<b>第一节 概述</b> .....	296
一、去湿方法 .....	296
二、干燥的分类 .....	297
三、对流干燥流程 .....	298
四、对流干燥过程 .....	299
<b>第二节 湿空气的性质和湿度图</b> .....	299
一、湿空气的性质 .....	299
二、湿空气的湿度图及其应用 .....	304
<b>第三节 湿物料的性质</b> .....	308
一、物料含水量的表示方法 .....	308
二、湿物料中水分的性质 .....	308
<b>第四节 干燥过程的计算</b> .....	310
一、物料衡算 .....	310
二、热量衡算 .....	311
三、干燥系统的热效率 .....	314
<b>第五节 干燥速率和干燥时间</b> .....	316
一、干燥速率 .....	316
二、恒定干燥条件下的干燥曲线与干燥速率曲线 .....	316
三、恒定干燥条件下的干燥时间 .....	318
<b>第六节 干燥设备</b> .....	319

一、常用干燥器	320
二、干燥器的选型	324
习题	324
<b>第十二章 冷冻</b>	326
第一节 基本概念	327
一、热力学第一定律	327
二、热力学第二定律	327
三、温熵图	328
第二节 单级蒸气压缩制冷循环	329
一、逆向卡诺循环	329
二、冷冻系数	330
三、单级蒸气压缩制冷循环	331
四、标准制冷能力	335
第三节 制冷剂和载冷剂	336
一、制冷剂	336
二、载冷剂	338
第四节 制冷系统及设备的选用	339
一、单级蒸气压缩制冷系统	339
二、制冷设备	341
习题	344
<b>第十三章 吸附与离子交换</b>	345
第一节 吸附	345
一、基本原理	345
二、吸附剂的物理性质	346
三、常用吸附剂	346
四、吸附平衡与吸附等温线	348
五、吸附传质机理与吸附速率	352
六、吸附过程的计算	354
七、吸附剂的再生	359
第二节 离子交换	360
一、基本原理	360
二、离子交换树脂	361
三、离子交换设备	363
习题	364
<b>第十四章 膜分离技术</b>	366
第一节 概述	366
一、膜的概念	366
二、膜的分类	366
三、膜材料	367
四、膜组件	368
第二节 超滤	370

一、超滤原理 .....	370
二、超滤操作 .....	370
三、超滤的应用 .....	372
第三节 反渗透 .....	373
一、反渗透原理 .....	373
二、反渗透流程 .....	374
三、反渗透的应用 .....	375
第四节 电渗析 .....	376
一、电渗析原理 .....	376
二、电渗析操作 .....	377
三、电渗析的应用 .....	378
<b>附录</b> .....	380
附录 1 单位换算因数 .....	380
附录 2 饱和水的物理性质 .....	380
附录 3 水在不同温度下的粘度 .....	381
附录 4 某些有机液体的相对密度 (液体密度与 4℃ 时水的密度之比) .....	382
附录 5 某些液体的物理性质 .....	383
附录 6 部分无机盐水溶液的沸点 (101.33kPa) .....	384
附录 7 饱和水蒸气表 (按温度排列) .....	385
附录 8 饱和水蒸气表 (按压力排列) .....	386
附录 9 干空气的热物理性质 ( $p=1.013\times 10^5\text{Pa}$ ) .....	387
附录 10 液体的粘度 .....	388
附录 11 气体的粘度 (101.3kPa) .....	390
附录 12 固体材料的导热系数 .....	391
附录 13 某些液体的导热系数 .....	392
附录 14 气体的导热系数 (101.3kPa) .....	394
附录 15 液体的比热 .....	396
附录 16 气体的比热 (101.3kPa) .....	398
附录 17 液体的汽化潜热 (蒸发潜热) .....	400
附录 18 液体表面张力共线图 .....	402
附录 19 管子规格 .....	404
附录 20 常用流速范围 .....	406
附录 21 IS 型单级单吸离心泵规格 (摘录) .....	407
附录 22 错流和折流时的对数平均温度差校正系数 .....	409
附录 23 换热器系列标准 (摘录) .....	410
附录 24 壁面污垢热阻 .....	412
附录 25 几种常用填料的特性数据 .....	412
<b>参考文献</b> .....	414

# 绪 论

---

## 一、制药过程与单元操作

一种药品要实现工业化生产必须做到技术上先进，经济上合理。因此，化学反应的速度要快，目标产物的收率要高，这就要求原料的纯度要高，配料比要合适，混合接触要充分，并在适宜的温度和压力下进行反应。要实现这些条件，原料可通过精制以除去有害的杂质，通过计量来实现适宜的配料比，通过输送设备被输送至反应器内，通过搅拌等方法使物料充分混合接触。此外，可利用加热蒸气、导热油或冷却介质等以维持适宜的反应温度，通过压缩机或真空泵等以维持适宜的操作压力等。反应结束后，获得的物料一般为混合物，其中既有目标产物，又有副产物及未反应的原料，必须通过分离才能获得所需要的产品——原料药，并回收未反应的原料及副产物。原料药经制剂等方法处理后即成为出厂的药品。可见，反应、分离、制剂构成了药品生产的主要工艺过程，其中反应是整个工艺过程的核心，是有机合成、反应工程学等课程所涉及的内容。分离过程是物理加工过程，它与反应过程密切相关，是整个生产工艺中不可或缺的重要组成部分，也是本书的核心内容。原料药必须通过制剂等方法处理后才能成为所需要的药品，这是药剂学、制药工程学等课程所涉及的内容。反应、分离、制剂所需设备的投资和操作费用往往决定了一种药品的经济效益。对制药工程师而言，反应、分离、制剂等方面的知识是必须具备的基本知识。

药品的种类很多，每一种药品都有其独特的生产过程，但归纳起来，各种不同的生产过程都是由若干个化学反应和若干个基本的物理操作串联而成，每一个基本的物理操作过程都称为一个单元操作。例如，利用混合物中各组分的挥发度差异来分离液体混合物的操作过程称为精馏单元操作；利用各组分在液体溶剂中的溶解度差异来分离气体混合物的操作过程称为吸收单元操作；利用各组分在液体萃取剂中的溶解度不同来分离液体或固体混合物的操作过程称为萃取单元操作；利用混合物中各组分与固体吸附剂表面分子结合力的不同，使其中的一种或几种组分分离出来的操作过程称为吸附单元操作；通过对湿物料加热，使其中的部分水分汽化而得到干固体的操作过程称为干燥单元操作；通过冷却或使溶剂气化的方法，使溶液达到过饱和而析出晶体的操作过程称为结晶单元操作等，这些均是常见的制药化工单元操作。再如，制剂生产中的许多过程，如粉碎、筛分、混合、造粒、压片、包衣等，均是常见的制剂单元操作。这样，就无需将每一个药品生产过程都视为一种特殊的或独有的知识加以研究，而只研究组成药品生产过程的每一个单元操作即可。由于化学反应器和制剂单元操作的内容已包含于《制药工程学》一书中，因此，本书只研究典型制药化工单元操作的基本原理及设备，并探讨这些单元操作过程的强化途径。

## 二、制药化工原理的性质和任务

制药化工原理是制药工程、药物制剂等制药类专业学生必修的一门技术基础课程，是利用数学、物理、化学、物理化学等先修课程的知识来解决制药生产中的实际问题，并为制药工艺学、制药工程学等后续工程类专业课程的学习打下基础。所以，制药化工原理是自然科学领域的基础课向工程学科的专业课过渡的入门课程，在整个教学计划中起着承上启下的作用。

制药化工原理是一门理论与实践密切结合的技术基础课，也是一门学以致用课程。在教学和学习过程中，要理论联系实际，树立工程的观点，从工程和经济的角度去考虑技术问题。通过本课程的课堂教学和实验训练，使学生能掌握典型制药化工单元操作的基本原理及设备，并具备初步的工程实验研究能力和实际操作技术。对学生而言，努力学好本课程，将来无论是在科研院所，还是在工厂企业工作，都是大有裨益的。

## 三、单位换算

任何物理量都是用数字和单位联合表达的。一般先选几个独立的物理量，如长度、时间等作为基本量，并规定出它们的单位，这些单位称为基本单位。而其他物理量，如速度、加速度等的单位则根据其自身的物理意义，由相应的基本单位组合而成，这些单位称为导出单位。

由于历史、地区及不同学科领域的不同要求，对基本量及其单位的选择有所不同，因而形成了不同的单位制度，如物理单位制（CGS制）、工程单位制等。多种单位制并存，给计算和交流带来不便，并容易产生错误。为改变这种局面，在1960年10月第十一届国际计量大会上通过了一种新的单位制，即国际单位制，其代号为SI。国际单位制共规定了七个基本单位和两个辅助单位，如表0-1所示。

表 0-1 SI制基本单位和辅助单位

项目	基本单位							辅助单位	
	长度	质量	时间	电流	温度	物质的量	发光强度	平面角	立体角
单位名称	米	千克	秒	安培	开尔文	摩尔	坎德拉	弧度	球面度
单位符号	m	kg	s	A	K	mol	cd	rad	sr

中国目前使用的是以SI制为基础的法定计量单位，它是根据中国国情，在SI制单位的基础上，适当增加一些其他单位构成的。例如，体积的单位升（L），质量的单位吨（t），时间的单位分（min）、时（h）、日（d）、年（a）仍可使用。

本书采用法定计量单位，但在实际应用中，仍可能遇到非法定计量单位，需要进行单位换算。不同单位制之间的主要区别在于其基本单位不完全相同。表0-2给出了常用单位制中的部分基本单位和导出单位。

表 0-2 常用单位制中的部分基本单位和导出单位

国际单位制(SI制)				物理单位制(CGS制)				工程单位制			
基本单位		导出单位		基本单位		导出单位		基本单位		导出单位	
长度	质量	时间	力	长度	质量	时间	力	长度	力	时间	质量
m	kg	s	N	cm	g	s	dyn	m	kgf	s	kgf · s <sup>2</sup> · m <sup>-1</sup>



在国际单位制和物理单位制中质量是基本单位，力是导出单位。而在工程单位制中力是基本单位，质量是导出单位。因此，必须掌握三种单位制之间力与质量之间的关系，才能正确地进行单位换算。

在工程单位制中，将作用于 1kg 质量上的重力，即 1kgf 作为力的基本单位。由牛顿第二定律  $F=ma$  得

$$\begin{aligned} 1\text{N} &= 1\text{kg} \times 1\text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 1\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \\ 1\text{kgf} &= 1\text{kg} \times 9.81\text{m} \cdot \text{s}^{-2} = 9.81\text{N} = 9.81 \times 10^5 \text{dyn} \\ 1\text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1} &= 9.81\text{N} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1} = 9.81\text{kg} = 9.81 \times 10^3 \text{g} \end{aligned}$$

根据三种单位制之间力与质量的关系，即可将物理量在不同单位制之间进行换算。将物理量由一种单位换算至另一种单位时，物理量本身并没有发生改变，仅是数值发生了变化。例如，将 1m 的长度换算成 100cm 的长度时，长度本身并没有改变，仅仅是数值和单位的组合发生了改变。因此，在进行单位换算时，只需要用新单位代替原单位，用新数值代替原数值即可，其中

$$\text{新数值} = \text{原数值} \times \text{换算因数} \quad (0-1)$$

式中

$$\text{换算因数} = \frac{\text{原单位}}{\text{新单位}} \quad (0-2)$$

它表示一个原单位相当于多少个新单位。

**【例 0-1】** 试将物理单位制中的密度单位  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  分别换算成 SI 制中的密度单位  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$  和工程单位制中的密度单位  $\text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ 。

解：首先确定换算因数

$$\frac{\text{g}}{\text{kg}} = 10^{-3}, \quad \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 10^{-2}, \quad \frac{\text{kg}}{\text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}} = \frac{1}{9.81}$$

则

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \frac{1 \times 10^{-3} \text{kg}}{(10^{-2} \text{m})^3} = 1 \times 10^3 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3} = 1 \times 10^3 \times \frac{1}{9.81} \cdot \text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1} \cdot \frac{1}{\text{m}^3} = 102 \text{kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$$

**【例 0-2】** 在 SI 制中，压力的单位为 Pa（帕斯卡），即  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。已知 1 个标准大气压的压力相当于  $1.033 \text{kgf} \cdot \text{cm}^{-2}$ ，试以 SI 制单位表示 1 个标准大气压的压力。

解：首先确定换算因数

$$\frac{\text{kgf}}{\text{N}} = 9.81, \quad \frac{\text{cm}}{\text{m}} = 10^{-2}$$

则

$$1 \text{atm} = 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} = \frac{1.033 \times 9.81 \text{N}}{(10^{-2} \text{m})^2} = 1.01325 \times 10^5 \text{N} \cdot \text{m}^{-2} = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$$

## 习 题

1. 在物理单位制中，粘度的单位为 P（泊），即  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，试将该单位换算成 SI 制中的粘度单位  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。
2. 已知通用气体常数  $R=0.08206 \text{L} \cdot \text{atm} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ，试以法定单位  $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  表示  $R$  的值。