



高等学校教材

# 化工单元操作

(供制药、精细化工专业用)

沈阳药学院 徐志远 主编

化学工业出版社

## 内 容 提 要

本书是高等院校制药专业使用的教材。全书包括绪论、流体流动、流体输送机械、非均一系的分离、液体搅拌、传热、蒸发与结晶、冷冻、气体吸收、液体蒸馏、溶剂萃取、固体干燥等章。书末有附录，包括单位换算表及各种重要数据。

本书由沈阳药学院徐志远（绪论、第一、五章）、梁忠英（第二、三、六章）、王温（第四、七章）、华东化工学院徐匡时（第十章、附录）、缪志康（第十一章）、南京药学院潘隆愚（第九章）、华西医科大学药学院姜继祖（第八章）等同志参加编写。

本书可供制药、精细化工等有关专业应用，对从事化工及制药专业的生产、科研、设计工作的技术人员也有参考价值。

高等学校教材  
化工单元操作  
(供制药、精细化工专业用)  
沈阳药学院 徐志远 主编

责任编辑：张智德  
乐珍宝  
封面设计：季玉芳

化学工业出版社出版  
(北京和平里七区十六号楼)  
化学工业出版社印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行

开本787×1092<sup>1</sup>/16印张 3.7 插页 2 字数 834千字印数1—15,470

1987年12月北京第1版1987年12月北京第1次印刷  
统一书号15063.4033(K-318) 定价 5.75 元

## 前 言

本书是国家医药管理局科教司组织有关院校，根据制药专业及相关专业的教学要求，第二次编写的教材。

第一次编写是在1979年由沈阳药学院徐志远（绪论、第一、二章）；华东化工学院徐匡时（附录）、缪志康（第十章）；上海医科大学药学院张方宜（第四、五、六章）、郭梦骅（第四章）、杨志华（第五章）；华西医科大学药学院姜继祖（第七章）；北京医科大学药学院张培方（第八章）、肖振彰（第九章）；南京药学院盛以虞、金祖德（第三章）等同志参加编写。书名为《制药化工过程及设备》。

作为一本合用的教材，应当不断地在教学实践中充实、完善。本书上一版经过七年的应用，有些内容需要改动，故在前书的基础上，再次组织编写。编写中加强了有关基本理论的阐述，全面改写了《蒸馏》单元，增加了《搅拌》内容及习题，并提出主要参考书供读者学习时参考。

国务院于1984年2月27日发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》后，原书中有一些计量单位，现已按法定计量单位予以改正。

鉴于原书名《制药化工过程及设备》与内容不甚相符，容易引起误解，故改称《化工单元操作》。

编写过程中，得到科教司与化工出版社的指导，及有关院校各制药厂及科研单位给予各种协助与支持，编者对此深表谢意。

编者学识有限，欠妥之处不少，希望指出其不足，以助日后修订。

编者 1986年10月

# 目 录

绪论 .....	1
<b>第一章 流体流动</b> .....	<b>10</b>
第一节 流体静力学基本方程 .....	10
1-1 流体的密度、比容和相对密度 .....	10
1-2 流体的压力(压强) .....	10
1-3 流体静力学基本方程 .....	12
1-4 静压力的测量 .....	12
第二节 流体流动的基本方程 .....	15
1-5 流量与流速 .....	15
1-6 稳定流动与不稳定流动 .....	15
1-7 流体稳定流动的物料衡算——连续性方程 .....	16
1-8 流体稳定流动的能量衡算——柏努利方程 .....	17
1-9 柏努利方程应用举例 .....	23
第三节 流体在管内的流动阻力 .....	27
1-10 流动阻力的表现——压力降 .....	27
1-11 产生流动阻力的原因及其影响因素 .....	28
1-12 粘度 .....	29
1-13 流体流动的类型 .....	31
1-14 阻力计算的通式 .....	33
1-15 流体在直管中作层流流动时的阻力 .....	34
1-16 流体力学相似 .....	36
1-17 流体在圆形直管中流动时的阻力关系曲线 .....	39
1-18 局部阻力的计算 .....	43
1-19 管路计算 .....	45
第四节 流速与流量的测量 .....	49
1-20 测速管(毕托管) .....	49
1-21 孔板流量计 .....	50
1-22 转子流量计 .....	52
<b>第二章 流体输送机械</b> .....	<b>60</b>
第一节 离心泵 .....	60
2-1 离心泵的结构和作用原理 .....	60
2-2 离心泵的主要性能参数 .....	61
2-3 离心泵的特性曲线 .....	63
2-4 离心泵的安装高度 .....	65

2-5	离心泵的操作、组合及安装 .....	68
2-6	药厂常用离心泵的类型和选用 .....	71
第二节	其它类型泵 .....	73
2-7	正位移泵 .....	73
2-8	旋涡泵 .....	77
2-9	流体作用泵 .....	78
第三节	各类泵的比较 .....	78
第四节	气体输送与压缩机械 .....	79
2-10	通风机 .....	80
2-11	鼓风机 .....	85
2-12	压缩机 .....	86
2-13	真空泵 .....	88
<b>第三章</b>	<b>非均一系的分离 .....</b>	<b>93</b>
第一节	气相非均一系的分离 .....	94
3-1	沉降分离 .....	94
3-2	气体的过滤净制 .....	103
3-3	湿法除尘 .....	105
3-4	电除尘器 .....	107
第二节	液相非均一系的分离 .....	107
3-5	过滤机理 .....	107
3-6	过滤设备 .....	113
3-7	离心分离设备 .....	117
3-8	离心沉降设备 .....	121
<b>第四章</b>	<b>液体搅拌 .....</b>	<b>125</b>
第一节	搅拌设备 .....	125
4-1	搅拌设备的组成 .....	125
4-2	搅拌器的作用原理 .....	125
4-3	搅拌器的分类 .....	127
第二节	搅拌器的性能 .....	130
4-4	旋桨式搅拌器 .....	130
4-5	涡轮式搅拌器 .....	131
4-6	桨式搅拌器 .....	131
4-7	搅拌器的强化措施 .....	132
4-8	搅拌器的选型 .....	132
第三节	搅拌功率 .....	133
4-9	功率关联式 .....	133
4-10	功率曲线 .....	134
第四节	搅拌器的放大 .....	138
4-11	搅拌器放大的概念 .....	138

4-12	搅拌器的放大	139
<b>第五章</b>	<b>传热</b>	<b>142</b>
第一节	传热的基本概念	142
5-1	传热的基本方式	142
5-2	常用的传热设备	143
5-3	稳定传热和不稳定传热	144
第二节	热传导	145
5-4	热传导的基本概念和傅立叶定律	145
5-5	导热系数	146
5-6	平壁的热传导	148
5-7	圆筒壁的热传导	150
第三节	对流传热	153
5-8	对流传热的分析	153
5-9	对流传热速率方程(牛顿冷却定律)	153
5-10	影响对流传热系数的因素	154
5-11	热相似	155
第四节	对流传热系数关联式	157
5-12	流体无相变化时的对流传热系数	157
5-13	流体有相变化时的对流传热系数	161
第五节	热辐射	165
5-14	热辐射的基本概念	165
5-15	热辐射的基本定律	166
5-16	两固体间的相互辐射	168
5-17	对流和辐射的联合传热	169
第六节	传热计算	170
5-18	能量衡算	170
5-19	总传热速率方程	171
5-20	传热温度差与流体流向的选择	171
5-21	流体流向的选择	176
5-22	总传热系数	177
第七节	换热器	181
5-23	常用换热器	182
5-24	高效换热器	189
5-25	强化传热过程的途径	193
第八节	列管换热器的设计	195
5-26	列管换热器设计的基本原则	195
5-27	列管换热器设计的基本步骤和举例	198
第九节	常用的加热、冷却与冷凝的方法	202
5-28	加热方法	203

5-29 冷却与冷凝方法	207
<b>第六章 蒸发与结晶</b>	<b>212</b>
<b>第一节 蒸发</b>	<b>212</b>
6-1 蒸发过程的基本概念	212
6-2 蒸发器	213
6-3 蒸发器的辅助设备	219
6-4 单效蒸发的计算	220
6-5 蒸汽的利用率、蒸发器的生产强度及多效蒸发	226
6-6 蒸发过程常用的节能措施	228
<b>第二节 结晶</b>	<b>230</b>
6-7 结晶原理	230
6-8 结晶的工业方法及常用的结晶设备	232
6-9 结晶的工艺计算	235
<b>第七章 冷冻</b>	<b>241</b>
<b>第一节 冷冻过程的基本原理</b>	<b>241</b>
7-1 理想冷冻循环	241
7-2 冷冻系数与冷冻能力	243
7-3 温熵图(T-S图)	246
7-4 实际冷冻循环	248
<b>第二节 冷冻剂与载冷体</b>	<b>250</b>
7-5 冷冻剂	250
7-6 载冷体	251
<b>第三节 压缩蒸气冷冻装置及选用</b>	<b>252</b>
7-7 压缩蒸气冷冻装置	252
7-8 冷冻机的功率消耗与选用	254
<b>第四节 其它型式冷冻装置</b>	<b>256</b>
7-9 蒸汽喷射式汽化冷冻装置	256
7-10 吸收冷冻装置	257
<b>第八章 气体吸收</b>	<b>259</b>
<b>第一节 吸收操作的基本原理</b>	<b>260</b>
8-1 吸收中的相平衡	260
8-2 扩散原理	266
8-3 吸收速率	270
<b>第二节 填料吸收塔的结构</b>	<b>278</b>
8-4 填料的类型及特性	279
8-5 填料塔的附属结构	282
<b>第三节 填料吸收塔的工艺设计</b>	<b>287</b>
8-6 吸收操作的流程	287
8-7 物料衡算及吸收操作线方程	288

8-8	吸收剂的选择及用量 .....	289
8-9	填料塔的直径 .....	291
8-10	填料层的阻力 .....	296
8-11	填料层高度 .....	297
8-12	传质系数及传质单元高度的计算 .....	305
第四节	解吸及其它类型吸收简介 .....	311
8-13	解吸 .....	311
8-14	其它类型吸收 .....	312
第五节	其它吸收设备 .....	314
8-15	吸收操作的强化 .....	314
8-16	其它吸收设备 .....	315
<b>第九章</b>	<b>液体蒸馏</b> .....	<b>323</b>
第一节	蒸馏中的气液平衡关系 .....	323
9-1	气液平衡与蒸馏操作 .....	323
9-2	双组分理想溶液的相图 .....	324
9-3	双组分非理想溶液的相图 .....	326
9-4	挥发度与相对挥发度 .....	328
第二节	蒸馏方法和总物料衡算 .....	330
9-5	简单蒸馏和平衡蒸馏 .....	330
9-6	精馏的原理 .....	331
9-7	精馏的流程 .....	332
9-8	蒸馏操作的物料衡算 .....	334
第三节	双组分混合液连续精馏的计算 .....	336
9-9	恒摩尔流量假定 .....	336
9-10	精馏塔的操作线方程 .....	336
9-11	进料热状况对操作线的影响 .....	338
9-12	理论板数的图解法 .....	342
9-13	回流比的选择 .....	344
9-14	理论板数的简捷算法 .....	346
9-15	塔板效率与实际塔板数 .....	350
9-16	填料精馏塔的填料层高度 .....	353
9-17	影响精馏分离效果的因素 .....	354
第四节	微分蒸馏和间歇精馏的计算 .....	355
9-18	微分蒸馏的计算 .....	355
9-19	间歇精馏的计算 .....	358
第五节	多组分精馏的计算 .....	362
9-20	多组分精馏计算的概念 .....	362
9-21	相平衡常数和相平衡计算 .....	363
9-22	产品组成的计算 .....	366



9-23	最小回流比和实际回流比下的塔板数	371
第六节	蒸馏设备	372
9-24	塔板的类型	372
9-25	塔板的主要尺寸与负荷性能	375
9-26	板式塔塔径和其他尺寸的计算	377
9-27	填料精馏塔	385
9-28	蒸馏釜和其他传热设备	385
第七节	添加组分的蒸馏	387
9-29	水蒸汽蒸馏	387
9-30	恒沸精馏	390
9-31	萃取精馏	391
<b>第十章</b>	<b>溶剂萃取</b>	<b>399</b>
第一节	基本概念	399
10-1	萃取过程	399
10-2	液-液相平衡	401
10-3	液-液萃取中常见的物系和萃取流程	405
10-4	溶剂(萃取剂)的选择	408
第二节	液-液萃取的计算	409
10-5	萃取剂与原溶剂不互溶物系萃取过程的计算	410
10-6	一对部分互溶三元系萃取过程的计算	415
10-7	复杂物系连续逆流萃取实验	424
10-8	萃取过程的速度	425
第三节	液-液萃取设备	427
10-9	液-液萃取设备概述	427
10-10	萃取设备的主要类型	428
10-11	液-液萃取设备的选择	438
10-12	萃取塔计算简述	439
第四节	固-液萃取	440
10-13	固-液萃取概述	440
10-14	影响固-液萃取的诸因素	440
10-15	固-液萃取方法及设备	442
<b>第十一章</b>	<b>固体干燥</b>	<b>452</b>
第一节	湿空气的性质及焓湿图	452
11-1	湿空气的性质	452
11-2	湿空气的焓湿图及其应用	458
第二节	干燥器的物料和热量衡算	461
11-3	物料衡算	461
11-4	热量衡算	464
11-5	干燥器出口空气状态的确定	466

11-6	干燥器的热效率	467
第三节	干燥速率和干燥时间	470
11-7	物料中所含水分的性质	470
11-8	干燥速率及影响因素	472
11-9	恒定干燥条件下干燥时间的计算	477
第四节	干燥器	479
11-10	气流干燥器	479
11-11	流化床干燥器	483
11-12	喷雾干燥器	487
11-13	厢式干燥器	490
11-14	耙式真空干燥器	490
11-15	双锥回转真空干燥器	491
11-16	滚筒干燥器	491
11-17	冷冻干燥器	492
11-18	红外干燥器	492
11-19	微波干燥	493
11-20	干燥器的选型	494
第五节	干燥器的计算	495
11-21	气流干燥器的计算	495
11-22	卧式多室流化床干燥器的计算	501
11-23	干燥器的设计程序	510
附 录		517
附录一	单位换算表	517
1.	长度	517
2.	面积	517
3.	容积, 体积	518
4.	质量	518
5.	力	518
6.	温度	519
7.	密度	519
8.	体积流量	519
9.	压力	520
10.	能量, 热, 功	520
11.	功率	521
12.	动力粘度	521
13.	运动粘度, 扩散系数	522
14.	导热系数	522
15.	总传热系数, 对流传热系数	522
16.	比热容	522

17. 表面张力 .....	523
18. 传质系数 .....	523
19. 重力加速度 .....	523
20. 通用气体常数 .....	523
附录二 各种重要数据 .....	524
1. 某些液体的重要物理性质 .....	524
2. 干空气的重要物理性质 .....	526
3. 某些气体的重要物理性质 .....	527
4. 水的重要物理性质 .....	528
5. 水在不同温度下的粘度 .....	530
6. 水的饱和蒸汽压 ( $-20\sim 100^{\circ}\text{C}$ ) .....	530
7. 饱和水蒸汽的物理性质 (以温度为准) .....	531
8. 饱和水蒸汽的物理性质 (以压力为准) .....	532
9. 液体粘度共线图 .....	534
10. 气体粘度共线图 .....	536
11. 液体比热容共线图 .....	537
12. 气体比热容共线图 (常压下用) .....	538
13. 液体汽化潜热共线图 .....	539
14. 某些液体的导热系数 $\lambda \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .....	540
15. 某些水溶液的导热系数 .....	540
16. 某些液体的汽化潜热 $\text{kJ}/\text{kg}$ .....	541
17. 液体表面张力共线图 .....	542
18. 某些水溶液的表面张力 $\text{N}/\text{m} \times 10^2$ .....	543
19. 有机高温载热体的物理性质 .....	543
20. ( $T_0=273\text{K}$ , $P_0=101.3\text{kPa}$ )下气体与蒸气在空气中的扩散系数 .....	544
21. $298\text{K}$ , $101.3\text{kPa}$ 下气体与蒸气在空气中的扩散系数 .....	544
22. $293\text{K}$ 时, 扩散入液体中的扩散系数 .....	545
23. 管内各种流体常用流速 .....	546
24. 有缝钢管 (即水、煤气管) 规格 (摘自YB234-63) .....	546
25. 标准筛目 .....	547

## 绪 论

### (一) 《化工单元操作》课程的性质及研究对象

化学工业(包括制药工业)是工业规模对原料进行化学与物理性质的处理,使其成为合格产品。此过程即为化学工业的生产过程,简称化工过程。化工过程的特点是品种多、原料复杂,生产中均有化学反应,而反应的条件要求苛刻,产品的质量要求高。

但从化工过程所包括的步骤来看可以分为两类,一类是以进行化学反应为主,通常是在反应器中进行。可将化学反应分为单元作业(Unit Process)来研究,如磺化、硝化、氯化等。另一类是物理性质操作,例如:流体流动、传热、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、干燥等操作。这类操作称为单元操作(Unit Operation)。人们认识到化工过程不过是各种单元作业与单元操作的不同组合。这些单元操作与单元作业的基本原理(内部规律)并不因为原料与操作条件不同而改变。人们还认识到,如果要最有效、最迅速、最经济地发展化学工业,就必须研究这些单元操作与单元作业的规律性。并根据这些规律性来解决化工生产中的问题,这样就抓住了事物的本质。如组织实验室的工艺研究,过程的工艺与工程放大、选用或设计设备、以及拟定操作条件和强化途径等。

《化工单元操作》是研究典型单元操作的基本原理、及其设备的构造、操作、工艺计算与发展趋势。《化工单元操作》所研究的内容正是《制药工艺学》和《药厂设备及设计概论》等专业课程的重要基础。所以在教学计划中,本课程为专业基础课。

随着生产与科学实验的发展,对“单元操作”的认识也不断深化。发现各“单元操作”不是孤立无关的,而是可以归纳到一些基本的共同规律中去。即把各“单元操作”看成是密切联系的三种传递现象——动量传递、热量传递与质量传递,可以用三种传递理论来研究。而三种传递现象同属传递过程,又有彼此相类似的规律可以合起来研究,这样形成了传递过程这门学科。它是单元操作在理论方面深入的发展。

同时,由于生产过程是一个整体,而且希望在尽可能的高效率和低成本下进行生产。因此,只孤立地研究每个单元操作及设备就不能达到这一目的。而必须将整个生产过程作为一个综合系统,建立这一系统的数学模型,应用电子计算机,进行整个系统的物质和能量转变过程的最优化研究。这又发展了化工系统工程学。

为学习“单元操作”而开设的课程,在我国曾有不同名称,如《化工原理》、《化工过程及设备》、《化学工程》,但其基本内容与体系,仍保持相对稳定。

### (二) 《化工单元操作》课程的内容及分类

由上述可知,本课程所研究的内容在不断深入,各种分类方法尚未定论。但根据目前制药工业生产的需要和学时的限制,主要讨论比较重要而常用的一些单元操作,并按其所根据的内在理论基础,归纳为三类:

一、以流体力学理论为基础,包括下列四章:

1. 流体流动
2. 流体输送机械

## 3. 非均一系的分离

## 4. 液体搅拌

二、以热量传递理论为基础，包括下列三章：

## 1. 传热

## 2. 蒸发与结晶

## 3. 冷冻（包括热力学理论为基础）

三 以质量传递理论为基础，包括下列四章：

## 1. 气体吸收

## 2. 液体蒸馏

## 3. 溶剂萃取

## 4. 固体干燥

通过学习本课程，达到培养学生分析和解决有关单元操作各种问题的能力，所以理论与实践应密切结合，不能偏废。

### （三） 物理量的单位制

生产中常遇到各种单位制度表示各种物理量，如密度、粘度、导热系数、吸收系数等因此，应该熟悉各种单位制和单位换算：

物理量的大小，除了列出数值，还要列出计量这个数值的单位。例如流体的速度是一个物理量，它的大小可以用2米/秒来表示，若是“2”这个数值离开米/秒这个单位就毫无意义。所以物理量的大小是用数值与单位两者的乘积来表示。说它是个乘积，因为在计算中，单位与数值都应同样看待，可以一起纳入运算。

为了把各种物理量的单位表示清楚，人们把物理量划分为基本量与导出量，并给每个基本量规定出一个单位，称为基本单位；其余的物理量都可以从基本量导出，称为导出量。导出量的单位称为导出单位。基本单位与导出单位的总和称为单位制。至于选定哪几个物理量作基本量，给基本量规定什么基本单位，可从不同角度考虑。由于基本量选择的不同；或对基本量所规定的基本单位不同，便产生了不同的单位制度。常见的米制单位制所用的基本量与基本单位如下：

单 位 制	基 本 量			
	长 度	质 量	力	时 间
绝对单位制				
CGS制	cm	g	—	—
MKS制	m	kg	—	—
工程单位制	m	—	kgf	—

注：与米制对应的还有英制，以英尺、磅、秒作基本单位（f·p·s制）

由上表可以看出，绝对单位制（CGS制与MKS制）以长度、质量和时间作为基本单位，力的单位则是导出单位；工程单位制以长度、力和时间作为基本单位，质量单位则是导出单位。在自然科学里多采用CGS制，所以CGS制又称物理单位制。工程单位制则用于工程技术中。

这样，通常所称米制（即“公制”），实际是并用多种基本单位。例如一个压力单位就

有千克力/厘米<sup>2</sup>、克力/厘米<sup>2</sup>、千克力/米<sup>2</sup>、标准大气压、毫米汞柱、毫米水柱、米水柱、巴、达因/厘米<sup>2</sup>等，这就造成了应用上的混乱。为了消除这些缺点，1954年第十届国际计量大会提出，经过征求意见后，于1960年第十一届国际计量大会补充修订，批准建立一种比较先进的计量单位制，称为国际单位制。其代号为SI，它是法文Système International（国际制）的缩写，我国简称国际制。国际单位制的构成原则比较合理，大部分单位都很实用，并且涉及所有的专业领域，采用国际单位制可以废除几乎所有其它单位制和单位。例如，只用一个单位“帕斯卡”Pa，就可以代替上述所有压力单位。从而避免由于多种单位制并用而引起的混乱现象和不必要的换算，有利于促进经济建设和国际交往。

目前绝大部分工业发达国家都积极推广国际单位制，原来采用英制的国家也大部分决定放弃英制，采用或准备采用国际单位制。我国国务院于一九八四年二月二十七日发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》。法定计量单位是以国际单位制为基础，结合我国的实际情况增加了一些非国际单位制单位构成的。它具有科学、合理、实用、简明等优点。所以熟悉应用法定单位制，并了解与其他单位制的换算关系，就显得十分必要。本课程采用法定单位制，适当介绍其他单位制，一般用中文代号表示，以示区别。

我国的法定计量单位\*(简称法定单位)包括：

- (1) 国际单位制的基本单位(见表1)；
- (2) 国际单位制的辅助单位(见表2)；
- (3) 国际单位制中具有专门名称的导出单位(见表3)；
- (4) 国家选定的非国际单位制单位(见表4)；
- (5) 由以上单位构成的组合形式的单位；
- (6) 由词头和以上单位所构成的十进倍数和分数单位(词头见表5)。

表1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
时间	秒	s
电流	安(培)	A
热力学温度	开(尔文)	K
物质的量	摩(尔)	mol
发光强度	坎(德拉)	cd

表2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

\* 法定单位的定义、使用方法等，由国家计量局规定。

表 3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示式例
频率	赫(兹)	Hz	$s^{-1}$
力; 重力	牛(顿)	N	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$
压力, 压强; 应力	帕(斯卡)	Pa	$N \cdot m^{-2}$
能量; 功; 热	焦(耳)	J	$N \cdot m$
功率; 辐射通量	瓦(特)	W	$J/s$
电荷量	库(仑)	C	$A \cdot s$
电位; 电压; 电动势	伏(特)	V	$W/A$
电 容	法(拉)	F	$C/V$
电 阻	欧(姆)	$\Omega$	$V/A$
电 导	西(门子)	S	$A/V$
磁 通 量	韦(伯)	Wb	$V \cdot s$
磁通量密度, 磁感应强度	特(斯拉)	T	$Wb \cdot m^{-2}$
电 感	亨(利)	H	$Wb/A$
摄氏温度	摄 氏 度	$^{\circ}C$	
光 通 量	流(明)	lm	$cd \cdot sr$
光 照 度	勒(克斯)	lx	$lm \cdot m^{-2}$
放射性活度	贝可(勒尔)	Bq	$s^{-1}$
吸收剂量	戈(瑞)	Gy	$J/kg$
剂量当量	希(沃特)	Sv	$J/kg$

表 4 国家选定的非国际单位制单位

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时 间	分	min	1 min = 60 s
	(小)时	h	1 h = 60 min = 3600 s
	天(日)	d	1 d = 24 h = 86400 s
平 面 角	(角)秒	"	$1'' = (\pi/648000) \text{ rad}$ ( $\pi$ 为圆周率)
	(角)分	'	$1' = 60'' = (\pi/10800) \text{ rad}$
	度	$^{\circ}$	$1^{\circ} = 60' = (\pi/180) \text{ rad}$
旋转速度	转 每 分	r/min	$1 \text{ r/min} = (1/60) \text{ s}^{-1}$
长 度	海 里	n mile	1 n mile = 1852 m (只用于航程)
速 度	节	kn	$1 \text{ kn} = 1 \text{ n mile/h} = (1852/3600) \text{ m/s}$ (只用于航行)
质 量	吨	t	$1 \text{ t} = 10^3 \text{ kg}$
	原子质量单位	u	$1 \text{ u} \approx 1.6605655 \times 10^{-27} \text{ kg}$
体 积	升	L, (l)	$1 \text{ L} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$
能	电子伏	eV	$1 \text{ eV} \approx 1.6021892 \times 10^{-19} \text{ J}$
级 差	分 贝	dB	
线 密 度	特(克斯)	tex	$1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$

表 5 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
$10^{18}$	艾(可萨)	E	$10^{-1}$	分	d
$10^{15}$	拍(它)	P	$10^{-2}$	厘	c
$10^{12}$	太(拉)	T	$10^{-3}$	毫	m
$10^9$	吉(咖)	G	$10^{-6}$	微	$\mu$
$10^6$	兆	M	$10^{-9}$	纳(诺)	n
$10^3$	千	k	$10^{-12}$	皮(可)	p
$10^2$	百	h	$10^{-15}$	飞(母托)	f
$10^1$	十	da	$10^{-18}$	阿(托)	a

- 注: 1. 周、月、年(年的符号为a), 为一般常用时间单位。  
 2. ( ) 内的字, 是在不致混淆的情况下, 可以省略的字。  
 3. ( ) 内的字为前者的同义语。  
 4. 角度单位度分秒的符号不处于数字后时, 用括弧。  
 5. 升的符号中, 小写字母 l 为备用符号。  
 6. r 为“转”的符号。  
 7. 人民生活 and 贸易中, 质量习惯称为重量。  
 8. 公里为千米的俗称, 符号为 km。  
 9.  $10^4$  称为万,  $10^8$  称为亿,  $10^{12}$  称为万亿, 这类数词的使用不受词头名称的影响, 但不应与词头混淆。

现将常用的一些物理量的法定单位制与其他单位制的单位列表如下:

量的名称	法定单位制			物理单位制 (CGS制)	工程单位制 m·kgf·s制
	单位名称	单位符号	用基本单位表示的关系式		
力	牛(顿)	N	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{g}\cdot\text{cm}/\text{m}^2 = \text{dyn}$	kgf
压力(压强)	帕(斯卡)	Pa	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{dyn}\cdot\text{cm}^2 = 10^{-6}\text{bar}$	kgf/m <sup>2</sup>
能 功	焦(耳)	J	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{dyn}\cdot\text{cm} = \text{erg}$	kgf·m
热 量	焦(耳)	J	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	cal	kcal
功 率	瓦(特)	W	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}$	erg/s	kgf·m/s
密 度	千克每立方米	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$\text{m}^{-3}\cdot\text{kg}$	$\text{g}/\text{cm}^3$	$\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$
粘 度	帕斯卡秒	Pa·s	$\text{m}^{-1}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{dyn}\cdot\text{s}/\text{cm}^2 = \text{P}$	$\text{kgf}\cdot\text{s}/\text{m}^2$
力 矩	牛顿米	N·m	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{dyn}\cdot\text{cm}$	kgf·m
表面张力	牛顿每米	N/m	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}$	$\text{dyn}/\text{cm}$	kgf/m
热容、嫡	焦耳每开尔文	J/K	$\text{m}^2\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	cal/°C	kcal/°C
比热容、比嫡	焦耳每千克开尔文	J/(kg·K)	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	cal/g°C	kcal/kgf·°C
扩散系数	平方米每秒	$\text{m}^2/\text{s}$	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{cm}^2/\text{s}$	$\text{m}^2/\text{s}$
导热系数	瓦特每米开尔文	W/(m·K)	$\text{m}\cdot\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{cal}/\text{cm}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$	$\text{kcal}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$
传热系数	瓦特每平方米开尔文	W/(m <sup>2</sup> ·K)	$\text{kg}\cdot\text{s}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$	$\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$	$\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{s}\cdot\text{°C}$

#### (四) 单位的正确运用

化工计算公式种类不同, 使用物理量单位的方法也不同。

一类是根据物理规律建立的公式, 其中的符号除掉比例系数以外, 都代表物理量, 因此又称作物理量方程。例如牛顿第二定律 ( $F = ma$ ) 或柏努利方程等。既然物理量是数值与单位的乘积, 把物理量的数据代入这一类公式时, 就应当把数值和单位一起代进去。而解出的结果总是属于相同单位制度。所以物理量方程在单位上总是一致的, 称为单位一致性或因次一致性。



使用物理量方程进行计算，开始便应选定一种单位制，并贯彻到底，中途不能改变。求得的结果若不能保持单位的一致或得出不合理的单位，这表明计算中混进不一致的单位，或者是所用的公式本身单位不一致，有必要检查公式是否正确。

另一类纯粹根据实验结果整理出来的公式，称为经验公式。这类公式中的每一个符号都要用指定单位的数值代入，计算结果的单位也是指定的。经验公式往往不符合单位的一致性。所以严格的说，这种公式中的符号并不能代表完整的物理量，只是代表物理量中的数值部分，所以又称数字公式。

使用经验公式时，代入前要核实每个物理量数据所用的单位是否合乎公式的规定，但代入时只需把数值代入，算出的结果则附上公式所规定的单位。经验公式的使用是有局限性的。

化工过程所研究的现象十分复杂，一般用微分方程描述。但由于涉及很多物理量，这些微分方程很难求得积分通式。故借助相似理论和实验得出具有一定物理意义的相似准数组成的准数方程，这类准数方程在化工计算中十分重要。

使用准数方程求物理量时，对包含所求物理量的相似准数选用的单位，应与求取物理量的单位一致。而其他相似准数可以采用任意单位，但必须注意它的物理量单位能消去，这些以后还要讨论。

#### (五) 单位换算

在化工计算中，从各种来源得到数据，其单位不一定符合公式要求，需要预先换算好。若在运算过程中临时换算，很容易发生错误。

物理量由一种单位换算成另一种单位时，其数值也跟着改变，换算时需用换算因数。所谓换算因数就是两种单位大小的比值。例如，因为 $1\text{ m}=100\text{ cm}$ ，故由 $\text{m}$ 换算成 $\text{cm}$ 的换算因数就是 $\text{m}/\text{cm}=100/1=100$ ，这样把长度从若干 $\text{m}$ 换算成 $\text{cm}$ 就应该把这个长度乘以 $\text{cm}/\text{m}$ 。

化工常用单位的换算因数可以从附录中查到。比较复杂的单位换算因数无表可查时，可以把复杂单位分解成若干简单的单位，逐个换算。下面通过几个例题来说明换算方法和步骤。

**例题 1**  $4\text{ }^\circ\text{C}$ 时水的密度用物理单位制表示是 $1.00\text{ g}/\text{cm}^3$ ，换成以国际单位制和工程单位制表示。

**解：**(1) 先找出各单位的换算关系

因为  $1\text{ m}=100\text{ cm}$ ，  $1\text{ kg}=1000\text{ g}$

$$1\text{ kgf}=1\text{ kg}\times 9.81\text{ m}/\text{s}^2$$

这些关系可以改写成

$$\frac{1\text{ m}}{100\text{ cm}}=1, \quad \frac{1\text{ kg}}{1000\text{ g}}=1, \quad \frac{1\text{ kgf}}{9.81\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2}=1$$

(2) 把密度的单位由 $\text{g}/\text{cm}^3$ 换算成 $\text{kg}/\text{m}^3$ 及 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$

$$1.00\text{ g}/\text{cm}^3 = \frac{\text{g} \cdot \frac{1\text{ kg}}{1000\text{ g}}}{\text{cm}^3 \left(\frac{1\text{ m}}{100\text{ cm}}\right)^3} = 1000\text{ kg}/\text{m}^3 \quad (\text{国际制})$$