

高 等 学 校 教 材



化工原理

(第二版)

王志魁 主编

化学工业出版社

高等学校教材

化工原理

(第二版)

王志魁 主编

化学工业出版社

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/王志魁主编. —2版. —北京:化学工业出版社, 1998.10 (2001.2重印)
高等学校教材
ISBN 7-5025-2118-6

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 19404 号

高等学校教材
化 工 原 理
(第二版)

王志魁 主编
责任编辑:孙世斌
责任校对:蒋 宇
封面设计:田彦文

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话:(010)64982511
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
化学工业出版社印刷厂印刷
三河市前程装订厂装订
开本 787×1092 毫米 1/16 印张 21¹/₄ 字数 523 千字
1998 年 10 月第 2 版 2001 年 2 月北京第 3 次印刷
印 数:17101—25100
ISBN 7-5025-2118-6/G·606
定 价:27.00 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

再 版 前 言

本书依据各类高等院校少学时《化工原理》课程的教学需要而编写，自 1987 年问世至今已十年有余。众多院校教学实践证明，教材章节体系、内容多少、深浅程度等，尚能满足教学需要。但由于科学技术的发展，单位制的改革，对教材质量的更高要求等原因，原版的某些内容已不能适应当前教学要求，决定再版修订。

修订的原则仍以少学时《化工原理》课程教学需要为准，保留原有章节体系；全面采用法定计量单位，物性数据图表的单位也相应改动；某些物理量名称改用新名称；离心泵、换热器等设备规格采用新标准。为使基本概念与理论的表达更为严密、易懂，某些章节重新进行改写；为了理论联系工程实际，提高应用理论解决工程实际问题的能力，某些章节增补了适量例题、习题。

本书第一版由王志魁主编，参加编写人员有林义英、李云倩和崔应宁，主审莫锡荣。

本版参加修订人员有北京化工大学王志魁、李云倩和崔应宁；并由莫锡荣进行了审阅。

本书自第一版发行以来，许多读者提出了不少有益意见，在此表示感谢。

由于编者学识水平所限，虽经努力，仍不免有错误和不足之处，恳请读者批评指正。

编者

1998 年 2 月

第一版序

本教材是根据化学工业部教育司，关于增编高等院校少学时《化工原理》教材的要求而编写的。

1982年以来，北京化工学院根据本院某些专业的特点，以精选内容、突出重点、理论联系实际、便于教学为原则，自编了一套教学学时少（简称少学时）的《化工原理》教材，在本院已使用几届，并曾为十余所兄弟院校有关专业选用。本教材即在此基础上并按化工部教育司的要求作了适当修改而成。

1984年11月化学工业部教育司为本教材（少学时《化工原理》）召开了评审会，参加会议的有北京工业学院、吉林化工学院、沈阳化工学院、大连工学院、天津大学、河北化工学院、青岛化工学院、华东化工学院、武汉化工学院、四川轻化工学院、广西工学院、北京化工学院等十二所院校的代表；浙江大学、南京化工学院和华南工学院提出了书面意见。会议认为教材的编写目的明确，并具有一定的教学实践基础，适用于少学时《化工原理》课程的教学需要，有一定的适应面和实际意义；考虑到教材的适用范围，并提出增加沉降与过滤的内容。会后根据所确定的编写原则和代表们提出的具体意见作了适当修改和增删。

本教材可供大学本科80~120学时《化工原理》课程的教学选用，如：“高分子材料”、“橡胶工程与塑料工程”、“高分子材料加工机械”、“腐蚀与防护”、“化工生产过程自动化”、“化学工业管理工程”、“化工工业分析”等专业。本教材包括流体流动、流体输送机械、传热、吸收、蒸馏、干燥、沉降与过滤等章，删除了一般“化工原理”教材中的蒸发、萃取和流态化等内容。编写时注意了加强基础、理论联系实际和以工程观点和经济观点分析问题；力求保持其系统性和完整性。

编写过程中，许多兄弟院校从事《化工原理》课程教学的同志，提供意见、介绍资料；北京化工学院各级领导和传递工程教研室的同志们，在工作上给予各种协助和支持，在此一并表示感谢。由于水平有限，经验不足，缺点错误在所难免，欢迎批评指正。

编者

1985年7月

内 容 提 要

本书介绍了主要化工单元操作的基本原理、计算方法及典型设备。全书分七章，内容包括绪论、流体流动、流体输送机械、沉降与过滤、传热、吸收、蒸馏、干燥等章。在流体流动、传热和吸收三章中，分别介绍了流体力学、传热学及传质学的基础知识。每章都编入适量的例题和习题。

本书重视基本概念和基础理论的阐述，注意理论联系实际和用工程观点分析问题，适当介绍本学科领域的新进展；力求由浅入深，突出重点，主次分明，便于自学；全面采用法定计量单位，设备规格采用最新标准。供作高等院校少学时（80~120学时）《化工原理》课程的教材和中等专业学校各类职业学校教学参考，亦可为科研、设计和生产部门的科技人员参考用书。

目 录

绪论	1
一、化工过程与单元操作	1
二、《化工原理》课程的性质与任务	2
三、物理量的单位与量纲	3
四、混合物浓度的表示方法	5
五、单元操作中常用的基本概念	8
第一章 流体流动	11
第一节 概述	11
第二节 流体静力学基本方程式	11
1-1 流体的压力	11
1-2 流体的密度与比容	12
1-3 流体静力学基本方程式	14
1-4 流体静力学基本方程式的应用	15
第三节 管内流体流动的基本方程式	18
1-5 流量与流速	18
1-6 稳定流动与不稳定流动	20
1-7 连续性方程式	20
1-8 柏努利方程式	21
1-9 实际流体机械能衡算式	23
第四节 管内流体流动现象	25
1-10 粘度	25
1-11 流体流动类型与雷诺准数	27
1-12 流体在圆管内的速度分布	29
第五节 流体流动的阻力	33
1-13 管、管件及阀门	33
1-14 流体在直管中的流动阻力	34
1-15 层流的摩擦阻力	35
1-16 湍流的摩擦阻力	35
1-17 非圆形管内的流动阻力	38
1-18 局部阻力	40
1-19 流体在管内流动的总阻力损失计算	41
第六节 管路计算	42
1-20 简单管路	43
1-21 复杂管路	47
第七节 流量的测定	49

1-22 测速管	49
1-23 孔板流量计	50
1-24 转子流量计	54
1-25 湿式气体流量计	55
习题	55
重要符号说明	60
第二章 流体输送机械	62
第一节 概述	62
第二节 离心泵	62
2-1 离心泵的工作原理	62
2-2 离心泵的主要部件	63
2-3 离心泵的主要性能参数	64
2-4 离心泵的特性曲线	66
2-5 离心泵的工作点与流量调节	67
2-6 离心泵的汽蚀现象与安装高度	71
2-7 离心泵的类型与选用	73
第三节 其他类型化工用泵	75
2-8 往复泵	75
2-9 齿轮泵	77
2-10 旋涡泵	78
第四节 气体输送机械	78
2-11 离心式通风机	78
2-12 鼓风机和压缩机	81
2-13 真空泵	84
习题	85
重要符号说明	87
第三章 沉降与过滤	88
第一节 概述	88
3-1 非均相物系的分离	88
3-2 颗粒与流体相对运动时所受的阻力	88
第二节 重力沉降	89
3-3 沉降速度	89
3-4 降尘室	91
3-5 悬浮液的沉聚	93
第三节 离心沉降	94
3-6 离心分离因数	94
3-7 离心沉降速度	94
3-8 旋风分离器	95
3-9 旋液分离器	97
3-10 沉降式离心机	98

第四节 过滤	100
3-11 悬浮液的过滤	100
3-12 过滤速率基本方程式	102
3-13 恒压过滤	103
3-14 过滤设备	105
习题	110
重要符号说明	110
第四章 传热	112
第一节 概述	112
4-1 传热过程在化工生产中的应用	112
4-2 热量传递的基本方式	112
4-3 两流体通过间壁换热与传热速率方程式	113
第二节 热传导	114
4-4 傅立叶定律	114
4-5 导热系数	115
4-6 平壁的稳态热传导	117
4-7 圆筒壁的稳态热传导	119
第三节 对流传热	121
4-8 对流传热方程与对流传热系数	122
4-9 影响对流传热系数的因素	123
4-10 对流传热中的量纲分析	124
4-11 流体无相变时对流传热系数的经验关联式	125
4-12 流体有相变时的对流传热	129
4-13 选用对流传热系数关联式的注意事项	134
第四节 传热计算	134
4-14 热量衡算	134
4-15 传热平均温度差	135
4-16 总传热系数	140
4-17 壁温计算	143
4-18 传热计算示例	144
第五节 热辐射	148
4-19 基本概念	148
4-20 物体的辐射能力与斯蒂芬-波尔兹曼定律	149
4-21 克希霍夫定律	150
4-22 两固体间的相互辐射	151
4-23 设备热损失的计算	153
第六节 换热器	154
4-24 换热器的分类	154
4-25 间壁式换热器	155
4-26 列管式换热器选用计算中有关问题	160

4-27	系列标准换热器的选用步骤	163
4-28	加热介质与冷却介质	165
4-29	传热过程的强化	166
	习题	167
	重要符号说明	170
第五章	吸收	172
第一节	概述	172
第二节	气液相平衡	174
5-1	气体在液体中的溶解度	174
5-2	亨利定律	175
5-3	相平衡与吸收过程的关系	178
第三节	吸收过程的速率	179
5-4	分子扩散与费克定律	179
5-5	等摩尔逆向扩散	180
5-6	组分 A 通过静止组分 B 的扩散	181
5-7	分子扩散系数	183
5-8	单相内的对流传质	185
5-9	两相传质的双膜理论	186
5-10	总传质速率方程式	187
5-11	传质速率方程式的各种表示形式	189
第四节	吸收塔的计算	191
5-12	物料衡算与操作线方程	192
5-13	吸收剂的用量与最小液气比	193
5-14	填料层高度的计算	196
5-15	吸收塔操作计算	202
5-16	解吸塔的计算	203
第五节	填料塔	205
5-17	填料塔的结构及填料特性	205
5-18	填料塔内气液两相流动特性	208
5-19	塔径的计算	210
5-20	填料塔的附件	212
	习题	213
	重要符号说明	215
第六章	蒸馏	217
第一节	概述	217
第二节	双组分溶液的汽液相平衡	217
6-1	溶液的蒸气压及拉乌尔定律	217
6-2	温度-组成图 (t - y - x 图)	218
6-3	汽-液相平衡图 (y - x 图)	220
6-4	双组分非理想溶液	220

6-5 挥发度及相对挥发度	222
第三节 蒸馏与精馏原理	223
6-6 简单蒸馏与平衡蒸馏	223
6-7 精馏原理	224
第四节 双组分连续精馏塔的计算	228
6-8 全塔物料衡算	228
6-9 理论板的概念与恒摩尔流的假定	229
6-10 操作线方程式	230
6-11 理论板数的确定	232
6-12 进料热状态的影响和 q 线方程	234
6-13 回流比的影响与选择	242
6-14 理论板数的简捷计算	247
6-15 双组分精馏的操作计算	249
6-16 精馏装置的热量衡算	250
第五节 间歇蒸馏	253
6-17 馏出液组成维持恒定的操作	253
6-18 回流比维持恒定的操作	254
第六节 恒沸精馏与萃取精馏	255
6-19 恒沸精馏	255
6-20 萃取精馏	256
第七节 板式塔	257
6-21 塔板结构	257
6-22 塔板的流体力学状况	258
6-23 塔板效率	260
6-24 塔高的确定	262
6-25 塔径的计算	262
6-26 塔板负荷性能图	265
6-27 塔板型式	265
习题	267
重要符号说明	271
第七章 干燥	273
第一节 概述	273
7-1 固体物料的去湿方法	273
7-2 湿物料的干燥方法	273
7-3 对流干燥过程的传热与传质	274
第二节 湿空气的性质及湿度图	274
7-4 湿空气的性质	274
7-5 湿空气的湿度图及其应用	279
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	282
7-6 干燥过程的物料衡算	282

7-7 干燥过程的热量衡算	284
第四节 物料的平衡含水量与干燥速率	287
7-8 物料的干燥实验曲线	287
7-9 物料的平衡含水量曲线	288
7-10 恒定干燥条件下的干燥速率与干燥时间	289
第五节 干燥设备	292
7-11 常用对流干燥器简介	292
7-12 干燥器的选用	296
习题	297
重要符号说明	298
附录	300
1. 单位换算系数	300
2. 基本物理常数	300
3. 饱和水的物理性质	301
4. 水在不同温度下的粘度	302
5. 某些有机液体的相对密度 (液体密度与 4°C 水的密度之比)	303
6. 某些液体的物理性质	304
7. 饱和水蒸气表 (按温度排列)	305
8. 饱和水蒸气表 (按压力排列)	306
9. 干空气的热物理性质 ($p=1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$)	308
10. 液体饱和蒸气压 p_s 的 Antoine (安托因) 常数	308
11. 液体粘度共线图	309
12. 气体粘度共线图 (101.325kPa)	311
13. 固体材料的导热系数	312
14. 某些液体的导热系数	313
15. 气体导热系数共线图	314
16. 液体比热容共线图	316
17. 气体比热容共线图 (101.325kPa)	318
18. 液体比汽化热共线图	320
19. 液体表面张力共线图	321
20. 管子规格	323
21. IS 型单级单吸离心泵规格 (摘录)	323
22. 热交换器系列标准 (摘录)	325
主要参考资料	327

绪 论

一、化工过程与单元操作

化学工业是将自然界的各种物质，经过化学反应和物理方法处理，制造成生产资料和生活资料的工业。一种产品的生产过程中，从原料到成品，往往需要几个或几十个加工过程。其中除了化学反应过程外，还有大量的物理加工过程，统称为化工过程。

化学工业产品种类繁多。各种产品的生产过程中，使用着各种各样的物理加工过程。根据它们的操作原理，可以归纳为应用较广的数个基本操作过程，如流体输送、搅拌、沉降、过滤、热交换、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、萃取、吸附以及干燥等。例如，乙醇、乙烯及石油等生产过程中，都采用蒸馏操作分离液体混合物，所以蒸馏为一基本操作过程。又如合成氨、硝酸及硫酸等生产过程中，都采用吸收操作分离气体混合物，所以吸收也是一个基本操作过程。又如尿素、聚氯乙烯及染料等生产过程中，都采用干燥操作以除去固体中的水分，所以干燥也是一个基本操作过程。此外流体输送和热交换也为基本操作过程，应用更为广泛。这些基本操作过程称为单元操作 (*unit operation*)。任何一种化工产品的生产过程，都是由若干单元操作及化学反应过程组合而成的。化学反应在反应器内进行；各个单元操作，也都在相应的设备 (*apparatus*) 中进行。例如，蒸馏操作是在蒸馏塔内进行的，吸收操作是在吸收塔内，干燥操作是在干燥器内，如图 0-1 所示。不同的单元操作设备其结构有很大不同，为相应的单元操作过程提供必要的条件，使过程能有效地进行。在过程进行中，需要进行操作控制，根据规定的操作指标，调节物料的进、出口流量，以及内部的温度、压力、浓度及流动状态等，使过程能以适当的速率进行，得到所规定流量的合格产品或中间产品。单元操作不仅用在化工生产中，而且在石油、冶金、轻工、制药及原子能等工业及生物工程、环境保护工程中也广泛应用。

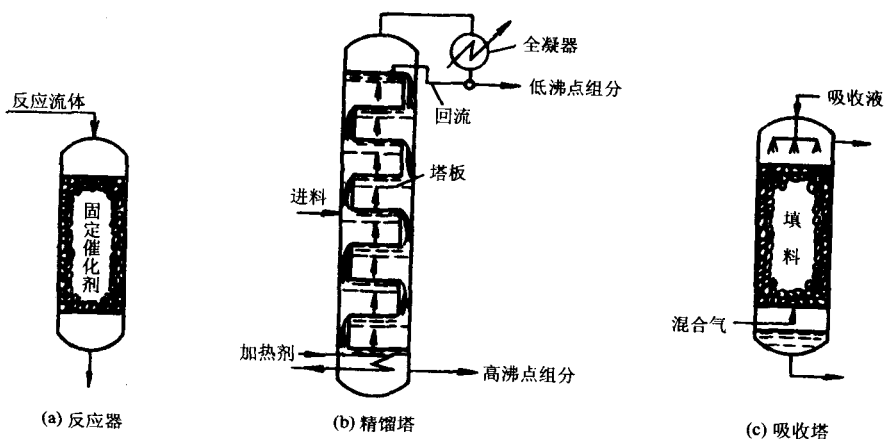


图 0-1 反应器与单元操作设备举例

单元操作按其理论基础可分为下列三类：

- (1) 流体流动过程 (*fluid flow process*) 包括流体输送、搅拌、沉降、过滤等。
- (2) 传热过程 (热量传递过程) (*heat transfer process*) 包括热交换、蒸发等。

(3) 传质过程(质量传递过程)(*mass transfer process*)包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥、结晶、膜分离等。

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,动量从速度大处向动量小处传递,这称为动量传递。所以流体流动过程也称为动量传递过程(*momentum transfer process*)。

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,有热量从高温处向低温处传递,质量传递是因物质在流体内部存在浓度差,物质将从浓度高处向浓度低处传递。在流体中的这三种传递现象(*transport phenomena*),都是由于流体质点(或分子)的随机运动所产生的。若流体内部有温度差存在,当有动量传递的同时必有热量传递;同理,若流体内部有浓度差存在时,也会同时有质量传递。若没有动量传递,则热量传递和质量传递主要是因分子的随机运动产生的现象,其传递速率较缓慢。要想增大传递速率,需要对流体施加外功,使它流动起来。

由上述可知流体流动的基本原理,不仅是流体输送、搅拌、沉降及过滤的理论基础,也是传热与传质过程中各单元操作的理论基础,因为这些单元操作中的流体都处于流动状态。传热的基本原理,不仅是热交换和蒸发的理论基础,也是传质过程中某些单元操作(例如干燥)的理论基础。因为干燥操作中,不仅有质量传递而且有热量传递。因此,流体力学、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

人们会注意到上述的单元操作,有许多是用来分离混合物。沉降与过滤用于非均相物系的分离,包括含尘或含雾的气体、含固体颗粒的悬浮液、由两种不互溶液体组成的乳浊液等。蒸发用于分离由挥发性溶剂和不挥发的溶质组成的溶液。吸收是利用各组分在液体溶剂中的溶解度不同分离气体混合物。蒸馏是利用各组分的挥发度不同,分离均相液体混合物。萃取是利用各组分在液体萃取剂中的溶解度不同,分离液体混合物。吸附是利用气体或液体中各组分对固体吸附剂表面分子结合力的不同,使其中一种或几种组分进行吸附分离。干燥是对湿固体物料加热,使所含水分汽化而得到干固体产品的操作。结晶是利用冷却或溶剂汽化的方法,使溶液达到过饱和而析出晶体的操作。膜分离用于分离液体或气体混合物。

上述分离单元操作中,通常把沉降与过滤归属机械分离操作,而其余归属传质分离操作。

二、《化工原理》课程的性质与任务

为学习化工单元操作而编写的教材,在我国习惯上称之为《化工原理》(*Principles of Chemical Engineering*)。

《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,它在《数学》、《物理》、《化学》、《物理化学》等基础课与专业课之间,起着承先启后的作用,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单元操作中各种工程实际问题的能力,为专业课学习和今后的工作打下较坚实的基础。

从上面介绍可知,单元操作种类很多,每种都有十分丰富的内容,在有限学时内,只有以三种传递现象的基本原理为主线,选择几种典型的单元操作学习,以物料衡算、能量衡算、平衡关系、传递速率、经济核算等五种基本概念(在绪论第五节介绍)为理论依据,掌握单元操作通用的学习方法和分析问题的思路,培养理论联系实际的观点方法,提高单元操作设备的设计计算、操作、选型、实验研究方法与技能,增加解决工程实际问题的能力。

三、物理量的单位与量纲

1. 国际单位制与法定计量单位

由于科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益频繁,以及理科与工科的关系进一步密切,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 (Système International d'Unités 的缩写)。国际单位制的单位是由基本单位、包括辅助单位在内的具有专门名称的导出单位构成的,分别列于表 0-1 和表 0-2。国际单位制中用于构成十进倍数和分数单位的词头,列于表 0-3。

表 0-1 SI 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 0-2 包括 SI 辅助单位在内的具有专门名称的 SI 导出单位 (只列出本书常用的单位)

量的名称	单位名称	单位符号	用 SI 基本单位和 SI 导出单位表示
[平面]角	弧度	rad	rad = m/m = 1
立体角	球面度	sr	sr = m ² /m ² = 1
频率	赫[兹]	Hz	Hz = s ⁻¹
力	牛顿	N	N = kg · m/s ²
压力,压强,应力	帕[斯卡]	Pa	Pa = N/m ² = kg/(m · s ²)
能量,功,热	焦[耳]	J	J = N · m = kg · m ² /s ²
功率,辐射通量	瓦[特]	W	W = J/s = kg · m ² /s ³
摄氏温度 ^①	摄氏度	°C	

① 摄氏温度是按式 $t = (T - 273.15)$ 定义的,式中 t 为摄氏温度, T 为热力学温度。摄氏温度间隔 $t_1 - t_2$ 或温度差 Δt 以及热力学温度间隔 $T_1 - T_2$ 或温度差 ΔT ,单位既可用 K 也可用 °C。

表 0-3 用于构成十进倍数和分数单位的词头 (只列出本书常用的词头)

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
	英文	中文			英文	中文	
10 ⁶	mega	兆	M	10 ⁻¹	deci	分	d
10 ³	kilo	千	k	10 ⁻²	centi	厘	c
10 ²	hecto	百	h	10 ⁻³	mili	毫	m
10 ¹	deca	十	da	10 ⁻⁶	micro	微	μ

1984 年我国开始颁布实行法定计量单位。法定计量单位是以国际单位制的单位为基础,根据我国情况,适当增加了一些其他单位构成的,可与国际单位并用的我国法定计量单位,列于表 0-4。本书全面采用法定计量单位,但读者在查阅物理、化学基础数据以及化学工程参考书时,可能遇到非法定计量单位,需要进行换算,在附录 1 中列出了化学、化工常见的非法定计量单位与法定计量单位的换算系数。

2. 量纲

物理量的基本量纲(dimension)为其本身。SI 量制中,长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量、发光强度 7 个基本量的量纲符号分别为 L、M、T、I、Θ、N、J。

导出量 Q 的量纲,其一般表达式为

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta} \quad (0-1)$$

式中 dim 为量纲符号,指数 α 、 β 、 γ 、... 称为量纲指数。

例如,密度 ρ 的量纲写为 $\dim \rho = ML^{-3}$

量纲表达式中所有量纲指数均为零的量,称为量纲为1的量,表示为

$$\dim Q = L^0 M^0 T^0 \dots = 1$$

量纲为1的量,其单位名称是一,符号为1。

例如,液体的相对密度 d 为该液体的密度 ρ 与 4°C 时纯水的密度 ρ_* 之比值,其量纲为

$$\dim d = \text{ML}^{-3} / \text{ML}^{-3} = \text{M}^0 \text{L}^0 = 1$$

过去把量纲指数均为零的量,称为无量纲量。

表 0-4 可与国际单位制的单位并用的我国法定计量单位 (只列出本书常用的单位)

量的名称	单位名称	单位符号	换算关系和说明
时间	分	min	1min=60s
	[小]时	h	1h=60min=3600s
	日,(天)	d	1d=24h=86400s
[平面]角	度	°	1°= (π/180) rad
	[角]分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
	[角]秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
体积	升	L; l	1L=1dm³=10⁻³m³
旋转角度	转每分	r/min	1r/min= (1/60) s⁻¹
质量	吨	t	1t=10³kg
	原子质量单位	u	1u≈1.660540×10⁻²⁷kg

3. 量纲一致性方程

物理量方程是某一客观现象有关的各物理量之间关系的表达式。任何一个物理量方程,只要理论上合理,则该方程等号两边各项的量纲必定相等,称为**量纲一致性方程** (dimensionally homogeneous equation)。

例如,理想气体状态方程式 $pV=nRT$ (0-2)

理想气体是指分子本身没有体积,分子间没有作用力的气体,它在任何温度和压力下,均能服从气体状态方程式。低压下的实际气体的行为接近于理想气体,因此常用理想气体状态方程式对低压气体进行计算。

气体压力 p $\dim p = \text{ML}^{-1}\text{T}^{-2}$; 气体体积 V $\dim V = \text{L}^3$
因此,式(0-2)等号左边的量纲为 ML^2T^{-2} 。

气体的物质的量 n $\dim n = \text{N}$; 热力学温度 T $\dim T = \Theta$,为了保证方程的量纲一致性,摩尔气体常数 R 的量纲应为 $\dim R = \text{ML}^2\text{T}^{-2}\text{N}^{-1}\Theta^{-1}$ 。

化学工程中的流体流动、传热和传质等过程中,由于影响因素较多,在不能推导出理论关联式时,通常用量纲分析法通过工程实验建立经验关联式。物理方程的量纲一致性是量纲分析法的基础,具体内容将在第一章流体流动和第四章传热中介绍。

4. 物理方程的单位一致性

任何物理量的大小,都要用数值和单位表示。例如,同一压力,其单位不同,则数值也不同。1kPa=10³Pa,即压力的单位用Pa和kPa,其数值相差10³倍。

因此,在用物理方程式进行计算时,必须注意式中各项的单位一致性。例如,理想气体状态方程式 $pV=nRT$,若将式中气体压力 p 或气体的物质的量 n 的单位改变,则摩尔气体常数 R 的数值和单位应作相应改变,以保持方程式各项单位的一致性,如下所示。

p	V	n	T	R
①Pa	m^3	mol	K	$8.314 \text{ Pa} \cdot m^3/(\text{mol} \cdot K) = J/(\text{mol} \cdot K)$
②kPa	m^3	kmol	K	$8.314 \text{ kPa} \cdot m^3/(\text{kmol} \cdot K) = kJ/(\text{kmol} \cdot K)$
③kPa	m^3	mol	K	$8.314 \times 10^{-3} \text{ kPa} \cdot m^3/(\text{mol} \cdot K) = kJ/(\text{mol} \cdot K)$
④Pa	m^3	kmol	K	$8314 \text{ Pa} \cdot m^3/(\text{kmol} \cdot K) = J/(\text{kmol} \cdot K)$

本书采用第②项列出的单位。

5. 实验方程式的单位换算

实验方程式等号两边各项的单位往往不一致。目前有些实验方程式中的物理量单位不是法定计量单位，其换算方法举例说明如下。

例如，液体蒸汽压的 Antoine 方程为

$$\lg p'_s = A' - B/(t+C) \quad (a)$$

式中 A' 、 B 、 C ——Antoine 常数，与物质种类有关，可由手册中查得；

t ——温度， $^{\circ}\text{C}$ ；

p'_s ——液体的蒸气压，mmHg。

试将蒸气压 p'_s 的单位由 mmHg 改为 kPa，单位换算为 kPa 时的蒸气压符号用 p_s 表示。已知 $1\text{kPa} = 7.50061\text{mmHg}$ ，则有 $7.50061p_s = p'_s$ ，代入式 (0-2a)，得

$$\lg(7.50061p_s) = A' - B/(t+C)$$

$$\lg p_s = A' - 0.87510 - B/(t+C)$$

$$\text{令} \quad A = A' - 0.87510 \quad (b)$$

$$\text{得} \quad \lg p_s = A - B/(t+C) \quad (c)$$

由上述单位换算可知，只要把计算 p'_s/mmHg 用的常数 A' 值，按式 (0-2b) 换算为常数 A 值，代入式 (0-2c) 即可求出 p_s/kPa 。附录 10 列出了某些液体的 Antoine 常数 A 、 B 及 C 的值。

四、混合物浓度的表示方法

化工生产中所处理的物料，常常不是单一组分，而是由若干组分所构成的混合物。混合物中，各组分的浓度（或组成）有多种表示方法，下面介绍常用的几种。

1. 物质的量浓度与物质的量分数

(1) 物质的量浓度

物质的量浓度 (*amount concentration*)，其定义是组分 i 的物质的量 n_i 除以混合物的体积 V ，以符号 c_i 表示，即

$$c_i = n_i/V \quad (0-3)$$

物质的量浓度又简称为**物质的浓度**（过去称为摩尔浓度），单位为 kmol/m^3 。

(2) 物质的量分数（摩尔分数）

物质的量分数 (*amount fraction*) 又称为**摩尔分数** (*mole fraction*)，其定义是组分 i 的物质的量 n_i 与混合物的物质的量 n 之比值。对于**液体混合物**，以 x_i 表示，即

$$x_i = n_i/n \quad (0-4)$$

式中 n ——混合物中各组分物质的量之总和，即

$$n = n_1 + n_2 + \dots = \sum n_i \quad (0-5)$$

显然，混合物中各组分的摩尔分数之和等于 1，即

$$x_1 + x_2 + \dots = \sum x_i = 1 \quad (0-6)$$

2. 物质的质量浓度与物质的质量分数