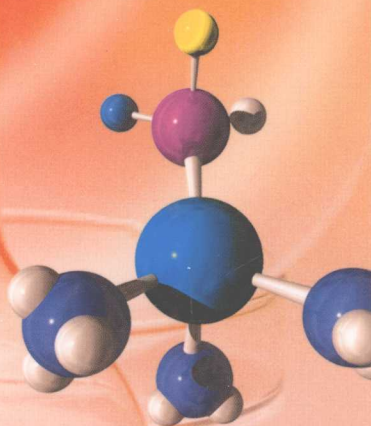
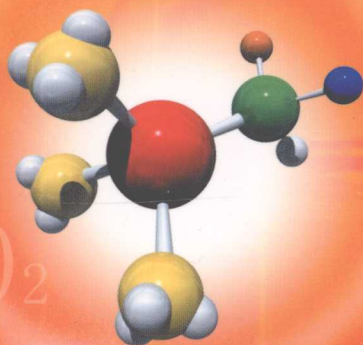


化学工程基础

主 编 王维周
副主编 王家荣



浙江科学技术出版社

世纪高等教育精品大系

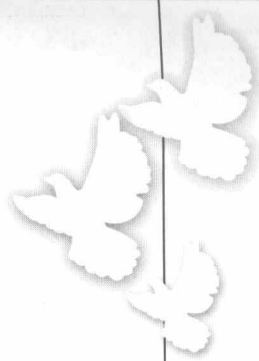
浙江省高等教育重点教材

化学工程基础

主 编 王维周
副主编 王家荣

浙江科学技术出版社

世纪高等教育精品大系



图书在版编目 (CIP) 数据

化学工程基础/王维周主编. —杭州: 浙江科学技术出版社, 2005. 8

(世纪高等教育精品大系)

ISBN 7-5341-2706-8

I. 化... II. 王... III. 化学工程-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 081002 号

丛 书 名	世纪高等教育精品大系
书 名	化学工程基础
主 编	王维周
副 主 编	王家荣
出版发行	浙江科学技术出版社
联系电话	(0571) 85161296
印 刷	杭州长命印刷有限公司
开 本	787×1092 1/16
印 张	25.75
字 数	637 000
版 次	2005 年 8 月第 1 版
印 次	2005 年 8 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-5341-2706-8
定 价	45.00 元
责任编辑	余春亚
封面设计	孙 菁

前 言

《化学工程基础》是高等院校化工类系科必修的专业基础课程,讲授内容包括化工单元操作的基本理论、计算方法和典型设备的结构与选用,先后有“化工原理”、“化工过程与设备”及“化工单元操作”等课程名称。虽然我国已经有不少优秀的各具特点的本课程教科书,但是大都是本科教材,往往理论偏多且篇幅较大,与专科及高职教学不甚适应。随着我国高等职业教育的不断发展与规模的不断扩大,很有必要编写一本与专科教学相适应的教材。

本教材是遵照浙江省高等教育重点教材建设计划而编写的,力图做到深入浅出,结合实际,突出化工单元操作工程观点和建立初步的技术经济观念与规范意识,启发学生学习单元操作与工程问题,使之掌握基本理论和基本方法,培养学生分析问题和解决问题的能力,以适应生产第一线应用型人才培养的需要。因此,在本教材编写中,我们也刻意将多年教学实践积累融入其中。

本教材由集体研究合作编写,王维周编写第1章、第2章、第10章,王家荣编写第7章,朱瑞芬编写第5章、第8章和第9章,张亚静编写第3章、第4章和第6章,俞小勇参与编写部分章节,邬宁昆编写附录并绘制与修改插图。本教材编写过程中得到了兄弟院校很多教授和专家的帮助,高浩其教授对编写过程给予了全面的指导,杨泽慧博士等教研室同事提出了很多具体而详细的意见和建议,我们在此表示衷心的感谢。

本教材适用于作为化工、石油、生物化工、轻工与环境工程类专业的化工原理课程教材或教学参考书。各院校在使用中可以根据实际需要对本书的章节进行选择取舍与增删。

由于学识有限,加之经验不足,书中肯定存在诸多不足,真诚地希望大家对本书提出批评与宝贵意见,以便不断修订、完善。

编 者
2005年8月

目 录

绪 论	1
0.1 本课程的内容和任务	1
0.2 本课程的思想方法和几个基本概念	2
0.3 单位与单位换算	3
0.3.1 国际单位制 (SI 单位制)	3
0.3.2 工程单位制与英制单位	3
0.3.3 物理量的单位换算	4
0.4 因次与经验公式的换算	4
0.4.1 因次与因次式	4
0.4.2 经验公式的换算	5
习 题	6
第 1 章 流体流动	7
1.1 流体静力学	7
1.1.1 流体密度与比容	7
1.1.2 流体静压强	8
1.1.3 流体静力学基本方程式及其应用	9
1.2 流体在管道内的流动	15
1.2.1 流量与流速	15
1.2.2 稳定流动的连续性方程式	17
1.2.3 流动系统中的能量关系——柏努利方程式	18
1.3 流体在管内流动时的摩擦阻力和能量消耗	25
1.3.1 牛顿粘性定律与流体的粘度	25
1.3.2 流动类型与雷诺准数	28
1.3.3 对流型的形象理解	30
1.3.4 流体在圆形管内流动时的摩擦阻力	31
1.3.5 非圆形管内的流体摩擦阻力	35
1.3.6 管路局部阻力	37
1.4 管路系统的计算	40
1.4.1 管路系统中的总流动阻力	40
1.4.2 管路系统的计算	40
1.5 流量的测量	47
1.5.1 测速管	47
1.5.2 孔板流量计	49

1.5.3 文丘里流量计	53
1.5.4 转子流量计	53
习 题	54
第2章 流体输送机械	57
2.1 概 述	57
2.1.1 流体输送机械的功能	57
2.1.2 压头和风头的概念	58
2.2 离心泵	59
2.2.1 离心泵的工作原理和主要部件	59
2.2.2 离心泵的性能参数与特性曲线	61
2.2.3 离心泵的气蚀现象与安装高度	66
2.2.4 离心泵的工作点与流量调节	69
2.2.5 离心泵的类型与选用	72
2.3 其他类型化工用泵	75
2.3.1 往复泵	75
2.3.2 旋转泵	77
2.3.3 旋涡泵	79
2.4 气体输送机械	79
2.4.1 离心式通风机	80
2.4.2 离心式鼓风机和压缩机	82
2.4.3 旋转鼓风机和压缩机	83
2.4.4 往复压缩机	84
2.4.5 真空喷射泵	89
习 题	90
第3章 沉降与过滤	92
3.1 概 述	92
3.2 沉降过程	92
3.2.1 重力沉降	92
3.2.2 离心沉降	98
3.3 过 滤	103
3.3.1 过滤操作原理	103
3.3.2 过滤基本方程式	105
3.3.3 恒压过滤	107
3.3.4 过滤常数的测定	108
3.3.5 过滤设备	108
3.3.6 滤饼的洗涤	111
3.3.7 过滤机的生产能力	112
习 题	114

第4章 传 热	116
4.1 概 述	116
4.2 热传导	117
4.2.1 热传导与傅立叶定律	117
4.2.2 导热系数	118
4.2.3 热传导的计算	118
4.3 对流传热	122
4.3.1 对流传热与牛顿冷却定律	122
4.3.2 对流传热系数	122
4.4 辐射传热	132
4.4.1 热辐射与克希霍夫定律	132
4.4.2 两固体间的辐射传热	134
4.5 传热过程的计算	136
4.5.1 热量衡算	136
4.5.2 总传热速率方程	137
4.5.3 总传热系数	138
4.5.4 传热平均温度差	140
4.5.5 总传热速率方程应用举例	143
4.6 换热器	145
4.6.1 间壁式换热器	145
4.6.2 列管式换热器的设计和选用	149
习 题	152
第5章 蒸 发	155
5.1 概 述	155
5.1.1 蒸发及其技术特点	155
5.1.2 蒸发操作的分类	156
5.2 蒸发流程及计算	157
5.2.1 单效蒸发	157
5.2.2 多效蒸发	165
5.3 蒸发设备及选用	170
5.3.1 蒸发设备	170
5.3.2 蒸发器的选择	175
5.3.3 蒸发器的工艺设计及主要结构尺寸	176
5.3.4 蒸发装置的附属设备	180
习 题	183
第6章 蒸 馏	185
6.1 概 述	185
6.2 两组分溶液的汽液平衡	185
6.2.1 平衡物系的自由度	185

6.2.2 汽液平衡关联式	186
6.2.3 两组分理想溶液的汽液平衡相图	189
6.2.4 非理想溶液的汽液平衡要点	190
6.3 蒸馏方式	191
6.3.1 平衡蒸馏与简单蒸馏	191
6.3.2 精 馏	191
6.4 两组分连续精馏的计算	193
6.4.1 理论板及恒摩尔流假定	193
6.4.2 全塔物料衡算	193
6.4.3 精馏段物料衡算及其操作线方程	194
6.4.4 提馏段物料衡算及其操作线方程	195
6.4.5 进料热状态的影响	196
6.4.6 理论塔板数的计算	199
6.4.7 回流比的选择	202
6.4.8 理论板数的简捷算法	204
6.4.9 板效率与实际板数	205
6.4.10 塔高与塔径	207
6.4.11 精馏装置的热量衡算	207
6.5 间歇精馏	208
6.5.1 间歇精馏两种典型的操作方式	209
6.5.2 间歇精馏的特点	209
6.6 恒沸精馏和萃取精馏	209
6.6.1 恒沸精馏	209
6.6.2 萃取蒸馏	210
6.7 板式塔	211
6.7.1 塔板结构与气液接触状态	211
6.7.2 不正常操作现象与操作负荷性能图	212
6.7.3 板式塔简要计算	214
习 题	218
第7章 吸 收	221
7.1 概 述	221
7.1.1 有关气体吸收的几个概念	221
7.1.2 吸收操作的分类	222
7.1.3 吸收剂的选择	222
7.2 气液相平衡	223
7.2.1 气体在液体中的溶解度	223
7.2.2 亨利定律	224
7.2.3 相平衡与吸收过程的关系	226
7.3 传质机理与吸收速率	227

7.3.1	分子扩散和费克定律	227
7.3.2	吸收速率方程	227
7.3.3	吸收中的双膜理论	228
7.3.4	传质速率方程	229
7.4	吸收塔的计算	230
7.4.1	吸收塔的物料衡算	231
7.4.2	吸收剂用量的确定	232
7.4.3	塔径的计算	233
7.4.4	低浓度气体吸收过程填料层高度的计算	234
7.4.5	理论塔板数的计算	242
7.5	解吸塔的计算	242
7.6	吸收过程的实验研究与操作	243
7.6.1	吸收系数的测定与经验公式	244
7.6.2	吸收操作概要	245
7.7	填料塔	246
7.7.1	填料塔的结构与操作	246
7.7.2	常用填料的种类和特性	246
7.7.3	气液两相逆流通过填料层的流动状况	248
7.7.4	填料塔直径的计算	250
7.7.5	填料塔的主要附件	252
习 题		254
第 8 章	液-液萃取	256
8.1	概 述	256
8.2	液-液萃取过程	257
8.2.1	萃取操作的基本原理	257
8.2.2	液-液相平衡关系	257
8.3	萃取过程的计算	265
8.3.1	单级萃取过程的计算	265
8.3.2	多级错流萃取过程的计算	268
8.3.3	多级逆流萃取的计算	271
8.3.4	完全不互溶物系萃取过程的计算	274
8.4	液-液萃取设备	277
8.4.1	混合澄清器	277
8.4.2	萃取塔	278
8.4.3	离心式萃取器	281
8.4.4	萃取设备的选择	282
习 题		282
第 9 章	干 燥	285
9.1	概 述	285

9.1.1 固体物料去湿方法	285
9.1.2 干燥过程	285
9.1.3 对流干燥	285
9.2 干燥过程的基本原理	286
9.2.1 湿空气的性质	286
9.2.2 湿空气的 $H-I$ 图 (湿焓图)	290
9.2.3 湿空气 $H-I$ 图的应用	292
9.3 干燥过程的物料衡算和热量衡算	293
9.3.1 干燥过程原理流程与空气干燥器的操作过程	293
9.3.2 干燥过程的物料衡算和热量衡算	293
9.4 干燥速度和干燥时间	299
9.4.1 固体物料的干燥机理	299
9.4.2 干燥速度	299
9.4.3 干燥时间的计算	301
9.5 干燥器	303
9.5.1 厢式干燥器	303
9.5.2 带式干燥器	304
9.5.3 气流干燥器	304
9.5.4 喷雾干燥器	305
9.5.5 流化床干燥器 (沸腾床干燥器)	306
习 题	306
第 10 章 化学反应工程学概要	308
10.1 概 述	308
10.1.1 化学反应器的作用	308
10.1.2 化学反应工程学的研究领域和方法	308
10.2 基本反应器	309
10.2.1 化学反应器的类型	309
10.2.2 几种典型的基本反应器	310
10.3 反应器的流动模型	313
10.3.1 全混流模型	313
10.3.2 平推流模型	313
10.3.3 多釜串联流动模型	314
10.3.4 轴向扩散流动模型	314
10.4 均相反应器的计算	315
10.4.1 间歇操作的搅拌反应器	315
10.4.2 连续操作的管式反应器	318
10.4.3 连续操作的搅拌釜	319
10.4.4 多釜串联搅拌釜	320
10.4.5 均相反应器的优化	324

10.5 停留时间分布和流动模型	326
10.5.1 物料返混与停留时间分布	326
10.5.2 停留时间分布的实验测定方法	330
10.5.3 理想反应器中的停留时间分布	334
10.5.4 停留时间分布在均相非理想反应器中的运用	337
10.6 扩散模型	339
10.6.1 模型形态	339
10.6.2 柏克莱准数与扩散模型参数	341
10.7 气固相催化反应器	343
10.7.1 固定床催化反应器	343
10.7.2 流化床催化反应器	353
习 题	355
附 录	358
一、常用单位的换算	358
二、某些气体的重要物理性质	360
三、某些液体的重要物理性质	361
四、某些固体的重要物理性质	362
五、干空气的物理性质 ($101.33 \times 10^3 \text{Pa}$)	362
六、水的物理性质	363
七、水在不同温度下的饱和蒸汽压与粘度 ($-20 \sim 100^\circ\text{C}$)	364
八、饱和水蒸气表 (按温度顺序排)	367
九、饱和水蒸气表 (按 kPa 顺序排)	368
十、某些液体的导热系数 (如附图 1 所示)	369
十一、某些气体和蒸汽的导热系数	370
十二、某些固体材料的导热系数	372
十三、液体的粘度和密度	372
十四、 101.33kPa 下气体的粘度	377
十五、液体的比热容	379
十六、 101.33kPa 下气体的比热容	380
十七、汽化热	381
十八、液体的表面张力	383
十九、壁面污垢热阻 (污垢系数) ($\text{m}^2 \cdot \text{K/W}$)	385
二十、管壳式换热器总传热系数 K_0 的推荐值	386
二十一、管子规格	387
二十二、泵规格 (摘录)	388
二十三、472-11 型离心通风机规格 (摘录)	391
二十四、列管式换热器系列标准 (摘录)	392
参考答案	394
主要参考文献	398

绪 论

0.1 本课程的内容和任务

《化学工程》是研究化学工业中物料变化过程的工程技术学科，不仅包括化学变化，而且包括大量的物理性质和物料状态的改变。生产中的化学反应，对于每一个生产过程来说虽然是特定的，但是都遵循宏观过程的化学反应规律，其中包括工程因素的影响。物理过程，如物料的分离或混合，提纯与调制，压缩与破碎，传热与冷冻，干燥与增湿等，虽然在工艺过程（流程线）中千变万化，但都是由具有共同特征的操作所组成。根据操作原理，将化工生产中通用性的物理加工过程归纳出来，总结为单元操作。这些单元操作，按照工厂的技术装备和操作技能与管理水平，基本上决定了产品的品质和企业生产效益，所以倍受技术科学界和管理科学界的重视。

从 20 世纪 30 年代起，化学工程成为一门学科，迅速发展，先后有“化工原理”、“化工过程与装备”、“化工单元操作”等名称，有数量巨大的研究成果和专门著述，密切地与实践相结合。随着控制技术的发展，过程优化也成为化学工程学科的一个分支。60 年代以后，研究工业装置中化学反应的化学反应工程成为化学工程中的独立学科。

按照目前的学科发展和技术特点，化工单元操作大致存在在以下 6 个过程中：

(1) 流体动力过程。研究流体物料的流动，以及与固体物料之间的相对运动的基本规律，其操作包括流体输送、沉降、流态化等。

(2) 传热过程。研究热量传递基本规律，如传热、蒸发等单元操作。

(3) 传质过程。研究界面间物质的转移规律，包含蒸馏与吸收等单元操作。

(4) 热质传递过程。研究传热与传质同时进行与共同作用的过程，如干燥、结晶、增湿等。有的将它们按各自的具体特点分属于传热或传质过程。

(5) 热力过程。研究以热力学为基础的过程，如气体压缩、制冷等。

(6) 机械过程。研究以机械力学主导的操作过程，如破碎、分级等单元操作。

化学工程和单元操作的成果和技术，除化学工业以外，在石油、轻工、医药、食品、环保、电力等工业部门和很多专业领域都得到了广泛的应用。因此，所有的化工专业系科都把化学工程课程作为核心性技术基础课程列入教学计划。本课程的主要任务是介绍单元操作的基本原理，典型过程的分析与计算，典型设备的基本结构与操作特点，主要设备的选型和应用。教学中，注意培养学生分析问题和解决问题的思想方法和基本能力，同时注重初步建立技术经济观念，即从技术的可行性与可靠性出发，结合经济合理性分析问题，打好学习专业课的基础，而且使学生在毕业后从事专业工作时，有良好的起始能力和发展前提条件。

0.2 本课程的思想方法和几个基本概念

本学科的研究方法,基本思路是选择过程典型的物理对象,确定一个既典型又合理简化的“物理模型”,进行基本的数学描述,然后通过逻辑推求得到研究对象的“基本方程”;在此基础上,建立数学模型,推得数学基本公式,并开展科学实验(实验室级别和工业规模的放大实验),以大量的实际数据归纳整理成应用方程式、经验方程式和半经验方程式,不断地修正和总结提高,用于指导工业实践;根据工业实际,结合单元操作的基本理论,设计与改进化工设备,并在实践中不断完善和取得技术进步。因此,在学习研究单元操作的时候,一定要将物理模型和工业实际联系起来,通过观看实物模型、参观与实习,彻底明了基本方程式及其意义,将公式的推求和应用相结合,和设备结构与性能相联系,以得到良好的效果。

一些基本概念,是与思想方法紧密联系的,是理解问题和分析问题的出发点、思路,同时有方法与工作程序意义。现在按照基本含义与要点予以说明。

1. 过程平衡

过程平衡是过程发展的极限,是动态的、正速度与逆速度数值相等时的状态(或程度),在理论上是无穷长时间后才能得到的结果。有的平衡既容易理解,也容易得到平衡数值,如化学平衡与平衡转化率,可以求算或查表而获得;静态热传导的最终平衡就是温度相等。但是,在实际单元操作中的平衡,既是动态的,也是有条件的。平衡值与对象的实际状况相关,必须与实验结合才能得到。例如,物料在干燥中的平衡水分,相对流动中的气体溶解程度等。因此,对待单元操作中的平衡,需要在平衡概念上建立动态性和条件性的思想。

2. 过程速率

速率或称速度,表达过程的快慢。众所周知,距离平衡越远,速度就越大。速率与过程推动力和阻力直接相关,它们的关系是

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

3. 物料衡算

衡算也叫清算,按照质量守恒定律进行。进入过程设备中的量与离开的量,在质量上总是相等的;因此,可以由物料衡算求取未知量,为工艺设计或过程平衡提供基础数据,为查找工厂实际问题和完善工艺提出对策方向。物料衡算中,划定衡算范围,确定计算基准是重要的前提,而且必须使用统一的单位制。毋庸置疑,过程中守恒的量不是过程前后的摩尔量。

4. 能量衡算

能量衡算是能量守恒定律的应用。过程中,所提供的能量、消耗的能量、贮存的能量、带出的能量在数量上总是相关的,只能是能量类型的变化,在机械能、热能、化学能(以及相变的能量)等之间转化,不会消失,不能无理地增加。由于物质是能量的载体,所以,能量衡算一定是在物料衡算的基础上进行的。能量衡算不仅可以检验物料衡算在逻辑

上的正确性,而且可以为工艺设计、选择设备、设备设计提供依据;同时还能够检查生产过程的操作失误,发现工艺控制的漏洞。自然,确定衡算基准,使用一致的单位同样是必须的。化学工业中的能量衡算主要是热量衡算和机械功的确定。

5. 技术经济观念

这是一条基本原则,就是在面临判断和选择的时候,一定要使技术上先进可靠,经济上合理可行。如果是对同一单元操作或设备设计,有多项方案或多个参数可供选择,就必须确定一个在投资上节省,而且在操作费用上相对较低的方案。这既是技术上的基本思想方法,也是技术工作者的基本素养。

0.3 单位与单位换算

按照执行国家法定单位制的规定和与国际技术交流的需要,本课程采用国际单位制(SI单位制)。同时,考虑到技术发展的历程和技术资料实际,对工程单位制和英制单位在必要的时候作一定说明,在附录中收录有它们的换算表。

0.3.1 国际单位制(SI单位制)

表 0-1 中的单位是 SI 单位制的 7 个基本单位。其余两个辅助单位是平面角的弧度 rad 和立体角的单位球面度 sr。

表 0-1 SI 单位制的基本单位

量的名称	长 度	质 量	时 间	热力学温度	物质的量	电 流	发光强度
单位名称	米	千 克	秒	凯尔文	摩 尔	安 培	坎德拉
单位符号	m	kg	s	K	mol	A	cd

化学工业中常见的导出单位列在表 0-2 中。

表 0-2 化学工程中常见的具有专门名称的导出单位

量的名称	频 率	力、重量	压强、应力	能、功、热	功 率	温 度
导出单位	s^{-1}	$kg \cdot m/s^2$	N/m^2	$N \cdot m$	J/s	—
单位名称	赫 兹	牛 顿	帕斯卡	焦 耳	瓦 特	摄氏度
单位符号	Hz	N	Pa	J	W	$^{\circ}C$

SI 单位制中规定的基本词头用于数字的书写和转换,词头表示与原单位的倍数。使用时注意字母的大小写。工程中常用的有: M (兆), 10^6 ; k (千), 10^3 ; c (厘), 10^{-2} ; m (毫), 10^{-3} ; μ (微), 10^{-6} 等。如 $1MPa=1000kPa=10^6Pa$; $1m=100cm=10^{-3}km$ 等。

0.3.2 工程单位制与英制单位

工程单位制的文献大量存在,而且还有一定的实用性和使用场合。它不以质量为基本单位量,而是以重力为选定的基本量。将 SI 单位制中的 1kg 质量在 $9.80665m/s^2$ 标准重力加速度作用下所受到的重力定为 1kgf (千克力),是基本单位。因此,工程单位制与 SI 制联系的基本关系是

$$1\text{kgf}=1\text{kg}\times 9.80665\text{m/s}^2=9.80665\text{N}$$

英制单位也称英单位制,是英美国家和英联邦国家普遍使用的单位制,我国供排水和部分行业还有应用的残留。其长度为英尺,质量单位为磅,磅力为重力单位。与 SI 单位以及工程单位制的基本关系是

$$1\text{ft}(\text{英尺})=12\text{in}(\text{英寸})=0.3048\text{m}$$

$$2.20462\text{lb}(\text{磅})=1\text{kg}$$

$$2.20462\text{lb}(\text{磅力})=1\text{kgf}$$

英制单位中的热量单位是英热单位(Btu 或写作 B.t.u),与千卡及焦耳的关系为

$$1\text{kCal}(\text{千卡})=1000\text{Cal}(\text{卡})=3.968\text{Btu}(\text{英热单位})=4187\text{J}(\text{焦耳})$$

英制的温度单位是华氏度 $^{\circ}\text{F}$, $^{\circ}\text{C}=(^{\circ}\text{F}-32)\times\frac{5}{9}$,与摄氏度的温度差为 $1\Delta^{\circ}\text{C}=\frac{9}{5}^{\circ}\text{F}$ 。

0.3.3 物理量的单位换算

因为文献、工程以及与对外交流中的需要,经常需要进行单位换算。将一个物理量在新单位制中的表达值与在原单位制中的表达值相比,其比值称为从原单位换算为新单位的“换算因素”。各种换算因素已经收入附录中,可供查找使用。得知换算因素以后,可以根据换算因素的定义,进行换算,即“原单位物理量 $\times$ 换算因素=新单位物理量”。

【例 0-1】求英制压强单位 1lb/in^2 (磅力/英寸²) 是多少 Pa?

解: (1) 查附录得

$$1\text{lb/in}^2=6894.8\text{Pa}$$

(2) 计算。因为 $1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$, $1\text{kgf}=2.205\text{lbf}=9.80665\text{N}$, 将 lbf 换算为 N 的换算因素为 $[\frac{9.80665\text{N}}{2.20462\text{lbf}}]$; 依据 $1\text{ft}(\text{英尺})=12\text{in}(\text{英寸})=0.3048\text{m}$, 将 in 换算为 m 的换算因素是 $[\frac{0.3048\text{m}}{12\text{in}}]$ 。所以

$$1\text{lbf/in} = 1 \frac{\text{lbf} \times (\frac{9.80665\text{N}}{2.20462\text{lbf}})}{[\text{in} \times (\frac{0.3048\text{m}}{12\text{in}})]^2} = 6694.8\text{N/m}^2 = 6694.8\text{Pa}$$

0.4 因次与经验公式的换算

0.4.1 因次与因次式

因次也称量纲。如果用符号 M , L , T 与 θ 分别代表质量、长度、时间与温度等的基本量,那么将符号连同它们的指数称为物理量的因次。如加速度的因次是 $[LT^{-2}]$, 能量的因次是 $[ML^2T^{-2}]$ 等。所推导出来的复杂因次,称为复合因次式,因次式,或者称为量纲式。

因次式反映物理量与基本量之间的关系,在使用同样基本量的单位制的时候,物理量不会因具体单位而发生变化。所有严格推导的化学工程公式,两边的因次必然是相同的,

最终的物理意义也是符合逻辑的。当然,对有些物理量,追求对因次的解释是没有意义的,也未必会解释得很清楚。因此,用因次分析的方法能够判定方程式的正误,可以帮助推导物理量间的关系,能简化实验与选择实验途径。

0.4.2 经验公式的换算

化学工程文献中,有大量的用非 SI 单位制表述的公式或经验公式,很有价值。为了使用这类公式,需要以 SI 单位制表达与换算其中的各个物理量间的单位的关系。公式换算中需要使用统一的、所要求的单位制,更换该公式在新单位制下的常数或系数,而不能影响公式的使用范围以及其结果的正确性和准确性。

公式换算不是物理意义的更改,只是一种常数与系数的变换。不论使用哪一种单位制,其中每一个物理量的表达仍然都是“数值×单位”(或数值·单位),所以,在换算中只要“真实而准确地代换原物理量”,然后整理数据,归纳新的常数与系数,就会得到满意的结果。举例说明如下:

【例 0-2】板式吸收塔溢流堰堰上液流高度的计算公式为

$$h = 0.48 \left(\frac{V}{L} \right)^{2/3}$$

式中 h ——液流高度, in;

V ——通过溢流堰的液体流量, gal/min (美加仑/分钟);

L ——溢流堰长度, in。

要求转换为以 SI 单位制表达的公式。

解:(1) 公式判断。公式的左端,因次为 L ; 右端为 $[L^2 T^{-1}]^{2/3}$, 所以,该式为经验公式,不是严格推导出来的,转换单位制以后公式需要变换。

(2) 公式变换。用加“'”的形式书写和更换原物理量。

公式的左端是高度 h , 为

$$h \cdot \text{in} = h' \cdot \text{m} \cdot \left(\frac{12 \text{in}}{0.3048 \text{m}} \right) = h' \cdot 39.37 \text{in}$$

改写为

$$h = 39.37 h' \quad (\text{a})$$

同样,参数 V 为

$$V \cdot \text{gal/min} = V' \cdot \frac{\text{m}^3 \left(\frac{264.2 \text{gal}}{1 \text{m}^3} \right)}{\text{s} \cdot \left(\frac{1 \text{min}}{60 \text{s}} \right)} = V' \cdot 15852 \text{gal/min}$$

得到

$$V = 15852 V' \quad (\text{b})$$

以及

$$L \cdot \text{in} = L' \cdot \text{m} \cdot \frac{12 \text{in}}{0.3048 \text{m}} = L' \cdot 39.37 \text{in}$$

$$L = 39.37 L' \quad (\text{c})$$

将 (a) (b) (c) 三式代入原经验公式 $39.37 h' = 0.48 \left(\frac{15852 V'}{39.37 L'} \right)^{2/3}$, 整理后得到新公式

$$h' = 0.665 \left(\frac{V'}{L'} \right)^{2/3}$$

习 题

0-1 从基本单位间的相应关系出发，作下列物理量的单位换算，并与附录相对照：

(1) 热能 $1\text{kW} \cdot \text{h} = \underline{\hspace{2cm}} \text{kCal}$;

(2) 比热容 $1\text{Btu}/(1\text{b} \cdot ^\circ\text{F}) = \underline{\hspace{2cm}} \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

0-2 按大量的管理统计，制药厂灌装消毒间消毒液的消耗量为

$$Q = 1.4N^{0.6} + 0.05M$$

式中 Q ——消毒液的消耗量， ft^3/h ;

N ——灌装瓶量， d （打 dozen，12 只为一打）；

M ——工具与人员所消耗的消毒液折算量，以生产人员数目代表，人。

今安排每天配置一次消毒液，并将生产量按装箱数（每箱 36 瓶）计算，试将上式改换为按每天计量的消毒液需要量（ m^3 ）的公式。

0-3 某液态烃的饱和蒸汽压为

$$\ln P = 8.25 - \frac{15.6}{t + 232}$$

式中 P ——饱和蒸汽压， mmHg ;

t ——温度， $^\circ\text{C}$ 。

试用 Pa 和热力学温度 K 改换上述方程式。