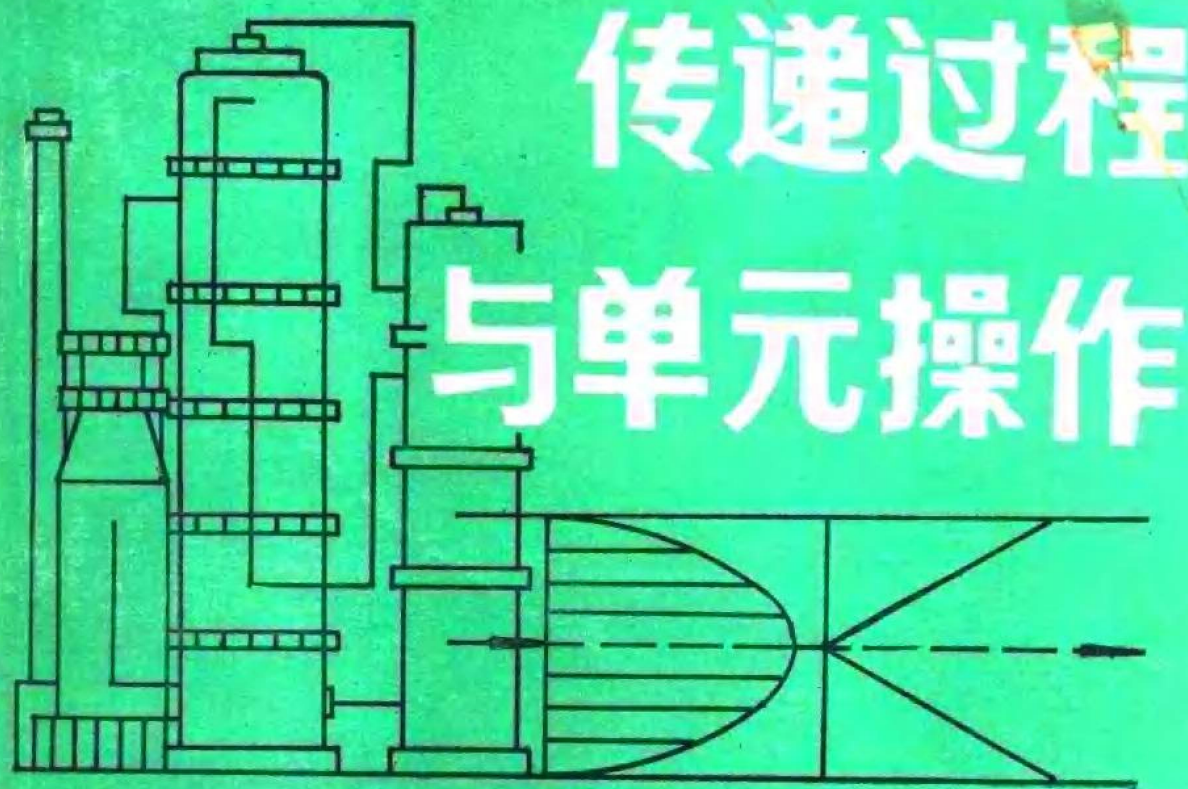




TRANSPORT PROCESSES

[美] J 金克普利斯 著
清华大学化工传递组 译
清华大学出版社

传递过程与单元操作

〔美〕 J. 金克普利斯 著

清华大学化学与化学工程系传递组 译

清华大学出版社

内 容 简 介

本书讲述传递过程原理和单元操作。前五章为第一部分，介绍动量、热量和质量传递过程原理；后六章为第二部分，介绍单元操作，包括蒸发、干燥、气-液分离过程（增湿和吸收）、汽-液分离过程（精馏）、液-液和液-固分离过程（萃取、浸取、结晶），以及机械-物理分离过程（过滤、沉淀、离心分离、粉碎）。

本书可作为化工、石油、冶金、轻工、食品加工、环境工程，以及生物工程等大专学生的教科书或教学参考书，也可作为有关专业的研究生、科研人员及工程技术人员的参考书。

传递过程与单元操作

（美）J.金克普利斯 著

清华大学化学与化学工程系传递组 译

☆

清华大学出版社 出版

北京 清华园

人民交通出版社印刷厂 排版

河北省固安县印刷厂 印装

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

☆

开本：787×1092 1/16 印张：33.5 字数：852千字

1985年9月第1版

1985年9月第1次印刷

印数：0001~7000

统一书号：15235·160

定价：6.40元

译者的话

随着化学工艺技术,以及计算技术和计算工具的发展,化学工程学科已由研究单元操作过程发展到研究单元操作基础理论,探讨单元操作间共性的阶段。从本世纪五十年代开始,化学工程学科即已形成以“传递过程”和“反应工程”为中心的学科。国外各高等院校先后开设了“传递过程”或“传递现象”的课程作为化学工程专业学生的必修课,以及石油、冶金、轻工、食品、环境工程、生物工程专业的公共课程。

目前,我国各主要高等院校的化学工程专业,除讲授“单元操作”外,“传递过程”也已在大部分院校的大学生或研究生中开始讲授,因此需要一本对动量传递、热量传递、质量传递过程与单元操作的应用加以统一论述的教科书。

本书就有这样的特点。它首先介绍传递或传递过程原理,然后介绍单元操作。本书前五章为第一部分,介绍动量、热量和质量传递过程;后六章为第二部分,介绍单元操作,包括蒸发、干燥、气(汽)-液分离过程、液-液和液-固分离过程,以及机械物理分离过程。它既把传递过程的基本原理与单元操作结合起来统一论述,又保持了各自的独立性。因此,本书既可作为学习传递过程和单元操作的教科书,又可作为单独学习传递原理或某些单元操作的教科书或教学参考书。

本书另一特点是它所涉及的面比较广,包括生物物料与食品的加工过程。因此除了化工类专业作为教材用外,也可供轻工、食品、生物化工等专业参考。

为了更好的普及及推广SI单位制,除第一章及个别特殊情况外,原书中凡是用SI及英制两种单位制表示的地方,翻译时均将英制单位系统去掉,某些单独使用英制表示的习题、例题,也已改成SI制。原书中的选学章节,均用“*”号标出。

本书是由张克(第五章)、刘谦(第三、四章)顾惠君(第六章)、林爱光(第二章)、李敬(第一、七章)、刘裕品(第八、九章)、陈翠仙(第十章)、张立平(第十一章)等同志翻译。张克同志进行了全书的统一整理和初校,蒋维钧同志最后审校定稿。

本书在翻译过程中,承蒙汪家鼎教授、苏健民副教授的关心和帮助,在此谨致敬意。

限于译者水平,译文中难免有错误及不妥之处,衷心欢迎批评指正。

译者 1983.6

目 录

绪论	1
第一部分 动量、热量和质量传递过程的基本原理	3
第一章 工程原理和单位制介绍	3
1.1 单元操作和传递过程分类, 基本单位制	3
1.2 温度和组成的表示法	7
1.3 气体定律和蒸汽压	9
1.4 质量守恒和物料衡算	12
1.5 能量与热量的单位	17
1.6 能量守恒和能量衡算	22
1.7 数学解法和图解法	26
第二章 动量传递原理	37
2.1 引言	37
2.2 流体静力学	37
2.3 流体的粘度	40
2.4 质量、能量和动量衡算	43
2.5 圆管中层流和湍流的经验方程	59
*2.6 可压缩气体的流动	69
*2.7 流体流量的测量	70
*2.8 泵和气体输送机械	74
*2.9 流体的搅拌和混合及其需用功率	80
*2.10 非牛顿型流体	84
*2.11 连续性微分方程和动量传递微分方程	89
*2.12 边界层流动和湍流	99
*2.13 动量传递的因次分析	105
第三章 稳态传热原理	117
3.1 引言和传热机理	117
3.2 导热	120
3.3 通过多层固体的导热	123
3.4 流体中的强制对流传热	129
3.5 自然对流传热	140
3.6 沸腾和冷凝	142
3.7 辐射传热	147
3.8 换热器	150
*3.9 辐射	153
*3.10 非牛顿型流体的传热	158
*3.11 某些特殊情况下的传热系数	160
*3.12 传热中的因次分析	164
第四章 非稳态传热原理	175

4.1	基本方程的导出	175
4.2	系统内部热阻可忽略的简单情况	176
4.3	各种几何形状物体中的非稳态导热	177
*4.4	食物和生物物料的激冷和冷冻	187
*4.5	非稳态导热的有限差分数值解法	191
*4.6	能量传递微分方程	196
*4.7	边界层流动和传热	201
*4.8	生物物料的非稳态传热过程和消毒	204
第五章	质量传递原理	217
5.1	质量传递和扩散过程简介	217
5.2	气体中的分子扩散	220
5.3	液相中的分子扩散	228
5.4	在生物溶液和凝胶中的分子扩散	233
5.5	固相内的分子扩散	237
5.6	非稳态质量传递	241
5.7	对流传质	246
*5.8	悬浮物发酵介质的传质	255
*5.9	分子扩散加对流扩散和化学反应	256
*5.10	气体在多孔固体和毛细管中的扩散	262
*5.11	非稳态分子扩散的数值算法	266
第二部分	单元操作	283
第六章	蒸发	283
6.1	前言	283
6.2	蒸发设备的类型和操作方法	284
6.3	蒸发器中的总传热系数	287
6.4	单效蒸发器的计算方法	288
*6.5	多效蒸发器计算方法	292
*6.6	蒸发设备的冷凝器	298
*6.7	生物物料的蒸发	299
第七章	物料的干燥过程	303
7.1	引言和干燥方法	303
7.2	干燥设备	303
7.3	水的蒸汽压和湿度	306
7.4	物质的平衡含水量	311
7.5	干燥速率曲线	313
7.6	恒速干燥阶段的计算方法	317
7.7	降速干燥阶段的计算方法	320
*7.8	恒速干燥阶段对流、辐射、与导热的综合考虑	322
*7.9	降速阶段依靠扩散与毛细管流动的干燥	324
*7.10	各种类型干燥器的计算式	328
*7.11	生物物质的冷冻干燥	335
第八章	分级和连续的气-液分离过程	344
8.1	分离过程和分离方法的类型	344

8.2	相平衡关系	345
8.3	单级平衡接触和多级平衡接触	346
8.4	相间的质量传递	351
8.5	连续增湿过程	357
8.6	板式塔吸收和填料塔吸收	362
*8.7	高浓度气体混合物在填料塔中的吸收	374
*8.8	填料塔传质系数的估算	378
第九章	汽-液分离过程	386
9.1	汽-液平衡关系	386
9.2	汽-液体系的单级平衡接触	387
9.3	简单蒸馏方法	388
9.4	有回流的蒸馏和McCabe-Thiele方法	392
9.5	蒸馏和吸收的板效率	403
*9.6	焓-浓度法求精馏塔的理论板数	405
第十章	分级的和连续的液-液、液-固分离过程	417
10.1	单级液-液萃取过程	417
10.2	液-液萃取设备	421
10.3	多级连续逆流萃取	422
10.4	液-固浸取概述和设备	426
10.5	平衡关系和单级萃取	431
10.6	多级逆流浸取	433
10.7	概述和结晶设备	436
10.8	结晶的理论	441
第十一章	机械-物料的分离过程	449
11.1	前言和机械-物理分离过程的分类	449
11.2	固-液体系的过滤分离	450
11.3	固-液体系的沉降分离	459
11.4	离心分离过程	467
11.5	机械粉碎	474
附录		
附录A.1	基本常数和换算因子	483
附录A.2	水的物理性质	487
附录A.3	无机化合物和有机化合物的物理性质	496
附录A.4	食品和生物制品的物理性质	511
附录A.5	钢管、热交换器和筛子的规格	513
符号说明		516

绪 论

化学工程领域主要涉及有机物和无机物原料,以及某些生物物料的物理变化与物理化学变化。近年来,它的范围已扩展到其它的一些加工工程,包括陶瓷、冶金、农产品加工、环境卫生或废水处理、生物工程等。所有这些领域的加工过程中,都应用动量传递、热量传递、质量传递原理以及单元操作。

过去,对大多数工程技术人员都讲授动量传递(即流体流动)原理与热量传递原理,一般只有化学工程人员才学习质量传递原理。然而,在最近一个时期,其它领域的工程技术人员对气体、液体和固体的质量传递也开始感兴趣了。

由于化学工程专业的学生当今必须学习很多的课程,因此,对动量传递(流体动力学)、热量和质量传递过程以及单元操作的应用作更统一的介绍是很有必要的。本书首先介绍传递或传递过程原理,然后介绍单元操作。为此,本书分为两大部分。

第一部分:动量、热量和质量传递过程的基本原理。

这一部分讨论基本原理,包括如下几章:1.工程原理和单位介绍;2.动量传递原理;3.稳态热量传递原理;4.非稳态热量传递原理;5.质量传递原理。

第二部分:单元操作。

这一部分是应用篇,包括如下的单元操作:6.蒸发;7.物料干燥;8.分级的和连续的气-液分离过程(增湿、吸收);9.汽-液分离过程(蒸馏);10.分级的和连续的液-液与液-固分离过程(萃取、浸出、结晶);11.机械-物理分离过程(过滤、沉淀、离心分离、粉碎)。

第一章,是为读者复习一些基本的工程原理、数学方法和图解法、化学和物理定律、质量衡算和热量衡算而写的。许多人,尤其是化学工程技术人员,可能对这些原理与方法中的大部分都是很熟悉的,因而可以全部或部分地删去这一章。

本书中主要讨论生物物料加工的一些章节,读者和教师可自行斟酌,决定取舍。这些章节是节2.10、节3.10、节4.4、节4.8、节5.4、节5.8、节6.7和节7.11。全书各章共有例题或示范习题170多个,课外作业380多个。某些课外作业涉及到生物体系,这是为那些对生物学领域特别感兴趣的读者而设置的。

本书的一个特点是把每一章分成基本章节和随后的选学章节。每一章开头的几节是基本内容,这是为完全掌握各个基本原理所必须的,而选学章节则可根据读者和教师的需要取舍。例如,在第二章中,节2.1到节2.5为基本原理部分,而节2.6到节2.13为选学节(用“*”标出)是专题或对基本原理的深入讨论。例如节2.6可压缩气体的流动和节2.10非牛顿型流体等,通常是不包括在基本原理部分中的。本书的每一章都采用这种编排方法。

本书可以作为学习下述五种教学计划中任何一种的教材。在所有的计划中,第一章均可要可不要。

1.学习动量、热量、质量传递原理和单元操作。

在这一计划中,要学习全书的大部分内容,包括第一部分的传递过程原理和第二部分的单元操作。此外,根据需要,也可以学习不同的选学节。这一计划主要用于化学工程类专

业,也可用于其它工程类专业,作为三、四年级阶段一年的学习课程。

2.学习动量、热量、质量传递原理和部分单元操作。

这一计划只学习第一部分的基本章节(讲述原理的二、三、四、五章),再加上第二部分中为专门目的选择的单元操作章节。这些内容可作为一学期或两个季度的学习课程。环境卫生或废水处理工程、食品加工和冶金工程的学生可以采用这一计划。

3.学习动量、热量和质量传递原理。

这一计划的目的是基本了解动量、热量和质量传递过程,可作为一学期或一季度学习的课程内容。学习内容包括第一部分讲述原理的二、三、四、五章中的基本章节以及某些选学章节,而省略第二部分应用性的单元操作的内容。

4.学习单元操作。

如果读者已学习了动量、热量和质量传递原理方面的课程,可以略去二、三、四、五章,只学习第二部分的单元操作。这可以作为一学期或一季度的课程。化学工程和某些其它工程的学生可以采用这一计划。

5.学习质量传递。

对于已经具备动量和热量传递知识的化工或机械工程的技术人员,或只希望学习传质基础知识的学生,可学习本书的第五与第八章,作为一学期或一季度的课程。第七、九和十章学习与否,取决于读者的需要。

SI(国际单位)单位制已为科技界所接受,改用这种单位制的趋势发展很快。因此,本书的方程式、例题、课外作业均采用SI单位制。然而,本书中一些重要方程的推导,如果用两种单位制有所区别时,仍给出了两种不同的单位制——SI制和英制。对于要求用英制表示的某些例子和课外作业,本书也给出了英制单位。

Christie J. Geankoplis

第 一 部 分

动量、热量和质量传递过程的基本原理

第一章 工程原理和单位制介绍

1.1 单元操作和传递过程分类、基本单位制

1.1A 引言

在化学与其它的物理加工工业中，在食品和生物物料加工工业中，由最初的原料加工成最终的化学与生物制品，有许多类似的过程。我们可以把这些看上去好像不同的物理、化学或生物加工过程，分解成一系列一个个不同的工序，这些工序叫作单元操作。这些单元操作是各种不同的加工工业所共有的。

例如，在酿酒工业中，利用“蒸馏”这个单元操作来提纯或分离乙醇，而在石油工业中则用它来提纯或分离烃类。谷物及其它食品的干燥与木材、过滤得到的沉淀物和人造丝的干燥也是类似的。在发酵过程与污水处理工厂中，由空气中吸收氧气，在石油液体的加氢过程中吸收氢气，都应用称谓“吸收”的单元操作。化学工业中盐溶液的蒸发与食品工业中糖溶液的蒸发是相似的。废水处理与采矿工业中悬浮物的沉淀也是类似的。炼油厂中的液体烃类与牛奶加工厂中的牛奶都是以同样的方式流动的。

单元操作主要涉及能量和质量的传递与变化，它们主要应用物理方法，也应用物理化学方法。

下面介绍本书所包含的一些重要单元操作。这些重要的单元操作可以按照不同的顺序组成一个加工过程。

1.1B 单元操作的分类

1. 流体流动

它讨论流体由一处流动或输送到另一处的规律。

2. 传热

这种单元操作研究热量和能量的累积以及它们从一处传递到另一处的规律。

3. 蒸发

这是热量传递的一种特殊情况，它涉及从含不挥发溶质（例如盐或其它物质）的溶液中蒸发易挥发溶剂（例如水）。

4. 干燥

这种单元操作是从固体物质中除掉易挥发的液体（通常是水）。

5. 蒸馏

这种单元操作是利用各组分蒸汽压的不同,通过沸腾使液体混合物中各个组分分离的一种方法。

6. 吸收

在这种单元操作过程中,通过与液体接触去除气流中的某一组分。

7. 液-液萃取

在这种单元操作中,使液体溶液与另一种几乎不互溶的液体溶剂相接触,以去除溶液中的某一溶质。

8. 液-固浸出

这种单元操作是用液体处理粉碎得很细的固体物料,把其中的溶质溶解并从固体中分离出来。

9. 结晶

这是一种使溶液中的溶质沉淀,从而将溶质分离出来的单元操作过程。从溶液中得到盐就是其中一例。

10. 机械-物理分离

这里指的是使用机械的方法,例如过滤、沉降和粉碎等来分离固体、液体或气体。这些方法常常也列在分离的单元操作中。

上述的许多单元操作,都有某些共同的基本原理与机理。例如在干燥、吸收、蒸馏和结晶等单元操作中,都涉及扩散或传质的机理。在干燥、蒸馏、蒸发等单元操作中,都有传热。因此,常常根据更基本的特性把它们分成下列的传递过程。

1.1C 基本传递过程

1. 动量传递

这一过程是研究在运动的介质中所发生的动量传递。例如在流体流动、沉降和混合等单元操作过程中的动量传递。

2. 热量传递

这一基本过程研究热量由一个地方到另一个地方的传递。在传热、干燥、蒸发、蒸馏以及其它一些单元操作中,存在着这种传递过程。

3. 质量传递

这种传递过程涉及物质由一相转移到另一不同的相。无论在气相、液相还是固相中,其传递机理都是一样的。在蒸馏、吸收、液-液萃取和浸取等单元操作中存在这一传递过程。

1.1D 第一、二部分内容的编排

本书编排为两部分:

第一部分:动量传递、热量传递和质量传递过程的基本原理。从第一到第五章广泛地讨论了这些基本原理,这将为学习单元操作打下基础。

第二部分:单元操作。本书的第二部分将介绍各种单元操作和它们在各个领域的应用。

有一些基本的工程原理、数学方法、物理和化学定律,是学习动量传递、热量传递、质量传递和单元操作原理的基础,写在本章内供读者复习参考。某些技术人员,尤其是化学工程技术人员、农业工程技术人员、土木工程技术人员和化学家是熟悉其中的许多原理和方法

的,可能希望全部或部分地删去这一章。

每一章末尾课外作业的编号是根据相对应的章节号编排的。每一章都分为开头的基本章节和选学节。选学节可以不学,也可以学习其中的部分内容,这根据读者的需要取舍。

1.1E 本书使用的 SI 基本单位制和其它单位制

目前在工程上和科学上使用的有三种主要的基本单位制。首要的是SI单位制(国际单位制)。它有三个基本单位:米(m)、公斤(kg)和秒(s)。此外是英尺(ft)、磅(lb)、秒(s),即fps单位制和厘米(cm)、克(g)、秒(s),即cgs单位制。

目前,正式规定在工程上和科学中只使用SI单位制,但是有时仍然使用较老的英制和cgs单位制。许多物理数据、化学数据和经验方程是用后两种单位给出的。因此,工程技术人员不仅应该精通SI单位制,而且也必须能在某些范围内使用其它两种单位制。

1. SI单位制

SI单位制中使用的基本量如下:长度单位一米(m);时间单位一秒(s);质量单位一公斤(kg);温度单位一开尔文度(K);物质的单位一公斤摩尔(kg mol)。其它标准单位可由这些基本量导出。

力的基本单位是牛顿(N),定义为:

$$1 \text{ 牛顿(N)} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$

功、能或热量的基本单位是牛顿·米,即焦耳J,

$$1 \text{ 焦耳(J)} = 1 \text{ 牛顿} \cdot \text{米(N} \cdot \text{m)} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$$

功率用焦耳/秒,或瓦特(W)来度量,

$$1 \text{ 焦耳/秒(J/s)} = 1 \text{ 瓦特(W)}$$

压力的单位是牛顿/米²或帕斯卡(Pa),

$$1 \text{ 牛顿/米}^2(\text{N/m}^2) = 1 \text{ 帕斯卡(Pa)}$$

大气压(atm)不是压力的标准SI单位,但在目前的过渡时期仍在使用的。

标准重力加速度定义为:

$$1g = 9.80665 \text{ m/s}^2$$

为了表示基本单位的倍数而在其前面所加的一些标准字头如下:京(G) = 10⁹;兆(M) = 10⁶;千(k) = 10³;厘(c) = 10⁻²;毫(m) = 10⁻³;微(μ) = 10⁻⁶;毫微(n) = 10⁻⁹。字头c不是推荐的字头。

SI单位制推荐开尔文度(K)作为度量温度的单位。然而,实际广泛使用的是摄氏温标(°C),它定义为:

$$t^{\circ}\text{C} = T(\text{K}) - 273.15$$

注意,因为1°C = 1 K,所以讨论到温差的情况,有

$$\Delta t^{\circ}\text{C} = \Delta T\text{K}$$

时间的标准推荐单位是秒(s),但是时间单位可以是非十进制的单位分(min)、小时(h)或天(d)。

2. cgs 单位制

cgs单位制与SI单位制的关系如下:

$$1 \text{ 克质量(g)} = 1 \times 10^{-3} \text{ 千克质量(kg)}$$

$$1 \text{ cm} = 1 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$1 \text{ 达因(dyn)} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm/s}^2 = 1 \times 10^{-5} \text{ 牛顿(N)}$$

$$1 \text{ 尔格(erg)} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{cm} = 1 \times 10^{-7} \text{ 焦耳(J)}$$

标准重力加速度是

$$g = 980.665 \text{ cm/s}^2$$

3. 英制 (fps) 单位制

英制与SI单位制的关系如下:

$$1 \text{ 磅质量(lb}_m\text{)} = 0.45359 \text{ kg}$$

$$1 \text{ ft} = 0.30480 \text{ m}$$

$$1 \text{ 磅力(lb}_f\text{)} = 4.4482 \text{ 牛顿(N)}$$

$$1 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f = 1.35582 \text{ 牛顿} \cdot \text{米(N} \cdot \text{m)} \\ = 1.35582 \text{ 焦耳(J)}$$

$$1 \text{ psia} = 6.89476 \times 10^3 \text{ 牛顿/米}^2(\text{N/m}^2)$$

$$1.8^\circ \text{F} = 1 \text{ K} = 1^\circ \text{C}$$

$$g = 32.174 \text{ ft/s}^2$$

牛顿定律的比例因子是

$$g_c = 32.174 \text{ ft} \cdot \text{lb}_m / \text{lb}_f \cdot \text{s}^2$$

在SI单位制和cgs单位制中 $g_c = 1.0$, 可略去。

在附录A·1中, 列出了三种单位制的换算因子。在本书的各节中将进一步讨论这些换算关系及其应用。

本书中的方程式、例题、课外作业使用SI单位制作为主要的单位制。然而, 本书所推导的一些重要方程式, 在两种单位制下形式不同的时候, 分别用两种单位制, SI制和英制给出。某些例题和课外作业, 也使用英制单位。在某些情况下, 例题的中间步骤和答案也使用英制单位。

1.1F 因次一致的方程和单位的一致性

因次一致的方程是指其所有各项具有相同的单位的方程。这些单位可以是基本单位或导出单位(例如 $\text{kg/s}^2 \cdot \text{m}$ 或 Pa)。这种方程可以使用任何一种单位制, 但在整个方程中必须使用该单位制的基本单位与导出单位, 当使用的单位一致时, 不需要单位换算因子。

在使用任何一个方程时, 读者必须小心检验其因次的一致性。为此, 应首先选择单位制(SI、英制等), 然后把单位代入该方程的每一项, 每一项中相同的单位互消。

例1.1-1 检验因次一致性方程的单位

从流体到表面的传热方程是

$$q = hA(T_f - T_w) \quad (1.1-1)$$

式中 q 是传热速率(能量/时间), h 是传热膜系数(能量/时间·面积·温度) A 是表面积, T 是温度。使用SI单位制并检验该方程因次是否一致。

解: 能量以 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$ 为单位, 将SI单位制的基本单位代入式(1.1-1),

$$q \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2}{\text{s}} = h \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}} A(\text{m}^2)(T_f - T_w)(\text{K}) \quad (1.1-2)$$

消去相同的单位, 方程左边的单位和右边的一样, 都是 $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$, 故该方程在因次上是

一致的。如果能量使用导出单位 J，那么方程两边将具有相同的单位 J/s 即 W。W 是更常用的单位。

1.2 温度和组成的表示法

1.2A 温度

在化学工业和生物工业中，通常使用两种温标，华氏温度 ($^{\circ}\text{F}$) 和摄氏温度 ($^{\circ}\text{C}$)。常常需要由其中一个温标换算为另一个温标。二者都使用 1 大气压下水的冰点和沸点作基点。常常将温度表示为绝对温度 K (SI 单位制的标准单位) 和朗肯温度 ($^{\circ}\text{R}$) 而不用 $^{\circ}\text{C}$ 和 $^{\circ}\text{F}$ 。表 1.2-1 列出了四种温标的等价值。

表 1.2-1 温标和等价值

	摄 氏	华 氏	开 尔 文	朗 肯
水的沸点	100 $^{\circ}\text{C}$	212 $^{\circ}\text{F}$	373.15 K	671.7 $^{\circ}\text{R}$
冰的熔点	0 $^{\circ}\text{C}$	32 $^{\circ}\text{F}$	273.15 K	491.7 $^{\circ}\text{R}$
绝对零度	-273.15 $^{\circ}\text{C}$	-459.7 $^{\circ}\text{F}$	0 K	0 $^{\circ}\text{R}$

在 1 atm 下，水的沸点和冰的熔点间相差 100 $^{\circ}\text{C}$ 或 180 $^{\circ}\text{F}$ 。因此，变化 1.8 $^{\circ}\text{F}$ 等于变化 1 $^{\circ}\text{C}$ 。通常，将 -273.15 $^{\circ}\text{C}$ 取整为 -273.2 $^{\circ}\text{C}$ ；-459.7 $^{\circ}\text{F}$ 取整为 -460 $^{\circ}\text{F}$ 。可以使用下列方程将一种温标换算为另一种温标：

$$^{\circ}\text{F} = 32 + 1.8 \times ^{\circ}\text{C} \quad (1.2-1)$$

$$^{\circ}\text{C} = \frac{1}{1.8} \times (^{\circ}\text{F} - 32) \quad (1.2-2)$$

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460 \quad (1.2-3)$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.15 \quad (1.2-4)$$

例 1.2-1 发酵的消毒温度

发酵罐中的介质在 120 $^{\circ}\text{C}$ 时杀菌。该温度是多少 $^{\circ}\text{F}$ ， $^{\circ}\text{R}$ 和 K？

解：使用式 (1.2-1)，

$$^{\circ}\text{F} = 32 + 1.8 \times ^{\circ}\text{C} = 32 + 1.8 \times 120 = 248^{\circ}\text{F}$$

使用式 (1.2-3) 和 (1.2-4) 计算 $^{\circ}\text{R}$ 和 K

$$^{\circ}\text{R} = ^{\circ}\text{F} + 460 = 248 + 460 = 708^{\circ}\text{R}$$

$$\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273.2 = 120 + 273.2 = 393.2\text{K}$$

1.2B 摩尔单位、重量和质量单位

表示气体、液体和固体组成的方法很多，其中摩尔单位用的最多，因为化学反应和气体定律用摩尔单位表示时比较简单。一摩尔纯物质的质量，其数值等于它的分子量。因此，1 kmol CH_4 含有 16.04 kg CH_4 。同样，1.0 lbmol 含有 16.04 lb_m。

某一物质的摩尔分数是该物质的摩尔数被总摩尔数除得的商。同样，质量分数（或重量分数）是该物质的质量被总质量除得的商。这两种组成对气体、液体和固体都适用。对一混

合物中的 A 组分, 可以表示如下:

$$x_A (\text{A 的摩尔分数}) = \frac{\text{A 的摩尔数}}{\text{总的摩尔数}} \quad (1.2-5)$$

$$w_A (\text{A 的质量或重量分数}) = \frac{\text{A 的质量数}}{\text{总质量数}} \quad (1.2-6)$$

例1.2-2 溶液摩尔分数、质量分数或重量分数

一个容器内盛有50g水(B)和50gNaOH(A), 计算NaOH的重量分数和摩尔分数。此外, 计算NaOH(A)和H₂O(B)的 lb_m 数。

解: 取50+50=100g溶液作计算基准, 计算得如下数据:

组 分	g	重 量 分 数	分 子 量	gmol	摩 尔 分 数
H ₂ O (B)	50.0	$\frac{50}{100} = 0.500$	18.02	$\frac{50.0}{18.02} = 2.78$	$\frac{2.78}{4.03} = 0.690$
NaOH (A)	50.0	$\frac{50}{100} = 0.500$	40.0	$\frac{50.0}{40.0} = 1.25$	$\frac{1.25}{4.03} = 0.310$
总 计	100.0	1.00		4.03	1.000

因此, $x_A = 0.310$, $x_B = 0.690$, 所以 $x_A + x_B = 0.310 + 0.690 = 1.000$ 。同样, $w_A + w_B = 0.500 + 0.500 = 1.000$ 。为了计算每一组分的 lb_m 数, 由附录 A.1 查得 换算因子 $1 \text{ lb}_m = 453.6\text{g}$, 所以

$$\text{A 的 lb}_m \text{ 质量} = \frac{50\text{g A}}{453.6\text{g A/lb}_m \text{ A}} = 0.1102 \text{ lb}_m \text{ A}$$

上式中, 分子的 g A 与分母的 g A 互消, 只剩下分子中的 lb_m A。读者要注意记下方程中所有的单位, 并消去分子与分母中同时出现的单位。用类似的方法, 我们可得到 $0.1102 \text{ lb}_m \text{ B}$ (0.0500 kg B)。

通常, 在固体、液体的分析中使用重量或质量分数或百分数, 而在气体分析中则使用摩尔分数或摩尔百分数。

1.2C 液体的浓度单位

通常, 当一种液体和另一种互溶液体混合时, 体积是不可加的。因此, 液体的组成一般不用体积百分数表示, 而用质量百分数或摩尔百分数表示。溶液中组分浓度的另一种方便的表示法是克分子浓度。它定义为每一升溶液中组分的 gmol 数。浓度的其它表示方法是 kg/m^3 , g/l , g/cm^3 , lbmol/ft^3 , lb_m/ft^3 , lb_m/gal 等。溶液的浓度与温度有关, 因此, 必须指明温度。

表示单位体积总浓度的最普通的方法是密度, kg/m^3 , g/cm^3 或 lb_m/ft^3 。例如, 水在 $277.2\text{K}(4^\circ\text{C})$ 时的密度是 1000kg/m^3 或 $62.43\text{lb}_m/\text{ft}^3$ 。有时, 溶液的密度用比重来表示。溶液的比重定义为该溶液在某一温度下的密度与某一参考物质在其所处温度下密度的比值。应用 cgs 制时, 如果参考物质是 277.2K 的水, 那么, 物质的比重和密度在数值上是相等的。

例1.2-3 白蛋白溶液的浓度

2.0% (重量) 的牛血清蛋白 (A) 溶液, 在 $298\text{K}(25^\circ\text{C})$ 的温度下, 其密度 ρ 已测定为 $1.0028\text{g/cm}^3(61)$ 。白蛋白的分子量是 $67000\text{g/gmol}(S1)$ 。试计算:

(a) 该溶液对 277K 水的比重;

(b) 白蛋白 (A) 在该溶液中的摩尔分数;

(c) 密度, 用 lb_m/gal 和 kg/m^3 表示;

(d) 克分子浓度。

解: (a) 277K 时水的密度是 $1.000\text{g}/\text{cm}^3$, 因此

$$\text{比重} = \frac{1.0028\text{g}/\text{cm}^3}{1.000\text{g}/\text{cm}^3} = 1.0028$$

(b) 取 1.00cm^3 作计算的基准

$$A \text{ 的质量} = \frac{2}{100} \times 1.0028 = 0.020056 \text{ g } A$$

$$B \text{ 的质量} = \frac{98}{100} \times 1.0028 = 0.9827 \text{ g } B$$

$$A \text{ 的 g mol 数} = \frac{0.020056}{67000} = 3.00 \times 10^{-7} \text{ g mol } A$$

$$B \text{ 的 g mol 数} = \frac{0.9847}{18.0} = 5.46 \times 10^{-2} \text{ g mol } B$$

$$\text{总 g mol} = 3.00 \times 10^{-7} + 5.46 \times 10^{-2} = 5.46 \times 10^{-2}$$

$$\text{摩尔分数 } x_A = \frac{3.00 \times 10^{-7}}{5.46 \times 10^{-2}} = 5.49 \times 10^{-6}$$

(c) 由附录 A.1 查得由 gal 到 cm^3 的换算因子是 $3785\text{cm}^3/\text{gal}$, 而 lb 质量到 g 质量的换算因子是 $453.6\text{g 质量}/\text{lb 质量}$ 。因此, 密度是

$$\text{lb 质量}/\text{gal} = \frac{(1.0028\text{g 质量}/\text{cm}^3) \times (3785\text{cm}^3/\text{gal})}{453.6\text{g 质量}/\text{lb 质量}}$$

$$= 8.37\text{lb}_m/\text{gal}$$

$$\text{kg 质量}/\text{m}^3 = \frac{(1.0028\text{g 质量}/\text{cm}^3) \times (10^6\text{cm}^3/\text{m}^3)}{1000\text{g 质量}/\text{kg 质量}}$$

$$= 1002.8\text{kg}/\text{m}^3$$

(d) 克分子浓度定义为每升溶液中白蛋白的 g mol 数。这里, 1.00cm^3 溶液含有 $3.00 \times 10^{-7}\text{g mol } A$ 。所以

$$\text{克分子浓度} = (3.00 \times 10^{-7}\text{g mol } A/\text{cm}^3) \times (1000\text{cm}^3/\text{l}) = 3.00 \times 10^{-4}\text{g mol } A/\text{l}$$

在这一节中, 当指定物质的重量时, 我们用磅质量 (lb_m) 和 g 质量, 而不使用 lb 和 g 。这是为了强调在讨论质量单位时, 涉及的是 lb 质量或 g 质量, 而不是磅力 (lb_f) 或 g 力。但是, 在本书的其余章节除专门要区分质量和力的情况外, 我们一般采用简略的形式 lb 或 g , 在英制单位中, 常使用磅力 (lb_f) 单位; 在 cgs 单位制中, 很少使用 g 力的单位。

1.3 气体定律和蒸汽压

1.3A 压力

表示流体或体系所施加的压力的方法有很多种。1 个绝对压力即 1.00atm 等于 0°C 时 760mmHg , 或 29.92inHg , 或 0.760mHg , 或 $14.696\text{lb}_f/\text{in}^2(\text{psia})$, 或 4°C 时 33.90ft 水。表压是指压力比大气压力高出的部分。因此, 表压为 $21.5\text{lb}_f/\text{in}^2$ 时, 其绝对压力是 $21.5 + 14.7$

(大约) = 36.2 psia。在 SI 单位制中, $1 \text{ psia} = 6.89476 \times 10^3 \text{ Pa} = 6.89476 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ 。此外, $1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

1.3B 理想气体定律

将遵从一些简单定律的气体定义为理想气体。对于理想气体, 气体分子被看作是自身不占有体积的、相互间不发生力的作用的刚球。没有一种实际气体能完全遵守这些定律。但在一般的温度下, 在低于几个大气压的压力下, 用理想气体定律计算的结果与实际结果相比, 误差在百分之几或更少的范围内。因此, 在这种情况下对于工程计算来讲, 理想气体定律就足够准确了。

Boyle 理想气体定律指出: 气体的体积与绝对温度成正比, 而与绝对压力成反比。其关系式为:

$$pV = nRT \quad (1.3-1)$$

式中 p 是绝对压力 (N/m^2), V 是气体的体积 (m^3); n 是气体的 kgmol 数; T 是绝对温度 (K); R 是气体定律常数, $R = 8314.3 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 / (\text{kgmol} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{K})$ 。当体积使用 ft^3 , n 使用 lbmol , T 使用 $^\circ\text{R}$ 等单位时, $R = 0.7302 \text{ ft}^3 \cdot \text{atm} / (\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R})$ 。对于 cgs 制 (参看附录 A.1), $V = \text{cm}^3$, $T = \text{K}$, $n = \text{gmol}$, $R = 82.057 \text{ cm}^3 \cdot \text{atm} / (\text{gmol} \cdot \text{K})$ 。

为了便于比较各种气体的量, 把 101.325 kPa (1.0 atm) 和 273.15 K (0°C) 规定为标准压力与标准温度条件 (缩写为 STP 或 SC), 在这一标准条件下的气体体积数为:

$$1.0 \text{ kgmol 体积 (SC)} = 22.414 \text{ m}^3$$

$$1.0 \text{ gmol 体积 (SC)} = 22.414 \text{ l} = 22.414 \text{ cm}^3$$

$$1.0 \text{ lbmol 体积 (SC)} = 359.05 \text{ ft}^3$$

例 1.3-1 气体定律常数

当压力用 psia, 摩尔数用 lbmol, 体积用 ft^3 , 温度用 $^\circ\text{R}$ 表示时, 计算气体定律常数 R 的值。同样, 计算采用 SI 单位制时 R 的值。

解: 在标准条件下

$$p = 14.7 \text{ psia} \quad V = 359 \text{ ft}^3$$

$$T = 460 + 32 = 492^\circ\text{R} (273.15 \text{ K})$$

代入式 (1.3-1), 对于 $n = 1.0 \text{ lbmol}$, 解出 R ,

$$R = \frac{pV}{nT} = \frac{(14.7 \text{ psia}) \times (359 \text{ ft}^3)}{(1.0 \text{ lbmol}) \times (492^\circ\text{R})} = 10.73 \frac{\text{ft}^3 \cdot \text{psia}}{\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R}}$$

$$R = \frac{pV}{nT} = \frac{(1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}) \times (22.414 \text{ m}^3)}{(1.0 \text{ kgmol}) \times (273.15 \text{ K})} = 8314 \frac{\text{m}^3 \cdot \text{Pa}}{\text{kgmol} \cdot \text{K}}$$

对于 n 摩尔的气体, 其状态分别为 p_1, V_1, T_1 与 p_2, V_2, T_2 时, 使用式 (1.3-1), 可以得到一个有用的关系式:

$$p_1 V_1 = nRT_1$$

$$p_2 V_2 = nRT_2$$

故

$$\frac{p_1 V_1}{p_2 V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1.3-2)$$

例 1.3-2 气体压缩