

化 学 工 程

(第 一 册)

天津大学化工系化学工程教研室

1976年4月

前 言

旧教材在修正主义教育路线影响下，课程门类庞杂，彼此脱节，片面强调学科系统性，宣扬理论至上、智育第一，脱离无产阶级政治，脱离火热的三大革命运动。遵照毛主席关于“**学制要缩短，教育要革命**”，“**课程设置要精简**”和“**教材要彻底改革**”的教导，我们为本校化学工程专业编写了《化学工程》试用教材。

在编写过程中，我们曾分头下厂调查研究，向工人师傅学习，向生产实际学习，力求教材能联系生产实际，能初步满足结合典型任务组织教学的需要，力求教材能符合辩证唯物主义的认识论，便于学员自学。

按照精简课程设置的原则，根据化学工程专业的要求，我们将过去《物理化学》、《化工原理》和专业课合为一门课程，叫做《化学工程》。

为了能适应开门办学中具体任务多样性的要求，本教材涉及的范围较广一些，某些部分也稍深一些，以提供选择的余地。全书共分四册，二十七章，这些章节并非要求学员全学，而是根据具体任务的不同只选学其中有关的章节。

我们政治思想水平不高，接触生产实际还不多，所以深知本教材离教育革命的要求还差得很远，各方面的缺点错误一定不少，欢迎批评指正。

编 者

一九七六年四月

化 学 工 程

第 一 册 目 录

第一章 物料衡算与能量衡算	(1)
第一节 单位	(1)
1.1—1 单位与单位制度	(1)
1.1—2 质量、重量、力	(3)
1.1—3 单位的正确运用	(4)
1.1—4 单位换算	(5)
1.1—5 数字公式的单位换算	(6)
1.1—6 因次与因次一致性原则	(8)
习 题	(9)
第二节 物料的状态	(10)
(一) 状态变数	(10)
1.2—1 温度	(10)
1.2—2 压强	(10)
1.2—3 密度、比容、比重	(11)
1.2—4 混合物的组成	(12)
(二) 理想气体	(14)
1.2—5 理想气体状态方程	(14)
1.2—6 理想气体混合物	(16)
1.2—7 理想气体定律的应用范围	(19)
(三) 真实气体	(19)
1.2—8 压强—比容图	(19)
1.2—9 真实气体状态方程	(21)
1.2—10 压缩性因子	(23)
1.2—11 真实气体混合物	(27)
(四) 液体、蒸汽、蒸汽压	(29)
1.2—12 液体、蒸汽、蒸汽压	(29)
习 题	(31)
第三节 物料衡算	(33)
(一) 化工生产过程	(33)
1.3—1 化工生产过程	(33)
(二) 质量守恒定律	(35)
1.3—2 质量守恒定律	(35)
(三) 物料衡算的方法与应用	(37)

1.3—3	衡算范围	(37)
1.4—4	衡算基准	(39)
1.3—5	连系物料	(40)
1.3—6	质量比与衡分子比	(41)
1.3—7	侧流	(43)
1.3—8	回流	(44)
1.3—9	放空	(45)
(四)	不稳定过程的物料衡算	(46)
1.3—10	不稳定过程的物料衡算	(46)
	习 题	(50)
第四节	热量衡算	(52)
(一)	化工生产中的热量衡算	(52)
1.4—1	化工生产中的热量衡算	(52)
(二)	热效应	(52)
1.4—2	热量及其单位	(52)
1.4—3	热容	(53)
1.4—4	气体的热容	(54)
1.4—5	熔融潜热与汽化潜热	(58)
1.4—6	混合热	(59)
(三)	热量衡算的方法与应用	(62)
1.4—7	基本方法	(62)
1.4—8	热交换	(63)
1.4—9	蒸发	(65)
1.4—10	蒸馏	(67)
	习 题	(69)
第五节	能量衡算	(70)
(一)	热力学的一些定义与术语	(71)
1.5—1	体系、边界、环境	(71)
1.5—2	性质、状态、状态函数	(71)
1.5—3	状态变化、路径、过程	(71)
(二)	能量守恒定律(热力学第一定律)	(72)
1.5—4	功	(72)
1.5—5	膨胀功	(72)
1.5—6	压缩功	(74)
1.5—7	最大功和最小功	(75)
1.5—8	可逆与不可逆过程的功	(76)
1.5—9	热	(77)
1.5—10	热与功的同异	(77)
1.5—11	能量守恒定律的表示式	(78)
1.5—12	内能	(78)

1.5—13	焓	(80)
1.5—14	定容热容与定压热容	(81)
1.5—15	状态函数法	(84)
(三)	非流动过程(封闭体系内)的能量衡算	(86)
1.5—16	基本关系式	(86)
1.5—17	等容过程	(87)
1.5—18	等压过程	(87)
1.5—19	等温过程	(87)
1.5—20	绝热过程	(87)
1.5—21	多变过程	(89)
1.5—22	不可逆过程	(89)
(四)	流动过程(开口体系内)的能量衡算	(91)
1.5—23	基本关系式	(91)
1.5—24	连续性方程	(92)
1.5—25	总能量衡算方程	(93)
1.5—26	传热设备	(95)
1.5—27	流体压送机械	(96)
习 题		(100)
表 1—1	常用单位的符号	(101)
表 1—2	一些物理量的单位与因次	(101)
表 1—3	临界常数、沸点、汽化潜热	(102)
表 1—4	气体衡分子热容	(103)
本章符号表		(104)
第二章	流体流动	(106)
第一节	静止流体	(107)
2—1	重度	(107)
2—2	静止流体的平衡方程	(108)
2—3	液柱压差计	(110)
2—4	液位测量	(112)
第二节	流体流动的能量关系	(113)
2—5	流量与流速	(113)
2—6	稳定流动与不稳定流动	(113)
2—7	柏努利方程——机械能衡算式	(114)
2—8	压头与压头损失	(116)
2—9	柏努利方程的应用	(117)
第三节	流动阻力	(121)
2—10	流动阻力的表现——压强降	(121)
2—11	流动阻力的来源——内摩擦	(122)
2—12	粘度	(123)

2—13	理想流体与实际流体	(126)
2—14	流动类型与雷诺准数	(126)
2—15	层流与湍流	(128)
2—16	计算直管摩擦阻力的通式	(129)
2—17	层流时的摩擦系数(理论分析法)	(131)
2—18	湍流时的摩擦系数(因次分析法)	(133)
2—19	管壁粗糙程度的影响	(136)
2—20	阻力与流速的关系	(138)
2—21	非圆形管的当量直径	(138)
2—22	计算管路上局部阻力的通式与阻力系数	(139)
2—23	管路总阻力的计算	(142)
2—24	分支管路	(146)
2—25	可压缩流体的流动压降	(149)
第四节 流量测量		(152)
2—26	测速管	(152)
2—27	孔板流量计	(155)
2—28	喷嘴和文丘里管	(158)
2—29	转子流量计	(159)
第五节 化工管路设计		(159)
2—30	管路设计标准	(160)
2—31	管子与管件	(161)
2—32	管子规格的选定	(165)
2—33	管路布置与安装的一般原则	(166)
2—34	管路的热补偿	(167)
2—35	管路计算	(168)
本章符号表		(172)
习题		(174)
第三章 流体输送		(177)
(甲) 液体输送		(177)
第一节 离心泵		(177)
3—1	离心泵的操作原理	(177)
3—2	离心泵的主要部件	(178)
3—3	离心泵的主要性能参数	(180)
3—4	离心泵的基本方程式	(181)
3—5	离心泵的特性曲线	(184)
3—6	粘度的影响	(185)
3—7	重度的影响	(185)
3—8	离心泵的吸上高度与汽蚀现象	(186)
3—9	泵在管路上的工作点和流量调节	(189)
3—10	离心泵的性能换算	(191)

3—11	离心泵的典型结构与化工用离心泵的特点	(191)
3—12	离心泵的选择	(193)
3—13	离心泵的安装与运转	(196)
第二节	其它类型泵	(196)
3—14	往复泵	(196)
3—15	计量泵 (比例泵)	(198)
3—16	旋转泵	(199)
3—17	正位移泵的流量调节	(199)
3—18	旋涡泵	(200)
3—19	各种类型泵在化学工业中的应用	(201)
	(乙) 气体压缩和输送机械	(201)
第三节	往复压缩机	(202)
3—20	理想压缩循环	(202)
3—21	余隙及其影响	(203)
3—22	多级压缩	(205)
3—23	往复压缩机的生产能力	(208)
3—24	往复压缩机的功率与效率	(209)
3—25	往复压缩机的分类和构造	(210)
3—26	往复压缩机的选用	(212)
3—27	往复压缩机的操作与管理	(212)
3—28	往复真空泵	(213)
第四节	离心通风机、鼓风机与压缩机	(213)
3—29	离心通风机	(213)
3—30	离心通风机的特性曲线与性能参数	(214)
3—31	离心通风机的无因次性能曲线	(215)
3—32	离心通风机的选用	(216)
3—33	离心鼓风机与离心压缩机	(219)
第五节	旋转鼓风机与压缩机, 真空泵	(220)
3—34	罗茨鼓风机	(221)
3—35	液环压缩机	(221)
3—36	水环真空泵	(221)
3—37	喷射泵	(222)
	本章符号表	(223)
	习题	(224)
第四章	传热	(227)
第一节	概述	(227)
4—1	传热的基本方式	(227)
4—2	两流体通过间壁的传热	(227)
4—3	稳定传热与不稳定传热	(228)

第二节 热传导.....	(228)
4—4 单层平壁的热传导.....	(223)
4—5 导热系数.....	(229)
4—6 多层平壁的热传导.....	(230)
4—7 单层与多层圆筒壁的热传导.....	(232)
第三节 间壁两侧流体的热交换.....	(235)
4—8 热交换过程的分析.....	(235)
4—9 壁面与流体之间的对流传热速率.....	(236)
4—10 间壁两侧流体之间的传热速率.....	(237)
4—11 总传热系数.....	(237)
4—12 平均温度差.....	(240)
4—13 传热速率方程的应用举例.....	(246)
第四节 对流传热系数关联式.....	(248)
4—14 流体无相变时的对流传热系数.....	(249)
4—15 流体有相变的对流传热系数.....	(257)
4—16 关于壁温.....	(266)
第五节 热辐射.....	(267)
4—17 基本概念与定律.....	(267)
4—18 两固体间的相互辐射.....	(270)
4—19 散失于周围环境中的热量.....	(272)
4—20 隔热(绝热)保温.....	(273)
第六节 热交换器的构造.....	(274)
4—21 间壁式热交换器.....	(274)
4—22 混合式热交换器.....	(279)
4—23 蓄热式热交换器.....	(280)
第七节 管壳式热交换器的设计.....	(280)
4—24 管壳式热交换器设计时应考虑的问题.....	(281)
4—25 管壳式热交换器设计计算步骤.....	(288)
第八节 热交换器的发展及研究概况.....	(297)
4—26 管式换热器.....	(298)
4—27 管壳式换热器设计中的几个问题.....	(300)
4—28 新型换热器.....	(303)
第九节 加热方法与冷却方法.....	(309)
4—29 加热方法.....	(309)
4—30 冷却方法.....	(310)
本章符号表.....	(311)
参考资料.....	(312)
习题.....	(313)

第五章 多相混合物分离	(316)
第一节 沉降	(316)
(一) 重力沉降.....	(317)
5—1 沉降速度.....	(317)
5—2 降尘室.....	(321)
5—3 悬浮液的沉聚过程.....	(323)
5—4 沉降槽的构造与操作.....	(324)
5—5 连续式沉降槽计算.....	(324)
(二) 离心力沉降.....	(328)
5—6 离心力作用下的沉降速度.....	(328)
5—7 旋风分离器的操作原理.....	(329)
5—8 旋风分离器性能的估计.....	(330)
5—9 旋风分离器的分离效率.....	(333)
5—10 旋风分离器的流体阻力.....	(335)
5—11 旋风分离器的型式.....	(335)
5—12 旋风分离器的选用.....	(337)
5—13 旋液分离器.....	(339)
第二节 过滤	(339)
5—14 过滤操作的基本概念.....	(339)
5—15 过滤速率.....	(341)
5—16 过滤设备.....	(341)
5—17 过滤操作中的流体流动.....	(345)
5—18 过滤基本方程式.....	(345)
5—19 恒压过滤方程式.....	(347)
5—20 过滤常数及其测定.....	(348)
5—21 间歇式过滤机的计算.....	(350)
5—22 连续式过滤机的计算.....	(352)
第三节 离心机	(353)
5—23 一般概念.....	(353)
5—24 离心机的结构与操作.....	(354)
5—25 离心机的操作管理.....	(356)
第四节 气体的湿法净制	(356)
5—26 文丘里除尘器.....	(356)
5—27 湍球塔.....	(357)
表 5—1 CLT/A 型旋风分离器生产能力.....	(358)
表 5—2 CLP/B 型旋风分离器生产能力.....	(359)
表 5—3 扩散式旋风分离器生产能力.....	(359)
本章符号表.....	(360)
习 题.....	(361)

第一章 物料衡算与能量衡算

第一节 单 位

化学工程既要面向工厂里的大规模生产，又和实验室里的小型试验有密切连系。它所处理的是工程技术问题，却经常应用到物理、化学等自然科学里的结论和数据。因此，化工原理和化工计算中，各种各样的计量单位都会出现。正确地运用单位与进行单位换算，是化工计算的第一个要求。

所谓正确地运用单位，首先在于对所遇到的物理量要真正了解其意义，明确其单位。任何物理量的单位都要注明，绝不能只记下数目字而不列出单位，或碰到公式便匆忙把数目字代入而不问其单位是否合适。单位换算有一套行之有效的步骤，后面将要讨论，若不注意遵守它而另走捷径，结果常常误入歧途，求出错误的结果，使计算前功尽弃。这是初学者必须注意的。有经验的计算者对单位问题无不认真对待，因为经验证明，稍一疏忽，便致错误。

1.1—1 单位与单位制度

表示一个物理量的大小，不能只列出数目，还要列出这个数目所计量的单位。例如，某设备的长度是一个物理量，它的大小可以用10米来表示，若是“10”这个数目离开了“米”这个单位，便与长度毫不相干，更不用说长度的大小如何了。由此可见，物理量的大小是用数目与单位两者的乘积来表示的。说它是个乘积，除了强调其中数目与单位两者都不可缺少而外，还有这样的意义：在计算中，单位与数目都应同样看待，可以一起纳入运算，例如：

$$(1) \quad 5m + 8m = (5 + 8)(m) = 13m$$

$$(2) \quad 2m \times 8m = (2 \times 8)(m \times m) = 16m^2$$

$$(3) \quad \frac{8m}{2s} = \left(\frac{8}{2}\right) \left(\frac{m}{s}\right) = 4m/s$$

$$(4) \quad \therefore 1m = 100cm$$

$$\text{又 } 1cm = 10mm \text{ 即 } \frac{10mm}{1cm} = 1$$

$$\begin{aligned} \therefore 1m &= (100cm) \left(\frac{10mm}{1cm}\right) \\ &= \left(\frac{100 \times 10}{1}\right) \left(\frac{cm \times mm}{cm}\right) = 1000mm \end{aligned}$$

上面各算式里的 m 、 cm 、 mm 、 s 分别为米、厘米、毫米、秒这几个单位的符号。一些常用单位的符号，见本章后面的表 1—1。以后为了把表示单位的符号与表示物理量的符号区别开，在单位的符号外边加一方括号。例如长度 l 等于10米，则写成

$$l = 10[m]$$

物理量有很多，为了表示清楚它们的单位，于是人为地把它划分成基本量与导出量两种，并给每一个基本量规定出一个单位，称为基本单位；其余物理量都可以从基本量导出，所以叫导出量，导出量的单位就是导出单位。例如，以长度和时间为基础量，基本单位分别定为 $[m]$ 和 $[s]$ ，则速度便是一个导出量，它的单位 $[m/s]$ 就是导出单位。

至于选定那几个物理量作基本量，给基本量规定什么基本单位，完全是以方便为原则。由于基本量选择得不同，或对基本量所规定的单位不同，便产生了不同的单位制度。常见的几种单位制度所用的基本量与基本单位如下：

	长 度	质 量	力	时 间
绝对单位制：				
cgs制：	cm	g	—	s
MKS制(或SI)：	m	kg	—	s
重力单位制：	m	—	kgf	s

由上表可以看出，绝对单位制（包括cgs制与MKS制）以长度、质量和时间作基本单位，力的单位则属导出单位；重力单位制以长度、力和时间作基本单位，质量的单位则属导出单位。

上表中的基本单位是按力学的需要而规定的，在其它科学领域里，基本单位可按需要另行增加。例如，热学里必须用到温度这个物理量，所以增加了 $^{\circ}\text{C}$ （或 $^{\circ}\text{K}$ ）这个基本单位；在化学和化学工程里，衡分子数 $[\text{mol}]$ （克分子）或 $[\text{kmol}]$ （公斤分子）也常用作表示物料量的基本单位。

自然科学里广泛采用cgs制，所以cgs制又称为物理单位制，这个单位制度所用的基本单位都比较小，在工程技术上使用不便，而且工程技术里对所研究的对象，常要考虑它的重量或所受的力，以力作基本量就比较方便，于是出现了重力单位制，它又叫工程单位制。

化学工程作为一门技术科学，又有它的特殊性，对于所处理的物料，经常要考虑其组成、性质、状态与能量的变化，却不一定要考虑其受力多少，因而质量的概念比较突出，力的概念有时并不居显要地位。考虑到这种情况，若任何场合都采用工程单位反而不便，有些场合以采用SI或MKS制比较合适。

SI和MKS制并非完全一样，前者是由后者发展出来的。六十年代初，国际度量衡会议提出了一种新的单位制度，称为国际制，SI就是它的缩写名称。它一共采用七个基本单位，除了MKS制中原有的 $[m]$ 、 $[\text{kg}]$ 、 $[s]$ 而外，还加上 $[\text{K}]$ （凯氏度——绝对温度单位）、 $[\text{cd}]$ （烛光——发光强度单位）、 $[\text{A}]$ （安培——电流单位）、 $[\text{mol}]$ （摩尔——物质质量单位）。它的优点主要有二：（1）自然科学与工程技术领域里的一切单位都可以从上述七个基本单位导出，也就是所有科学部门都可以采用一套共通的单位。这是它的通用性。（2）任何一个导出单位由基本单位相乘、相除而导出时，都不引入比例常数，或者说比例常数都等于1。例如力的单位采用 $[\text{N}]$ （牛顿）， $1[\text{N}] \equiv 1[\text{kg}] \times 1[\text{m/s}^2] = 1[\text{kg} \cdot \text{m/s}^2]$ ；又如能量、热、功三者的单位都采用 $[\text{J}]$ （焦耳）， $1[\text{J}] \equiv 1[\text{N}] \times 1[\text{m}] = 1[\text{N} \cdot \text{m}] = 1[\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2]$ 。别的单位制里采用 $[\text{cal}]$ （卡）或 $[\text{kcal}]$ （千卡）作热的单位，功或能量的单位则采用 $[\text{J}]$ 或 $[\text{kgf} \cdot \text{m}]$ ，从热的单位转换为功的单位便要通过所谓“热功当量”这个比例常数： $1[\text{kcal}] = 4.87[\text{kJ}] = 427[\text{kgf} \cdot \text{m}]$ 。SI各单位之间的换算无需通过比例常数，使运算简便而不易发生错漏。这是它的一贯性。由于上述两个优点，SI近年在世界范围内推广很快，许多科技书刊已经使用，其它单位制度有逐渐被取代的趋势。

SI的一个缺点是所用的单位有些还未为人所习惯,例如拿 $[N]$ 来表示力,拿 $[K]$ 来表示温度,使人不便于马上理会到这个力究竟有多大或这个温度有多高。此外,这个单位制还规定了一套字头来表示倍数(例如 m 表示 10^{-3} ,所以 mm 就是 $10^{-3}m$ 即毫米; M 表示 10^6 ,所以 MN 就是一百万牛顿),单位的书写格式也有一套规定,目前还未能普遍地严格遵守,所以这里也不再详细介绍。对于化学工程的应用来说,SI里的基本单位一般只用到 $[kg]$ 、 $[m]$ 、 $[s]$ 、 $[K]$ 、 $[kmol]$ 这五个,假如对原来的MKS制已经熟悉,在遇到SI时,也不难理解。

现在使用的单位还有一些并不属于前述任何一种单位制度,例如表示时间的 $[h]$ (小时),表示压强的 $[atm]$ (大气压)或 $[mmHg]$ (毫米汞柱)等,称为制外单位。这些单位或由于大小适中便于使用,或由于习惯关系一直沿用下来,十分普遍,所以又叫习用单位。

本书以采用工程单位为主,但是由于前面已提到的原因,本章却常用到MKS制的单位,所以要求把这两种单位制度都熟悉起来。

上面所提到的单位制,都属于米制系统。此外还有另外一个系统,即英制系统,以呎、磅、秒作基本单位。本书为了减少复杂性,避免混淆,不再引进这个系统的单位制度。

化学工程中常用到的一些物理量在各种单位制度之下的单位,见本章后面的表1—2。

1.1—2 质量、重量、力

要在化工计算中正确地使用单位,并弄清工程制与MKS制的关系,先要彻底了解质量、重量、力三者的意义与关系。质量和重量(或力)是两个截然不同的概念,在单位运用上所出现的混乱,很多是由于未能在这两者之间划清界线而引起。

一件物体的质量是它所包含的物质有多少;它的重量是它所受到的地球吸引力(重力)的大小。一件物体的质量是固定的,但它的重量却随它与地心的距离而变。通常所谓重量是指在地球表面附近的重量来说的。

质量和力的关系可以用牛顿运动第二定律表示:

$$f = kma \quad (1.1-1)$$

式中, f —— 作用于物体上的力;

m —— 物体的质量;

a —— 物体在力所作用的方向上的加速度。

式1.1—1里的比例常数 k 的数值,取决于式中各物理量所用的单位。若各物理量都用同一种制度的单位表示,则 $k = 1$ 。

在绝对单位制里,以质量的单位 $[g]$ 或 $[kg]$ 作基本单位,令 $k = 1$ 便可从式1.1—1导出力的单位。后面对式1.1—1中的物理量只考虑其单位而不问其数目是什么,导出力的单位如下:

$$\text{cgs制:} \quad f = ma \stackrel{\text{单位}}{=} [g][cm/s^2] = [g \cdot cm/s^2] = [dyne] \text{ (达因)}$$

$$\text{MKS制:} \quad f = ma \stackrel{\text{单位}}{=} [kg][m/s^2] = [kg \cdot m/s^2] = [N] \text{ (牛顿)}$$

在重力单位制里,以力的单位 $[kgf]$ 作基本单位,令 $k = 1$,可导出质量的单位如下:

$$\text{工程制:} \quad m = \frac{f}{a} \stackrel{\text{单位}}{=} \frac{[kgf]}{[m/s^2]} = [kgf \cdot s^2/m] \text{ (质量工程单位)}$$

从上述推导结果出发,可以引申出下列几个值得注意之点:

(1) $1[N]$ 就是作用于质量为 $1[kg]$ 的物体上能够产生 $1[m/s^2]$ 加速度所需的力。 1 “工程单位质量”是在 $1[kgf]$ 的力作用之下其加速度为 $1[m/s^2]$ 的那个物体的质量。

(2) 在同一单位制里, 质量和力是用不同名称的单位来表示的。采用 MKS 制时, 质量的单位是 $[kg]$, 力的单位是 $[N]$ 即 $[kg \cdot m/s^2]$ 而不是 $[kgf]$; 采用工程制时, 力的单位是 $[kgf]$, 质量的单位是“质量工程单位”即 $[kgf \cdot s^2/m]$ 而不是 $[kg]$ 。

(3) 计算中遇到质量和力同时出现, 而两者的数据又都用“公斤”来表示时, 必须明确每一个“公斤”究竟是指质量还是指力(或重量), 在书写的时候把它们区别开。公斤质用 $[kg]$ 这个符号, 公斤力用 $[kgf]$ 这个符号。进行计算之先要选定一种单位制度, 若采用工程制, 应把 $[kg]$ 换算成 $[kgf \cdot s^2/m^2]$ 即“质量工程单位”; 若采用 MKS 制, 应把 $[kgf]$ 换算成 $[kg \cdot m/s^2]$ 即 $[N]$ 。

至于 $[kg]$ 和 $[kgf]$ 之间的关系, 可通过下法导出: 物体在地面附近受重力作用所产生的加速度 $a = 9.81[m/s^2]$, 故作用于质量 $m = 1[kg]$ 的物体上的重力可根据式 1.1—1 求得:

$$f = ma = 1[kg] \times 9.81[m/s^2] = 9.81[kg \cdot m/s^2] \quad (1.1-2)$$

物体所受的重力也就是物体的重量, 而质量为 $1[kg]$ 的物体在地面附近的重量为 $1[kgf]$, 故

$$1[kgf] = 9.81[kg \cdot m/s^2] \quad (1.1-3)$$

或

$$1[kg] = \frac{1}{9.81}[kgf \cdot s^2/m] \quad (1.1-4)$$

式 1.1—3 和 1.1—4 都是 $[kg]$ 与 $[kgf]$ 的关系式, 可用于 MKS 制与工程制之间的换算。从这两个公式也可以看出, $1[kg] \neq 1[kgf]$, 它们是两个不同的概念, 并且属于两种不同的单位制度。

1.1—3 单位的正确运用

化工计算中所用到的公式可以分成两类。

一类公式是根据物理规律建立的, 式 1.1—1 就属于这一类。公式中的符号, 除掉比例系数 k 以外, 各代表一个物理量, 因此又叫物理量方程。既然物理量是数目与单位的乘积, 把物理量的数据代入这一类公式时, 严格地作法就应把数目和单位一起代进去, 在式 1.1—2 的运算里就是这样作的。把用某一个单位制度的数据代入物理量方程, 解出的结果总是属于同一个单位制度。这就是说, 物理量方程在单位上总是一致的。为这一类公式规定出各物理量应该采用什么单位是多余的事, 因为无论那一种制度的单位都可以用, 但要注意单位的一致。

使用物理量方程进行计算时, 一开始便应选定一种单位制度, 并贯彻到底, 中途绝不变更。比较稳当的办法是把计算中用到的所有数据都预先变换成与这个单位制度相符, 然后把数目与单位一起代入式中, 按照公式所规定的关系, 对数目与单位分别进行运算或整理。若求得的结果不能保持单位的一致或得出不合理的单位, 便表明计算中混进去了不一致的单位, 或者是所用的公式本身单位不一致, 有必要检查它是否正确。

另一类公式是纯粹根据实验结果整理出来的, 叫经验公式。这类公式中的每一个符号, 都要用指定单位的数值代入, 所得结果, 其单位也是指定了的。经验公式往往不符合单位的一致性, 所以严格地说, 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

数目字部分(这个数目是与所指定的单位相对应的), 所以又叫作数字公式。

使用经验公式时必须注意的是, 代入以前要逐一核实每个物理量数据所用的单位是否合乎公式的规定, 但代入时只须把数目字代入, 算出的结果则附上公式所规定的单位。

1.1—4 单位换算

计算中必须使用正确的单位, 已如上述。然而, 从各种来源得到的数据, 其单位不一定符合要求, 或者是属于另一种单位制度, 或者是制外单位, 这都需要预先换算好。若在运算过程中临时换算, 很容易发生错误或遗漏。

物理量由一种单位换算成另一种单位, 其数目也跟着改变, 换算时要用换算因数。所谓换算因数就是两种单位的大小之比。例如, 因 $1[m] = 100[cm]$, 故由 $[m]$ 换算成 $[cm]$ 的换算因数就是 $[m]/[cm] = 100/1 = 100$ 。这样, 把长度从若干 $[m]$ 换算成 $[cm]$, 就应该把原来的长度数目乘以100。严格地说, 应该是把这个长度乘以 $100[cm/m]$ 。

化学工程中常用单位的换算因数可从本书附录中查得。比较复杂的单位换算因数, 没有必要记住, 无表可查时, 可把复杂的单位分解成若干个简单的单位, 逐个换算。后面通过几个例题, 说明这种换算方法的步骤。

如1.1—1 26°C 和 $1[atm]$ 时, CO_2 在空气里的扩散系数 D 等于 $0.164[cm^2/s]$, 把这个数据换算成以 $[m^2/h]$ 表示。

解: (1) 把题中所给数据列出:

$$D = 0.164[cm^2/s]$$

(2) 为了把扩散系数单位里的 $[cm]$ 变换成 $[m]$, $[s]$ 变换成 $[h]$, 应先找出 $[cm]$ 与 $[m]$, 又 $[s]$ 与 $[h]$ 的换算关系, 列出如下:

$$1[m] = 100[cm] \quad 1[h] = 3600[s]$$

这两个关系可以改写成

$$\frac{1[m]}{100[cm]} = 1 \quad \frac{3600[s]}{1[h]} = 1$$

(3) 因为任何数值乘以1, 这个数值并没有改变, 故

$$\begin{aligned} D &= 0.164 \left[\frac{cm^2}{s} \right] \left(\frac{1m}{100cm} \right)^2 \left(\frac{3600s}{1h} \right) \\ &= \left(\frac{0.164 \times 1^2 \times 3600}{100^2 \times 1} \right) \left[\frac{cm^2 \times m^2 \times s}{s \times cm^2 \times h} \right] \\ &= 0.039[m^2/h] \end{aligned}$$

这个方法看起来有点烦琐, 但因为把单位也和数目一样纳入运算, 分子分母中相同单位符号相消之后, 剩下来的必须与所要求的相符, 如果有错, 便易发现。若是只图简便, 只把原来物理量中的数目写出, 单纯乘以或除以各换算因数, 便很容易把乘除关系颠倒过来, 发生错误之后, 查核起来又不容易。

例1.1—2 4°C 时水的密度以物理单位表示是 $1.00[g/cm^3]$, 换算成以工程单位表示。

解: 第一步先把密度的单位由 $[g/cm^3]$ 换算成 $[kg/m^3]$:

$$1.00 \left[\frac{g}{cm^3} \right] = 1 \left[\frac{g}{cm^3} \right] \left(\frac{1kg}{1000g} \right) \left(\frac{100cm}{1m} \right)^3 = 1000 [kg/m^3]$$

这是MKS制或SI的密度单位，因为它以 $[kg]$ 作基本单位，而工程制以 $[kgf]$ 作基本单位，故还要进行变换，采用式1.1—3所示的关系可得

$$\begin{aligned} 1.00 \left[\frac{g}{cm^3} \right] &= 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] = 1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \left(\frac{1kgf}{9.81kg \cdot m/s^2} \right) \\ &= 102 [kgf \cdot s^2/m^4] \end{aligned}$$

例1.1—3 通用气体常数 $R = 82.06 [atm \cdot cm^3/mol \cdot ^\circ K]$ 。把它换算成以下列单位表示：(a) $[atm \cdot m^3/kmol \cdot ^\circ K]$ ；(b) $[kgf \cdot m/kmol \cdot ^\circ K]$ ；(c) $[kcal/kmol \cdot ^\circ K]$ ；(d) $[kJ/kmol \cdot ^\circ K]$ 。

解：

$$\begin{aligned} (a) \quad R &= 82.06 \left[\frac{atm \cdot cm^3}{mol \cdot ^\circ K} \right] \left(\frac{1m}{100cm} \right)^3 \left(\frac{1000mol}{1kmol} \right) \\ &= 0.08206 [atm \cdot m^3/kmol \cdot ^\circ K] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (b) \quad R &= 0.08206 \left[\frac{atm \cdot m^3}{kmol \cdot ^\circ K} \right] \left(\frac{10330kgf/m^2}{1atm} \right) \\ &= 848 [kgf \cdot m/kmol \cdot ^\circ K] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (c) \quad R &= 848 \left[\frac{kgf \cdot m}{kmol \cdot ^\circ K} \right] \left(\frac{1kcal}{427kgf \cdot m} \right) \\ &= 1.987 [kcal/kmol \cdot ^\circ K] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (d) \quad R &= 1.987 \left[\frac{kcal}{kmol \cdot ^\circ K} \right] \left(\frac{4187J}{1kcal} \right) \left(\frac{1kJ}{1000J} \right) \\ &= 8.314 [kJ/kmol \cdot ^\circ K] \end{aligned}$$

1.1—5 数字公式的单位变换

数字公式（经验公式）中各符号都要用规定单位的数字代入，不能任意变更。假如数据的单位与公式所规定的单位不一样，而这公式又要反复使用，每次使用都要对有关数据进行单位换算，十分费事。为了一劳永逸，可以把整个公式加以变换，使能直接用另一种单位的数据代入，而算得的结果又可用计算者所希望的单位表示。下面通过实例说明这种变换方法的步骤。

例1.1—4 20℃时稀氨水上方氨的蒸汽压可用下式表示：

$$p = 0.60 c \quad (a)$$

式中：p——氨的蒸汽压强， $[mmHg]$ ；

c——氨水的浓度， $[g/l]$ 。

试把式(a)加以变换，使式中的浓度c能用单位为 $[kg/m^3]$ 的数据直接代入，求得的蒸汽压p，其单位为 $[atm]$ 。

解1 式(a)可以改写成

$$p = kc \quad (b)$$

式 (b) 中的比例系数 k 的数值与单位, 取决于对 p 与 c 所规定的单位是什么。按原来的规定, k 的单位应为:

$$k = \frac{p}{c} \stackrel{\text{单位}}{=} \left[\frac{\text{mmHg}}{\text{g/l}} \right] = [\text{mmHg} \cdot \text{l/g}]$$

若 p 与 c 改用新规定的单位, 则 k 的数值与单位也相应改变, 要加以换算:

$$\begin{aligned} k &= 0.60 \left[\frac{\text{mmHg} \cdot \text{l}}{\text{g}} \right] \left(\frac{1 \text{ atm}}{760 \text{ mmHg}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right) \left(\frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \right) \\ &= 7.9 \times 10^{-4} [\text{atm} \cdot \text{m}^3/\text{kg}] \end{aligned}$$

∴ 按新规定的单位, 式 (a) 应变换为

$$p = 7.9 \times 10^{-4} c \quad (c)$$

解 2 前面曾提到过, 数字公式里的符号按严格的意义来说, 只是代表物理量中的数目部分, 并非数目与单位的乘积。现在先把式 (a) 中的 p 改写成 p' , c 改写成 c' , 而 p' 和 c' 都代表数目与单位的乘积。因

$$p = \frac{p'}{[\text{mmHg}]} \quad c = \frac{c'}{[\text{g/l}]}$$

把这两个关系代入式 (a), 使得

$$\frac{p'}{[\text{mmHg}]} = 0.60 \frac{c'}{[\text{g/l}]} \quad (d)$$

若把式 (d) 中的 $[\text{mmHg}]$ 转换成 $[\text{atm}]$, $[\text{g/l}]$ 转换成 $[\text{kg/m}^3]$, 就可以进一步变换出合乎要求的公式。

$$\frac{p'}{[\text{mmHg}]} \left(\frac{760 \text{ mmHg}}{1 \text{ atm}} \right) = \frac{0.60 c'}{[\text{g/l}]} \left(\frac{1000 \text{ g}}{\text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ l}} \right)$$

$$\frac{p'}{[\text{mmHg}]} = \frac{0.60 \times 1000}{760 \times 1000} \cdot \frac{c'}{[\text{kg/m}^3]}$$

$$\frac{p'}{[\text{atm}]} = 7.9 \times 10^{-4} \left[\frac{c'}{[\text{kg/m}^3]} \right]$$

∴ 若 p 改为代表 $[\text{atm}]$ 的数目, c 改为代表 $[\text{kg/m}^3]$ 的数目, 式 (a) 便应变换为

$$p = 7.9 \times 10^{-4} c \quad (e)$$

两种解法的结果当然是相同的。第一种解法比较简单易晓, 但有些场合第二种解法却比较便捷, 后面的例题就是这样。

例 1.1—5 用实验数据整理出三氯乙烯的饱和蒸汽压 p 与绝对温度 T 的关系为

$$\log p = -\frac{1773}{T} + 7.8238$$

式中的 p 要以 $[\text{mmHg}]$ 表示, 试把它加以变换, 使 p 能以 $[\text{atm}]$ 表示

解: 由于 T 的单位不用改变, 故只需把式中的 p 改写成 $p'/[\text{mmHg}]$, 于是得

$$\log \frac{p'}{[\text{mmHg}]} = -\frac{1773}{T} + 7.8238$$

$$\log \frac{p'}{[\text{mmHg}]} \left(\frac{760 \text{ mmHg}}{1 \text{ atm}} \right) = -\frac{1773}{T} + 7.8238$$

$$\log \frac{p'}{[\text{atm}]} + \log 760 = -\frac{1773}{T} + 7.8238$$

$$\log \frac{p'}{[\text{atm}]} = -\frac{1773}{T} + 4.9430$$

∴ 按新规定的单位，原式变为

$$\log p = -\frac{1773}{T} + 4.9430$$

1.1—6 因次与因次一致性原则

任何物理量都可以用几个基本量来表示，若拿 L 、 M 、 F 、 θ 、 T 顺次代表长度、质量、力、时间、温度，称为它们的因次，那么别的物理量的因次便可以表示成这几个符号的组合。例如，面积的因次就是 L^2 ，速度的因次就是 $L\theta^{-1}$ 。复杂一点的物理量的因次可以根据一定的物理规律导出，象导出它的单位一样。根据式 1.1—1 用导出单位同样的方法，可得绝对单位制里力的因次是 $LM\theta^{-2}$ ，重力单位制里质量的因次是 $L^{-1}F\theta^2$ 。显然，单位制度不同则一个物理量的因次也会不同。

不同单位制度下一些物理量的因次，也列于表 1—2。

既然物理量方程的单位必须一致，它的因次也必然是一致的，更具体地说，一个物理量方程等号两侧各项的因次必然相同。这称为因次一致性原则。导出一个方程式如果怀疑其是否合理，首先可以用这条原则来检验。检查因次比较检查单位方便，参看后面的例 1.1—6 便明白。如果没法从理论上导出一个方程式，利用因次一致性原则也可以找出一个整理实验数据用的关系式。这个方法称为因次分析，本书的其它章里将会应用到。

例 1.1—6 液体的饱和蒸汽压随温度而变的关系为

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{Tv}$$

式中： p —— 饱和蒸汽的压强；

T —— 液体的绝对温度；

λ —— 液体的气化潜热；

v —— 蒸汽的比容，即单位质量蒸汽的体积。

试检查这个公式是否符合因次一致性原则。

解：从本章表 1—2 中查出，上式中各物理量按绝对单位制的因次如下：

$$p = [L^{-1}M\theta^{-2}]$$

$$T = [T]$$

$$\lambda = [L^2\theta^{-2}]$$

$$v = \frac{V}{m} = \frac{[L^3]}{[M]} = [L^3M^{-1}]$$

由此算出式中等号两侧各项的因次如下：