

冶金过程物料与能量平衡计算

手 册

[美] H.A.费因 G.H.盖格 著 李光溥 赵 宇 译

冶金过程物料与能量 平衡计算手册

[美]H.A.费因 G.H.盖格 著

李光溥 赵宇 译

冶金工业出版社

本书据美国AIME1979年出版的H.A.Fine和G.H.Geiger著《Handbook on Material and Energy Balance Calculations in Metallurgical Processes》一书译出。书中从基本单位制开始，通过化学反应及其计算、取样与测量等进而阐述物料平衡的计算；通过热化学的介绍进而阐述能量平衡的计算。书末附有详细的热力学数据和重要的参考文献目录。

本书由浅入深，注重实用，附有大量的例题和习题，兼有工具书和教科书的特点，适合冶金工程的学生、教师和工程技术人员作为学习与参考之用，对从事化学工程的工程技术人员也有参考价值。

本书由正文和附录两大部分组成，分别由李光溥和赵宇译出。

冶金过程物料与能量平衡计算手册

[美] H.A.费因 G.H.盖格 著

李光溥 赵 宇 译

•

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

•

787×1092 1/16 印张 23 3/4 字数 755 千字

1983年5月第一版 1983年5月第一次印刷

印数 00,001~3,400 册

统一书号：15062·3899

定价2.45元

作 者 序

我们生活在一个终于深刻理解到“生长有限”和所有自然资源都是有限的时代。但我们的经济和生活都要依靠成功的工业生产。成功在于有效地利用现有资源，不仅要节约原材料，而且要能对现存的世界市场作有力的竞争。

除开许多其他要求外，冶金工程师的责任包括提供有关冶金过程效率的情报。这可以根据基本原理进行计算，或者通过实验获得。为产生这种知识而制作物料与能量平衡的理论并不特别复杂或困难，但是它的实践，尤其是在火法冶金过程中，却可能是极端困难和昂贵的。

在这本手册中，我们力图去复习物理化学、线性代数和统计学的基本原理，因为工程师们在实践中须用以确定物料和能量的平衡。我们也尝试了包罗足够的实例与建议，以供这一领域中的初学者作为补充读物，使其能获得制作物料与能量平衡的技巧。书中也有在使用数字计算机时需用的一些数学技术。但是使用者必须注意正确的输入，要非常注意排列适当的计算方程以取得准确的结果。然而，计算机仍是有力的助手，工程师使用这一工具可获得比二十五年前能获得的更为准确的答案。

希望读者们，尤其是那些久已不作这类计算的读者，能够对他们负责的过程进行能量平衡的计算，以改进过程的效率。对这一题目有关的书目列在附录中，以提供参考，用以对照检查学习结果。希望以后再作的报告可能会反映出效率已经增长。

H. 艾伦 费因

于肯塔基大学（列克星敦）

戈登 H. 盖格

于亚利桑那大学（塔克森）

目 录

第一章 因次、单位和换算系数	1	3.4.1 皮带称重器	36
1.0 引言	1	3.4.2 料斗称重器	37
1.1 国际单位制	1	3.4.3 平台称重器	37
1.1.1 单位与因次	1	3.4.4 行车称重器	37
1.1.2 字首	3	3.4.5 辊道运输机称重器	37
1.1.3 可接受的非国际单位制单位	3	3.5 密度测量	37
1.1.4 型式	4	3.5.1 液体密度	38
1.2 换算系数	4	3.5.2 松装密度	38
1.2.1 换算系数表	4	3.5.3 矿浆(泥浆)密度	39
1.2.2 因次方程式	5	3.6 温度测量	39
1.2.3 换算方程式	6	3.6.1 热电偶	39
1.3 克分子单位或摩尔单位	8	3.6.2 压力温度计	41
1.4 密度与浓度	9	3.6.3 辐射高温计	41
1.4.1 密度	9	3.7 液流测量	42
1.4.2 浓度	9	3.7.1 流量加法计算器	42
1.5 电的单位	12	3.7.2 涡流流量计	42
1.6 小结	12	3.7.3 磁性流量计	43
参考读物	12	3.7.4 可变面积流量计	43
练习	13	3.7.5 可变压头流量计	45
第二章 化学计算法	14	3.8 压力测量	46
2.0 引言	14	3.8.1 正压	46
2.1 原子与分子的质量(重量)	14	3.8.2 真空	46
2.2 化学反应式	15	3.9 化学分析	47
2.3 理想气体定律	18	3.9.1 发射光谱	48
2.4 过量反应物与限量反应物	19	3.9.2 X-射线技术	49
2.5 氧化-还原反应	22	3.9.3 原子吸收光谱	49
2.6 小结	23	3.9.4 色谱法	49
参考读物	23	3.9.5 红外分析仪	50
练习	24	3.9.6 气体氧分析仪	51
第三章 取样与测量	26	3.10 小结	51
3.0 引言	26	参考读物	51
3.1 误差的重要性及误差	26	第四章 物料平衡	54
3.2 实验误差的增殖	27	4.0 引言	54
3.2.1 最大误差的增殖	27	4.1 质量守恒	54
3.2.2 可能误差的增殖	29	4.2 方程式组的解法	56
3.2.3 有效数位	30	4.2.1 方程式的分划	56
3.3 取样方法与程序	30	4.2.2 行列式	57
3.3.1 粒状固体取样	31	4.2.3 高斯消去法	58
3.3.2 液体取样	32	4.2.4 矩阵求逆	58
3.3.3 气体取样	35	4.2.5 矩阵条件	59
3.4 称重	36	4.2.6 分割方程式	60

4.3 物料平衡	61
4.3.1 自由度	61
4.3.2 有直接解答的问题	65
4.3.3 直达组分	66
4.3.4 循环计算	67
4.4 物料平衡的表示法	68
4.5 小结	69
参考读物	69
练习	70
第五章 热化学	72
5.0 引言	72
5.1 系统	72
5.1.1 热力学系统的类型	72
5.2 热力学第一定律	73
5.2.1 一般情况	73
5.2.2 特殊情况	75
5.3 热函	77
5.3.1 热函增量	77
5.3.2 潜热	79
5.3.3 生成热与反应热	80
5.3.4 混合热	81
5.4 热函数据的来源	82
5.4.1 数据汇编	83
5.4.2 用热力学关系求出数据	93
5.5 小结	98
参考读物	99
练习	99
第六章 能量平衡	101
6.0 引言	101
6.1 热平衡	101
6.1.1 桑基图	104
6.2 绝热反应温度	109
6.3 电能	115
6.3.1 电功率基础	115
6.3.2 电弧炉	116
6.3.3 真空电弧重熔炉	118
6.3.4 电渣重熔炉	119
6.3.5 感应熔炉与感应加热炉	119
6.3.6 电化学过程	120
6.4 分级热平衡	122
6.4.1 临界温度与能质要求	122
6.4.2 连续过程中的能量要求	126
6.5 联合的物料与能量平衡热化学模式	127
6.6 过程分析	130

6.6.1 炼铁的理论能量需要	130
6.6.2 能源匮乏时代的能效率	136
6.7 小结	139
参考读物	139
练习	140
附录A 矩阵的基本性质	142
附录B 热函数据	148
第一部分 某些化合物在298K的生成热 和分子量	148
第二部分 高于298K的热函增量	151
第三部分 热函增量、比热和生成热数据 (据美国矿务局公报605)	168
铝及其化合物 (168) 一铍及其化合物(172)一硼 及其化合物 (174) 一钡及其化合物(176)一铍及 其化合物 (179) 一铋及其化合物 (181) 一硼及 其化合物 (183)一溴(186)一镉及其化合物(186) 一钙及其化合物(188)一碳及其化合物 (191) 一 铈及其化合物 (196) 一氯(198) 一铬及其化 合物(198) 一钴及其化合物 (203)一铈及其化 合物(206) 一铜及其化合物 (208) 一镉及其化 合物 (211) 一铟及其化合物 (212) 一铀及其化 合物 (213) 一氟 (215)一钒及其化合物 (216) 一 金及其化合物 (217) 一铅及其化合物 (219) 一 钽及其化合物 (221) 一氢及其化合物 (222) 一 碘(226)一铁及其化合物 (227) 一镧及其化合物 (233) 一铅及其化合物 (235) 一锂及其化 合物 (238) 一镨及其化合物 (242) 一镁及其化 合物 (243) 一锰及其化合物 (246) 一汞及其化 合物 (252) 一钼及其化合物 (255) 一铈及其化 合物(260)一镍及其化合物(261)一氮及其化合物 (264)一氧 (267)一磷及其化合物(267)一铂及其 化合物(270)一钾及其化合物 (272) 一锆及其化 合物(276)一铷及其化合物 (277) 一铪及其化 合物 (279) 一钐及其化合物 (281) 一钨及其化 合物 (283) 一银及其化合物 (284) 一钠及其化 合物 (287) 一铯及其化合物 (290) 一钽及其化 合物 (292) 一铊及其化合物 (294) 一钪及其化 合物 (296) 一铪及其化合物 (298) 一锡及其化 合物 (299) 一钛及其化合物 (302) 一钨及其化 合物 (308) 一铀及其化合物 (311) 一钒及其化 合物 (315) 一镱及其化合物 (321) 一钇及其化 合物 (322) 一锌及其化合物 (324) 一锆及其化 合物 (326)	
参考文献	330
附录C 冶金、水泥及石灰过程的物料 与能量平衡参考书目	334

第一章 因次、单位和换算系数

1.0 引言

在科学与工程中，绝大多数的计量与计算总要包含某些称为因次的基本量的测定与操作。因次，如不是非物质概念的，诸如时间或速度之类，就是物体的物理特性的叙述。因次的确定就是把因次的大小和某些适当的标准（称为单位）相联系起来。因此，因次的完整定义必须包含一个数字和一个单位。

总之，一个单位制中的单位已发展为以一个单位或某些由若干基本单位组成的单位组合来叙述一个因次。结果是发展出至少二十九种单位制，使得学工程的学生，甚至有经验的工程师们也感到混乱。幸好现在只有三个单位制是一般使用的。在最近的将来，可能只有国际单位制（符号SI）是重要的。

本书将强调国际单位制的使用。卡将被用为能量的基本单位，因为目前收集到的数据都使用它。CGS制和美国工程单位制也将在较少的程度上加以讨论，以指出这些单位的特殊用途和它们对国际单位的换算。

1.1 国际单位制

在发展一个单位制时，总需要创造出基本单位或单位组合来叙述任何可能产生的因次。人们创造单位和成套的單位的能力，导致了許多单位制，但不幸的是在不同的单位制间，实质上沒有“有理”的联系。为了缓和这一状况，发展了称为米制的单位制，并建议供国际上使用。

1875年成立了国际度量局来维持和改进米制的单位，即克、米和秒。但是各种单位制仍旧传播。直到1948年召开了度量大会（由德文缩写为CGPM），决定建立“一个适宜于所有米制会议签字国采用的实用的单位制”。这一决定终于导致了1960年国际单位制的被采纳。

1.1.1 单位与因次

国际单位制包含若干基础的或基本的单位，可以从它们衍生出其他的单位。本书所涉及的因次，它们的基本单位与符号列于表1.1-1。

如前所提到，选用国际单位是因为其他的单位都

可以由它们衍生。一些有特殊名称的因次和它们的衍生单位列于表1.1-2，另一些没有特殊名称的因次和单位组合而在本书中却是重要的，则列于表1.1-3。

表 1.1-1 基本国际单位

因 次	基本国际单位名称	单 位 符 号
长 度	米	m
质 量	公斤	kg
时 间	秒	s
电 流	安（安培）	A
热力学温度	开（开文）	K
物质的数量	克分子（摩尔）	mol

由表1.1-2和表1.1-3可见全部衍生单位都由基本单位所直接组成，不用1以外的系数。因此，国际制是一个紧凑的单位制。例如，力的单位牛顿等于质量单位乘以加速度单位。牛顿第二定律叙述：力 F 作用于一物体，与此物体的质量 m 乘其加速度 a 成正比。即

$$F \propto ma \quad (1.1-1)$$

$$\text{或} \quad F = C \cdot m \cdot a \quad (1.1-2)$$

表 1.1-2 一些有特殊名称的辅助国际单位

因 次	衍生的国际单位名称	符号	定 义
频 率	赫	Hz	1Hz = 1s ⁻¹
力	牛顿	N	1N = 1kg·m/s ²
压力，强度	巴	Pa	1Pa = 1N/m ²
能，功，热量	焦耳	J	1J = 1N·m
功 率	瓦	W	1W = 1J/s
电荷，电量	库仑	C	1C = 1A·s
电压，电位差	伏	V	1V = 1JC
电动势	法拉	F	1F = 1C/V
电 容	欧	Ω	1Ω = 1V/A
电 阻	西门	S	1S = 1Ω ⁻¹
电 导			

在国际制中，公式（1.1-2）中的比例常数 C 为1，它的因次是牛顿·秒²/公斤·米。

在不连贯的单位制中，如美国工程制，方程式（1.1-2）中的 C 不是1。其中力的单位是磅（力），符号lb_f。定义是能使一个质量单位磅（质量）（符号lb_m）得到32.1740ft/s²的加速度——即在45°纬度

海平面上的重力加速度⁽¹⁾。因此

$$1 \text{ lb}_f = C \cdot 1 \text{ lb}_m \cdot 32.1740 \text{ ft/s}^2 \quad (1.1-3)$$

和
$$C = \frac{1}{32.1740} \cdot \frac{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}{\text{lb}_m \cdot \text{ft}} \quad (1.1-4)$$

在许多计算中，通常使用 C 的倒数，并用一特殊符号 g_c 来代表。

表 1.1-3 没有特殊名称的其它国际制单位

因 次	单 位	单位符号
面 积	平方米	m^2
体 积	立方米	m^3
速率, 速度	米/秒	m/s
加速度	米/秒 ²	m/s^2
比 容	立方米/公斤	m^3/kg
密度, 质量密度	公斤/立方米	kg/m^3
导 热	瓦/米·开	$\text{W/m} \cdot \text{K}$
传热系数	瓦/平方米·开	$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
比 能	焦耳/公斤	J/Kg
比 热	焦耳/公斤·开	$\text{J/Kg} \cdot \text{K}$

$$g_c = 1/C \quad (1.1-5)$$

和
$$g_c = 32.1740 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{s}^2 \quad (1.1-6)$$

例1.1-1: 工程应力 σ 的定义是作用于样品上的力 P 与原始切面积 A_0 之比:

$$\sigma = P/A_0$$

a) 计算在0.010英寸直径的线上悬挂1公斤质量时的工程应力 lb_f/in^2 。

b) 计算在0.00025米直径的线上悬挂一公斤质量时的工程应力 N/m^2 。

c) 计算上述a与b两题在月球上的应力。

解: 假设线的质量与线上悬挂着的物体的质量相比很小, 线的负荷将等于作用于悬在线上的质量所受的重力。

$$P = F = C \cdot m \cdot g$$

对具有圆切面和直径为 d 的线,

$$A_0 = \pi \cdot d^2/4$$

a) 假如线是在海平面和45°纬度,

$$g = 32.1740 \text{ ft/s}^2$$

$$\therefore F = \frac{1}{32.1740} \cdot \frac{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2}{\text{lb}_m \cdot \text{ft}}$$

$$\cdot 2.00 \text{ lb}_m \cdot 32.1740 \frac{\text{ft}}{\text{s}^2} = 2.00 \text{ lb}_f$$

$$A_0 = \pi \cdot (0.010 \text{ in})^2/4$$

$$= 7.85 \times 10^{-5} \text{ in}^2$$

$$\sigma = 2.00 \text{ lb}_f / 7.85 \times 10^{-5} \text{ in}^2$$

$$= 2.55 \times 10^4 \text{ lb}_f / \text{in}^2$$

b) 在国际单位制中,

$$g = 9.80621 \text{ m/s}^2$$

$$P = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{Kg} \cdot \text{m}} \cdot 1.00 \text{ Kg} \cdot 9.80621 \text{ m/s}^2$$

$$= 9.81 \text{ N}$$

$$A_0 = \pi \cdot (0.00025 \text{ m})^2/4 = 4.91 \times 10^{-8} \text{ m}^2$$

$$\sigma = 9.81 \text{ N} / 4.91 \times 10^{-8} \text{ m}^2 = 2.00 \times 10^8 \text{ N/m}^2$$

c) 在月球上, 平均重力加速度为 5.47 ft/s^2 (1.67 m/s^2)。因此, a) 题中 $P = 0.34 \text{ lb}_f$, $\sigma = 4.33 \times 10^3 \text{ lb}_f / \text{in}^2$ 。b) 题中 $P = 1.67 \text{ N}$, 而 $\sigma = 0.34 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ 。

从例题1.1-1中可见, 在美国工程单位制中, 力的单位可以在某种情况下规定, 使力的测定数值等于质量的数值。但这只有在海平面上和45°纬度时恰好是正确的。在多数工程计算中, 地球上重力加速度的平均值可以使用 32.2 ft/s^2 或 9.81 m/s^2 , 同时, 可以假设磅(质量)与磅(力)相差在2~3%之内。

例1.1-2: 计算1磅(质量)的氧在以 600 ft/s 的直线速度行进中的动能。

解: 质量为 m 的物体以直线速度 $\bar{V}$ 行进时, 其动能 E_K 等于

$$E_K = \frac{1.00 \text{ lb}_m \cdot \left(600 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left(\frac{32.2 \text{ lb}_m \cdot \text{ft}}{\text{lb}_f \cdot \text{s}^2} \right)}$$

$$= 5.59 \times 10^3 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f$$

例1.1-3: 计算升高到一座30米高炉顶上的一公斤重的矿石的位能增量。

解: 质量为 m 的物体, 在重力场中在相对于某一任意的参考高度的高度 Z_1 , 具有位能 $E_{p,1}$ (参考高度常以海平面为准)。

$$E_{p,1} = m \cdot Z_1 \cdot g/g_c$$

同一物体在新的高度 Z_2 时,

$$E_{p,2} = m Z_2 \cdot g/g_c$$

位能的变化 ΔE_p 等于①

$$\Delta E_p = E_{p,2} - E_{p,1}$$

$$= m \cdot Z_2 \cdot g/g_c - m \cdot Z_1 \cdot g/g_c$$

$$= m(Z_2 - Z_1)g/g_c = m \cdot \Delta Z \cdot g/g_c$$

因此, 当 $\Delta Z = 30.0$ 米, 而 $m = 1$ 公斤,

(1) Handbook of Chemistry and Physics, 48th edition, Chemical Rubber Co., Cleveland, Ohio, 1968.

① 符号 Δ 在本书中用以表示有限的变化。符号 δ 或 d 用以表示无限小的变化或很小的变化。

$$\Delta E_p = 1.00\text{kg} \cdot 30.0\text{m} \cdot 9.81\text{m/s}^2 / (1.00 \text{ kg} \cdot \text{m/N} \cdot \text{s}^2) = 294\text{N} \cdot \text{m}$$

1.1.2 字首

国际单位制的另一优点是可以标准字首来表

示基本单位或衍生单位以满足需要较大或较小单位的情况。国际单位制的单位所使用的标准字首和它们的符号见表1.1-4。

表 1.1-4 国际单位制的标准字首

字 首	中 文 字 首	符 号	因 数
tera	太	T	$10^{12} = 1,000\ 000\ 000\ 000$
giga	吉	G	$10^9 = 1,000\ 000\ 000$
mega	兆	M	$10^6 = 1,000\ 000$
kilo	千	k	$10^3 = 1,000$
hecto	百	h	$10^2 = 100$
deka	十	da	$10^1 = 10$
deci	分	d	$10^{-1} = 0.1$
centi	厘	c	$10^{-2} = 0.01$
milli	毫	m	$10^{-3} = 0.001$
micro	微	μ	$10^{-6} = 0.000\ 001$
nano	纳	n	$10^{-9} = 0.000\ 000\ 001$
pico	皮	P	$10^{-12} = 0.000\ 000\ 000\ 001$
femto	飞	f	$10^{-15} = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 001$
atto	阿	a	$10^{-18} = 0.000\ 000\ 000\ 000\ 000\ 001$

字首一般选择因数的数值在0.1到1000之间。字首以10的三次方递升也是可以的。不可以用kJ这样的组合来代替GJ作为 10^9 焦耳的符号。

例 1.1-4: 当装了一千满铲矿石入炉, 而每铲为一公斤时, 计算装入炉中的炉料。

解: 总装入量 M' 应等于装入的铲数 n 乘以每铲上的质量 m 。

$$\begin{aligned} M' &= n \cdot m = 1000 \text{ 铲} \cdot \frac{1\text{kg}}{\text{铲}} \\ &= 1000\text{kg} = 1000 (1000\text{g}) = 10^6\text{g} \\ &= 1\text{Mg} \text{①} \end{aligned}$$

例 1.1-5: 如废烟道气以平均速度 5cm/s 从一条 50 厘米乘 100 厘米的长方形烟巷中排出, 计算在 100 秒内将排出多少体积废气。答案以立方米计。

解: 假如废气通过切面积为 A_0 的巷道, 其平均直线速度为 $\bar{v}$, 巷内气体的体积流量为 $\dot{V}$ 。 $\dot{V}$ 等于

$$\dot{V} = \bar{v} \cdot A_0$$

而离开烟巷的气体体积 V 在时间 τ 内等于

$$\begin{aligned} V &= \dot{V} \cdot \tau \\ &= \bar{v} \cdot A_0 \cdot \tau \end{aligned}$$

而长方形烟巷的宽为 w , 高为 h ,

$$A_0 = w \cdot h$$

$$\text{则 } V = \bar{v} \cdot w \cdot h \cdot \tau$$

$$\begin{aligned} &= \frac{5\text{cm}}{\text{s}} \cdot 50\text{cm} \cdot 100\text{cm} \cdot 100\text{s} \\ &= 2.5 \times 10^6 \text{cm}^3 \\ &= 2.5 \times 10^6 \cdot (1 \times 10^{-2}\text{m})^3 \\ &= 2.5 \times 10^6 \cdot (1 \times 10^{-6})\text{m}^3 \\ &= 2.5\text{m}^3 \end{aligned}$$

1.1.3 可接受的非国际单位制单位

虽然CGPM强烈建议只能使用国际单位制, 但是有许多其他的单位, 它们不是具有特殊意义, 就是已成为习惯, 应该可以使用, 不过应尽量少用。

国际单位制的体积是立方米或它的倍数, 已见表1.1-3。在一些情况下, 液体的体积可以用公升, 虽然 10^{-3} 立升称为毫升 ml, 但应该少使用公升这个单位, 更不可在前面随便加字首。

国际单位制的时间是秒, 但是根据日历周期, 分、小时或日也可以使用。习惯的速度单位如公里/小时也被认为可以使用。km/h的使用还受到强烈的支持。

在国际单位制中, 温度和温度差是以热力学的开氏标度来表示的, 因而温度的单位是开或开尔文K。但

① Mg既是镁的符号, 又是一兆克的符号, 这两种意义只能从它在文中的用途来区别。

是摄氏温标是被广泛使用的。因此,国际单位制也接受摄氏温标 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.4 型式

国际单位制的单位,符号,和字首的使用,已为许多实践所接受。本书将采用其建议的使用法和型式。如要更彻底地了解国际单位制单位的型式,推荐读者参考 ASTM Publication No. E380-76: Standards for Metric Practice (米制的实践标准)。

1.2 换算系数

从1.1节可以看到用几种不同的单位来形容某些因次是可能的。例如时间,可用国际单位制的秒,也

可以用可接受的非国际制的分或小时。这些单位之间必须存在着一个互相的关系,以便把一个单位换算为另一个。这种关系就称为换算系数。

可能有两种换算形式。第一种,一个单位乘以一个换算系数就变成另一单位。第二种,单位乘以换算系数再加上或减去一个必须的附加项目。

1.2.1 换算系数表

对某一个因次所使用的单位,可属于不同的单位制。单位之间的关系可由条约或单位的基本定义来确定。这些换算系数汇集表,以便科学家和工程师们使用。有用的换算系数一览列于表1.2-1。

表 1.2-1 一些有用的换算系数

因 次	下 列 单 位	乘 以	获 得 单 位
长 度	英寸 (in)	2.540000×10^{-2}	米 (m)
	英尺 (ft)	3.048000×10^{-1}	米 (m)
	码 (yd)	9.144000×10^{-1}	米 (m)
	英里 (mi)	1.609344×10^3	米 (m)
面 积	平方英寸 (in^2)	6.451600×10^{-4}	平方米 (m^2)
	平方英尺 (ft^2)	9.290304×10^{-2}	平方米 (m^2)
	平方码 (yd^2)	8.361274×10^{-1}	平方米 (m^2)
密 度	磅/立方英寸	2.767990×10^4	公斤/立方米 (kg/m^3)
	磅/立方英尺	1.601846×10^1	公斤/立方米 (kg/m^3)
	长吨/立方码	1.328939×10^0	兆克/立方米 (mg/m^3)
	克/立方厘米	1.000000×10^3	公斤/立方米 (kg/m^3)
能 量	英热单位 (Btu)	1.055056×10^0	千焦耳 (kJ)
	英尺磅 (力) ($\text{ft} \cdot \text{lb}_f$)	1.355818×10^0	焦耳 (J)
	千瓦一小时 (kWh)	3.600000×10^0	兆焦耳 (MJ)
	马力一小时 ($\text{hp} \cdot \text{h}$)	2.684520×10^0	兆焦耳 (MJ)
	卡 (cal)	4.186800×10^0	焦耳 (J)
	磅 (力) (lb_f)	4.448222×10^0	牛 顿 (N)
	公斤 (力) (kgf)	9.806650×10^0	牛 顿 (N)
	短吨 (力) (tonf)	8.896444×10^3	牛 顿 (N)
	磅 (力) 平方英寸 (lbf/in^2)	6.894757×10^3	牛顿/平方米 (N/m^2)
	英两 (常衡oz)	2.834952×10^1	克 (g)
力/单位面积质量	英两 (金衡oz)	3.110348×10^1	克 (g)
	磅 (常衡 lb_m)	4.535924×10^{-1}	公 斤 (kg)
	磅 (金衡 lb_m)	3.732417×10^{-1}	公 斤 (kg)
	英担, 长 (cwtlong)	5.080235×10^1	公 斤 (kg)
	英担, 短 (cwtshort)	4.535924×10^1	公 斤 (kg)
	长 吨	1.016047×10^0	兆 克 (Mg)
	短 吨	9.071847×10^{-1}	兆 克 (Mg)
	公 吨	1.000000×10^0	兆 克 (Mg)
	磅/分 (lb/min)	7.559873×10^{-3}	公斤/秒 (kg/s)
	磅/小时 (lb/h)	1.259979×10^{-4}	公斤/秒 (kg/s)
	磅/平方英尺 (lb_m/ft^2)	4.882428×10^0	公斤/平方米 (kg/m^2)
	磅/英尺 (lb_m/ft)	1.488164×10^0	公斤/平方米 (kg/m^2)
质量流率			
质量/单位面积			
质量/单位长度			

续表

因 次	下 列 单 位	乘 以	获 得 单 位
功	英热单位/小时 (BTu/h)	2.930711×10^{-1}	瓦 (w)
	马 力 (hp)	7.456999×10^{-1}	千 瓦 (kw)
压力差	磅/平方英寸 (psi)	6.894757×10^0	千 巴 (kPa)
	39.2°F时英寸水柱 (in. H ₂ O)	2.490820×10^{-1}	千 巴 (kPa)
	60°F时英寸汞柱 (in. Hg)	3.376850×10^0	千 巴 (kPa)
	大气压 (atm)	1.013250×10^2	千 巴 (kPa)
	短吨/平方英寸 (ton/in ²)	1.378952×10^1	兆 巴 (MPa)
	牛顿/平方毫米 (N/mm ²)	1.000000×10^6	千 巴 (kPa)
温度间隔	华氏度 (Δ°F)	5.555556×10^{-1}	摄氏度 (Δ°C)
	摄氏度 (Δ°C)	1.000000×10^0	开氏度 (ΔK)
速 度	英里/小时 (mi/h)	1.609344×10^0	公里/时 (km/h)
	英尺/分 (ft/min)	5.080000×10^{-3}	米/秒 (m/s)
	英尺/秒 (ft/s)	3.048000×10^{-1}	米/秒 (m/s)
体 积	立方英寸 (in ³)	1.638706×10^{-5}	立方米 (m ³)
	立方英尺 (ft ³)	2.831685×10^{-2}	立方米 (m ³)
	立方码 (yd ³)	7.645549×10^{-1}	立方米 (m ³)
体积 (液体)	液体英两 (u.s.) (oz)	2.957353×10^1	立方厘米 (cm ³)
	品 脱	4.731765×10^{-1}	立方分米 (dm ³)
	加 仑 (gal)	3.785412×10^0	立方分米 (dm ³)
	加 仑 (gal)	3.785412×10^{-3}	立方米 (m ³)
	升 (L)	1.000000×10^{-3}	立方米 (m ³)
体积流率	立方英尺/分 (ft ³ /min)	4.719474×10^{-4}	立方米/秒 (m ³ /s)
	加仑/分 (gal/min)	6.309020×10^{-5}	立方米/秒 (m ³ /s)
	加仑/分 (gal/min)	6.309020×10^{-2}	立方分米/秒 (dm ³ /s)
	加仑/分 (gal/min)	6.309020×10^1	立方厘米/秒 (cm ³ /s)
时 间	分 (min)	6.000000×10^1	秒 (s)
	小 时 (h)	3.600000×10^3	秒 (s)
	日	8.640000×10^4	秒 (s)
	年	3.153600×10^7	秒 (s)

1.2.2 因次方程式

从表1.2-1可见,

$$1.000000 \text{ 磅 (质)} = 4.535924 \times 10^{-1} \text{ 公斤} \quad (1.2-1)$$

因此, 下式也是正确的:

$$4.535924 \times 10^{-1} \text{ 公斤} / 1.000000 \text{ 磅 (质)} = 1.000000 \quad (1.2-2)$$

或

$$\frac{1.000000 \text{ 磅 (质)}}{4.535924 \times 10^{-1} \text{ 公斤}} = \frac{2.204622 \text{ 磅 (质)}}{1.000000 \text{ 公斤}} = 1.000000 \quad (1.2-3)$$

既然任何数量乘以 1 等于原来的数量, 则

$$3.15 \text{ 磅 (质)} = 3.15 \text{ 磅 (质)} \frac{4.535924 \times 10^{-1} \text{ 公斤}}{1.000000 \text{ 磅 (质)}} = 1.43 \text{ 公斤} \quad (1.2-4)$$

当只有一个换算系数时, 这种形式的应用是很容易进行的。当缺少一个换算系数, 并须用几个换算系数来达到要求的结果时, 就应采用近似的方程式。

因次方程式含有单位的数字和单位的类型二者。从给定的单位到新单位的换算是由乘以一系列换算系数来完成的。因次方程式组成换算方法并减少错误的可能性。

例 1.2-1: 一磅质量的水加热华氏^①一度所需的能量为一英热单位Btu。问把一克水加热开氏一度要多少卡?

解: 可用因次方程式把 BTu/lb_m · Δ°F 换算为 cal/g · Δk, 从表1.2-1找出换算系数。

^① 本书中华氏温度差的符号是Δ°F。同样Δ°C、ΔK和Δ°R相应是摄氏, 开氏和兰氏温度差, 它们的单位也相应是华氏、开氏和兰氏温度。

$$\begin{aligned}
 1.0 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \cdot \Delta^\circ\text{F}} &= 1.0 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \cdot \Delta^\circ\text{F}} \\
 &\cdot \left(\frac{1.000000 \Delta^\circ\text{F}}{5.555556 \times 10^{-1} \Delta\text{K}} \right) \left(\frac{1.055056 \text{kJ}}{1.000000 \text{Btu}} \right) \\
 &\cdot \left(\frac{1000 \text{J}}{\text{kJ}} \right) \cdot \left(\frac{1.000000 \text{cal}}{4.186800 \text{J}} \right) \\
 &\cdot \left(\frac{1.000000 \text{lb}_m}{4.535924 \times 10^{-1} \text{kg}} \right) \left(\frac{1 \text{kg}}{1000 \text{g}} \right) \\
 &= 1.0 \text{cal/g} \cdot \Delta\text{K}
 \end{aligned}$$

因此,使一克水升温一度K须供给一卡。

例1.2-2: 假如一座炼铁高炉以每天 1000 短吨的生产率生产铁水,计算每秒生产多少公斤。

解:

$$\begin{aligned}
 \frac{1000 \text{吨}}{\text{日}} &= \frac{1000 \text{吨}}{\text{日}} \cdot \left(\frac{9.071847 \times 10^{-1} \text{兆克}}{\text{吨}} \right) \\
 &\times \left(\frac{1000 \text{千克}}{\text{兆克}} \right) \left(\frac{1.0 \text{日}}{8.640000 \times 10^4 \text{秒}} \right) \\
 &= 10.5 \text{公斤/秒}
 \end{aligned}$$

因次方程式提供完成单位换算的模式,即组合换算系数。选择哪些系数是任意的,它们相乘的次序也是任意的,但无论如何方程式须表现出清楚扼要的换算过程。因式方程式可以减少错误,尤其是对没有这类计算经验的人更应特别建议使用它。

例1.2-3: 使用不同的换算系数重新计算例题1.2-1。

解:

$$\begin{aligned}
 1.0 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \cdot \Delta^\circ\text{F}} &= 1.0 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \cdot \Delta^\circ\text{F}} \\
 &\times \left(\frac{2.326000 \times 10^3 \text{J/kg}}{1.000000 \text{Btu/lb}_m} \right) \left(\frac{1.000000 \text{cal/g}}{4.186800 \times 10^3 \text{J/kg}} \right) \\
 &\times \left(\frac{1.800000 \Delta^\circ\text{F}}{1.000000 \Delta^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{1.000000 \Delta^\circ\text{C}}{1.000000 \Delta\text{K}} \right) \\
 &= 1.0 \text{cal/g} \cdot \Delta\text{K}
 \end{aligned}$$

1.2.3 换算方程式

某些单位的换算不能用因次方程式来完成。因为在这些换算中,在乘以换算系数的同时,还要加入或减去一个数量。两个因次的例子如温度和压力就经常需要使用换算方程式。在这些情况下,因为这些标度的发明者们把不同的标度的零点定在不同的位置上,而且单位的大小也不同,故需要使用换算方程式。

华氏和摄氏温度被称为相对温标,因为它们零点相对于一个任意标准——水的i-e点。基于最低绝

对温度——即相信是可以达到的、原子与分子在此不再有动能的温度——的温标称为绝对温标或热力学温标。有两种绝对温标常被使用,即兰氏和开氏温标。后者是更可取的国际标度。

开氏温标的温度单位K,与摄氏或百分温标的温度单位 $^\circ\text{C}$ 是相同的。因此,①

$$1.0 \Delta\text{K} = 1.0 \Delta^\circ\text{C} \quad (1.2-7)$$

同样

$$1.0 \Delta^\circ\text{R} = 1.0 \Delta^\circ\text{F} \quad (1.2-8)$$

摄氏和华氏温标的定义指出

$$100^\circ\text{C} = 212^\circ\text{F} \quad (1.2-9)$$

和

$$0^\circ\text{C} = 32^\circ\text{F} \quad (1.2-10)$$

从方程式(1.2-9)减去方程式(1.2-10)得

$$100 \Delta^\circ\text{C} = 180 \Delta^\circ\text{F} \quad (1.2-11)$$

或

$$1 \Delta^\circ\text{C} = 1.8 \Delta^\circ\text{F} \quad (1.2-12)$$

合并方程式(1.2-7)、(1.2-8)与(1.2-12),可见

$$1 \Delta\text{K} = 1.8 \Delta^\circ\text{F} \quad (1.2-13)$$

由于开氏和摄氏温标的零点是不同的,最后

$$T(\text{K}) - t_0 = \frac{1 \Delta^\circ\text{R}}{1 \Delta^\circ\text{F}} [t(^\circ\text{F}) - 0^\circ\text{F}] \quad (1.2-14)$$

其中 t_0 是把摄氏温标的零度移成开氏温标的零数的校正系数。同样

$$T(^\circ\text{R}) - t'_0 = \frac{1 \Delta^\circ\text{R}}{1 \Delta^\circ\text{F}} [t(^\circ\text{F}) - 0^\circ\text{F}] \quad (1.2-15)$$

从开氏温度到摄氏温度或反过来的换算, t_0 等于273.15K。从兰氏到华氏的换算 t'_0 等于459.58R。以上四种温标的比较见图1.2-1。

212	671.58	760毫米汞柱时水的沸点	373.15	100
$\Delta^\circ\text{F}=180$				$100=\Delta^\circ\text{C}$
32	491.58	水的冰点	273.15	0
0	459.58		255.38	-17.77
华氏 $^\circ\text{F}$	兰氏 $^\circ\text{R}$		开氏 K	摄氏 $^\circ\text{C}$
-459.58	0	绝对零度	0	-273.15

图 1.2-1 最常用温标(摘自参考文献(2)第19页)

① 见前页脚注中对温度差符号的讨论及各相应符号的意义。

例1.2-4: 101.325 千巴压力下 (一大气压), 金的熔点为国际实用温标 1337.58K。换算为 a) °C, b) °R 及 c) °F。

解: a) 重新排列方程式 (1.2-14) 得

$$t(^{\circ}\text{C}) = \frac{1.0\Delta^{\circ}\text{C}}{1.0\Delta\text{K}} [T(\text{K}) - t_0]$$

因此, 1337.58K 等于

$$\begin{aligned} t(^{\circ}\text{C}) &= \frac{1.0\Delta^{\circ}\text{C}}{1.0\Delta\text{K}} (1337.58\text{K} - 273.15\text{K}) \\ &= 1064.43^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

b) 由于开氏与兰氏温标的零点相同,
0K = 0°R

$$\text{及 } T(^{\circ}\text{R}) - 0^{\circ}\text{R} = [T(\text{K}) - 0\text{K}] \cdot \left(\frac{1.8\Delta^{\circ}\text{R}}{1.0\Delta\text{K}} \right)$$

$$\text{或 } T(^{\circ}\text{R}) = T(\text{K}) \cdot \left(\frac{1.8\Delta^{\circ}\text{R}}{1.0\Delta\text{K}} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{因此, } 1337.58\text{K} &= 1337.58\text{K} \left(\frac{1.8\Delta^{\circ}\text{R}}{1.0\Delta\text{K}} \right) \\ &= 2407.64^{\circ}\text{R} \end{aligned}$$

c) 重新排列方程式 (1.2-15) 得

$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{1.0\Delta^{\circ}\text{F}}{1.0\Delta^{\circ}\text{R}} [T(^{\circ}\text{R}) - 459.58^{\circ}\text{R}]$$

因此, 2407.64°R (见b) 小题) 等于

$$\begin{aligned} t(^{\circ}\text{F}) &= \frac{1.0\Delta^{\circ}\text{F}}{1.0\Delta^{\circ}\text{R}} (2407.64^{\circ}\text{R} - 459.58^{\circ}\text{R}) \\ &= 1948.06^{\circ}\text{F} \end{aligned}$$

例1.2-5: 证明温度读数 -40° 在摄氏和华氏温标上都是同一温度

解: 合并方程式 (1.2-14) 和 (1.2-15) 及 $T(^{\circ}\text{R}) = 1.8T(\text{K})$, 得到

$$t(^{\circ}\text{F}) = \frac{1.8\Delta^{\circ}\text{F}}{1.0\Delta^{\circ}\text{C}} \cdot t(^{\circ}\text{C}) + 32.0^{\circ}\text{F}$$

再设 $t(^{\circ}\text{F}) = t(^{\circ}\text{C}) = X$

$$X = 1.8x + 32^{\circ}\text{F}$$

或 $X = -40^{\circ}\text{F}$

$$\text{同时 } -40^{\circ}\text{F} = \frac{1.8\Delta^{\circ}\text{F}}{1.0\Delta^{\circ}\text{C}} \cdot t(^{\circ}\text{C}) + 32^{\circ}\text{F}$$

或 $t(^{\circ}\text{C}) = -40^{\circ}\text{C}$

因此, $t(^{\circ}\text{F})$ 与 $t(^{\circ}\text{C})$ 在 -40° 处是相同的。

压力也可以用几种不同单位的绝对或相对的标度来计量。压力读数的绝对标度是以完全真空或完全抽空的参考点来作零点的。相对标度用同样单位来测量压力, 但以某一标准大气压 1.01325 巴为零点。标准大气压的几种当量值列于表 1.2-2。几种最常用的压力标度之间的关系则列于图 1.2-2。

表 1.2-2 标准大气压的当量

1.000	大气压 (atm)
33.91	英尺水柱 (ftH ₂ O)
14.696	磅/英寸 ² 绝对值 (psia)
29.921	英寸汞柱 (inHg)
760.0	毫米汞柱 (mmHg)
1.013×10^3	巴 (Pa)

磅/英寸 ²								
↑	5.0	19.3	↑	39.3	10.2	0.34×10^5	↑	1.33×10^5
	0.4	14.7	标准压力	29.92	0.82	0.024×10^5		1.01×10^5
	0.0	14.3	气压表压力	29.1	0	0.0	0.00	0.98×10^5
	-2.45	11.85		24.1	-5.0	5.0	0.17×10^5	0.82×10^5
表压力			绝对压力					
			完全真空					
			绝对压力					
			表压力					
			真空					
			表压力					
			绝对压力					
	-14.3	0.0		0	-29.1	-29.1	0.98×10^5	0.00

图 1.2-2 气压表读数为 29.1 英寸汞柱时压力比较

图 (据文献 (2) 第 25 页)

例1.2-6: 将 1 托换算为 a) psia, b) psig, c) inHg (真空)。

解: 如压力的定义是单位面积上的力, 由一个物体施加于另一物体, 则在封闭管内的液柱作用于底面上的压力 P , 当柱高为 Z , 管的切面积为 A_0 时, 是

$$P = F/A_0$$

而

$$F = C \cdot M \cdot g$$

$$M = \rho \cdot V$$

及

$$V = A_0 \cdot Z$$

合并上列各方程式则得 $P = Z \cdot \rho \cdot g/g_c$, 其中 ρ 为柱中液体的密度, g 为重力加速度。一标准大气压的定义是: 在海平面上, 45° 纬度, 温度 273, 15K 时,

(2) D.M.Himmelblau, Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J. (1974).

① 在非常精细的温度工作中, 必须认可国际实用温标, 因为许多可获得的数据都以此为基础。由 CGPM 于 1968 年所承认的这一温标 (1975 订正版) 是根据某些“定义的固定点”以便校正仪器。这些固定点的温度是根据可获得的最好的热力学温度测定来确定的 (参考文献: Appendix SI, Standard for Metric Practice, ASTM Publication No. E-380—76。)

② 符号 psia 代表磅 (力) / 英寸² 绝对值, psig 代表磅 (力) / 英寸² 相对表压标度。

760.0毫米汞柱所产生的压力。在同样条件下,一毫米汞柱所产生的压力为一托。

a) 由上,当测出压力为绝对标度上的一托时,

$$1.0\text{托} = 1.0\text{托} \left(\frac{1.0\text{mmHg}}{1.0\text{托}} \right) \left(\frac{1.0\text{大气压}}{760.0\text{mmHg}} \right)$$

$$\times \left(\frac{14.696\text{psia}}{1.0\text{大气压}} \right)$$

$$= 1.9 \times 10^{-2}\text{psia}$$

b) 表压以同样单位测出,只是零点不同,

$$1.0\Delta\text{psia} = 1.0\Delta\text{psig} \textcircled{1}$$

$$\text{及 } P(\text{psig}) = \frac{1.0\Delta\text{psig}}{1.0\text{psia}} \cdot (P(\text{psia}) - 14.696\text{psia})$$

$$= 14.677\text{psig}$$

c) 真空压力通常是以大气压以下的压差来表示的。与b)题比较,真空压力以表压计应为14.677磅/英寸²(真空)。真空压力以英寸汞计(符号in.Hg(真空))应与之相等。②

$$1.0\text{托} = 14.677\text{psig(真空)} \left(\frac{6.894757 \times 10^3 \text{巴}}{1.0\text{psig}} \right)$$

$$\times \left(\frac{1.0\text{in.Hg(真空)}}{3.38638 \times 10^3 \text{巴}} \right)$$

$$= 29.88\text{in.Hg(真空)}^{**}$$

例1.2-7: 桶中盛有1600°C的铁水,高10英尺。计算桶底上金属静压头(压力)。

解: 液体中给定深度处的压头或压力与前面例题中所述完全相同。

$$P = Z \cdot \rho \cdot g/g_c$$

其中Z为浸没深度,ρ为液体密度。假如铁水在1600°C时的密度为489lb_m/ft³,则金属静压头将等于

$$P = (10\text{ft})(489 \cdot \text{lb}_m/\text{ft}^3)(32.174\text{ft/s}^2)(1\text{ft}^2/144\text{in}^2)/(32.174\text{lb}_m \cdot \text{ft}/\text{lb}_f \cdot \text{s}^2) \\ = 34.0\text{Psig}$$

1.3 克分子单位或摩尔单位

按1960年CGPM所订立的定义:一克分子是“一种物质的数量,含有和0.012公斤碳-12中相同原子数目的基本物质(如原子、分子等)”。此数目已被求得为 6.02252×10^{23} ,称为阿弗加德罗数(符号 N_0)。因此克分子的另一定义是:含有阿弗加德罗数的基本粒子的物质。在国际单位制中,克分子的符号是mol。

个别原子的质量是以原子质量单位(符号为a.m.u.)为基本单位的标度来计量的。在这标度下,一个碳-12原子的质量是12a.m.u.。从定义来说,

一克分子的碳原子具有0.012公斤的质量,而一克分子的碳原子含有 N_0 个原子。

$$12\text{g} = 1.0\text{molC} \left(\frac{N_0\text{原子C}}{1.0\text{molC}} \right) \left(\frac{12\text{a.m.u.}}{1.0\text{原子C}} \right) \quad (1.3-1)$$

$$1.0\text{g} = N_0\text{a.m.u} \quad (1.3-2)$$

或 $1\text{a.m.u.} = 1.66043 \times 10^{-24}\text{g(克)} \quad (1.3-3)$

例1.3.1: 铀原子的质量是238.03a.m.u.,计算一克分子铀的质量。

解: 由于一克分子的铀含有 N_0 个原子,而每个铀原子的质量是238.03a.m.u.,一克分子铀原子的质量m将等于

$$m = \frac{N_0\text{原子}}{1.0\text{克分子}} \cdot \frac{238.23\text{a.m.u.}}{\text{原子}} \cdot \frac{1.0\text{克}}{N_0\text{a.m.u}} \\ = 238.03\text{克/克分子}$$

克分子的另一定义可从前例的解答中看到。一克分子的原子(分子)是该物质的量,当此物质的质量以克计时,数值上与物质的一个原子的质量以原子质量单位计的数值是相同的。国际单位制中使用的克分子单位以前称为克分子(符号g-mol),因为物质的量,其质量以克计时,与其每个原子(分子)的质量以原子质量单位计时是相同的。

美国工程单位制中另一普通单位是磅-分子(符号lb-mol)。这个物质的量定义为物质的质量以磅计算的时候,与一个原子(分子)的质量以原子质量单位计算时的数值相同。同样的定义可用于公斤-分子,吨-分子等。

使用国际制中克分子单位时,必须小心。从上面的讨论中可见,虽然国际单位制中质量的单位是公斤,摩尔单位却相当于克分子。

例1.3-2: 一磅-分子的锌含有多少克-分子锌? 锌的原子质量是65.37原子质量单位。

解: 按磅-分子的定义,

$$1.0\text{磅-分子锌} = 65.37\text{磅(磅)}\text{ 锌}$$

$$= 65.37\text{磅(磅)}\text{ 锌} \left(\frac{453.5924\text{克}}{1.0\text{磅(磅)}} \right) \left(\frac{1.0\text{克分子锌}}{65.37\text{克锌}} \right)$$

$$= 453.5924\text{克分子锌}$$

在工程计算中,设一磅-分子含454克分子或 $454 \times 6.023 \times 10^{23}$ 原子。同样,一公斤-分子含1000克分子或 $1000 \times 6.023 \times 10^{23}$ 原子。

① 对温度差所用的术语,也用于压力差。见前例1.2-1脚注。

② 压力读数是汞在0°C的。在不同的温度下,汞的压力读数会有微小的不同。

1.4 密度与浓度

前节中述及克分子单位确定了某一给定质量的物质的量。但是常常需要知道在给定体积中含有多少物质, 即其密度; 或者在一物质中含有多少另一物质, 即其浓度。这些量的单位将在本节内讨论。

1.4.1 密度

气体、液体或固体的密度是它的单位体积中的质量。在国际单位制中, 密度的单位是公斤/米³。但是密度也可以定为一个纯数, 即没有单位的数字, 称为比重。它等于有关物质的密度与参考物质的密度之比。水是经常被用来作为参考物质以确定某一固体或液体的比重的。在多数计算中, 水在0°~45°C之间的密度是使用1.000克/厘米³这个值。对气相则常用空气为参考物质。干空气的密度以公斤/米³计算时, 等于①

$$\rho_{\text{空气}} = \frac{1.293}{1.0 + 0.00367t} \cdot \frac{H}{760} \quad (1.4-1)$$

其中 t 为摄氏温度, H 为以毫米汞柱计的的压力。更为精确的水和潮湿空气的密度值可从“化学与物理手册”中查到(见1.1.1节脚注)。

比容可以用来代替密度。比容为单位质量的物质的体积, 在国际单位制中, 其单位为米³/公斤。比容很明显地是密度的倒数。

1.4.2 浓度

在多数过程中, 加入和产出的物料并非纯的, 而是两种或以上物料的混合物或溶液。整个过程物流的组分是以其重量(或摩尔数)与总物料(或过程物流)的总重量(或总摩尔数)的关系来确定的。

对固体或液体, 混合物中一个组分的浓度常用其重量分数或重量百分率表示。组分A的重量分数等于

$$W_A = \frac{\text{混合物中A的重量}}{\text{混合物总重}} \quad (1.4-2)$$

组分A的重量百分率(符号wt%或s/o)等于

$$\text{wt}\%A = w/o A = 100 \times W_A \quad (1.4-3)$$

对很稀的混合物所常用的另一浓度单位是百万分率(符号ppm)。

$$\text{p.p.m.}A = 10^4 \cdot w/o A = 10^6 \cdot W_A \quad (1.4-4)$$

除非另下定义, 否则在本书中固体和液体的浓度均以重量为基础。

气体分析的规范常用摩尔百分率或摩尔分数。A的摩尔分数等于

$$X_A = \frac{\text{混合物中A的摩尔数}}{\text{混合物总摩尔数}} \quad (1.4-5)$$

A的摩尔百分率等于

$$\%A = 100 \cdot X_A \quad (1.4-6)$$

从重量分数到摩尔分数或反过来的换算, 可用下列方程式完成

$$X_i =$$

$$\frac{W_i / MW}{(W_A / MW_A) + (W_B / MW_B) + \dots + (X_i \cdot MW_i) + \dots} \quad (1.4-7)$$

及 $W_i =$

$$\frac{X_i \cdot MW_i}{(X_A \cdot MW_A) + (X_B \cdot MW_B) + \dots + (X_i \cdot MW_i) + \dots} \quad (1.4-8)$$

其中 $X_A, X_B, \dots, X_i, \dots$, 相应地为组分A, B, ..., i, ...等的摩尔分数。 $W_A, W_B, \dots, W_i, \dots$, 相应地为组分A, B, ..., i, ...等的重量分数。 $MW_A, MW_B, \dots, MW_i, \dots$, 相应地为组分A, B, ..., i, ...等的分子量。②

例1.4-1: 计算可容十公斤铁、铬和镍粉的坩埚的容积(cm^3)。混合物的组成是铬 18%, 镍 8%, 铁 74%。假设粉粒之间的空隙占坩埚总容积的60%。铬、镍和铁的比重分别为7.1, 8.9, 7.7。

解: 合并方程式(1.4-2)和(1.4-3), 可得混合物中A的重量 = $(w/o A)/100$ (混合物总重)。由而须装入铬 1.8公斤, 镍 0.8公斤, 铁 7.4公斤。然后计算各项所占的体积:

$$(1.8\text{kgCr})(10^3\text{g/kg})(1\text{cm}^3/7.1\text{g Cr}) = 254\text{cm}^3$$

$$(0.8\text{kgNi})(10^3\text{g/kg})(1\text{cm}^3/8.9\text{g Ni}) = 90\text{cm}^3$$

$$(7.4\text{kgFe})(10^3\text{g/kg})(1\text{cm}^3/7.7\text{g Fe}) = 961\text{cm}^3$$

$$\text{金属所占总体积} = 1305\text{cm}^3$$

$$\begin{aligned} \text{需要的坩埚总容积} &= \frac{1305\text{cm}^3 \text{金属}}{0.4\text{cm}^3 \text{金属}/\text{cm}^3 \text{总装料}} \\ &= 3263\text{cm}^3 \end{aligned}$$

例1.4-2: 计算含铬 18%, 镍 8%, 铁 74% 的混合物的摩尔百分率。

解: 对三组分系统, 合并方程式(1.4-3), (1.4-6)和(1.4-7)得

$$\%A =$$

$$\frac{w/oA/MW_A}{(W/oA/MW_A) + (w/oB/MW_B) + (w/oC/MW_C)}$$

① 符号 ρ 用为密度或比重。数量间的差异由确定密度的单位而产生。

② 第二章中有物质分子量的完整定义。

B及C的关系与上相同, 铬、镍与铁的分子量分别为52, 59及56, 则

$$\begin{aligned}\%Cr &= \frac{18/52}{18/52 + 8/59 + 74/56} \\ &= 19\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\%Ni &= \frac{8/59}{18/52 + 8/59 + 74/56} \\ &= 8\%\end{aligned}$$

求差 $\%Fe = 100 - 19 - 8$
 $= 73\%$

另一个有时很有用的方法是求出所有的每一组分的摩尔数和总摩尔数。合并方程式(1.4-5)和(1.4-6)得

$$\%A = 100\% \frac{\text{混合物中A的摩尔数}}{\text{混合物的总摩尔数}}$$

在本题中, 铬的摩尔数 N_{Cr} 等于

$$\begin{aligned}N_{Cr} &= M_{Cr} / MW_{Cr} \\ &= 1.8\text{lb}_m / (52\text{lb}_m / \text{lb-mol}) \\ &= 0.0347\text{lb-mol}\end{aligned}$$

同样计算 N_{Ni} 为0.0136, N_{Fe} 为0.1321lb-mol,

$$\begin{aligned}N_T &= N_{Cr} + N_{Ni} + N_{Fe} \\ &= 0.0347 + 0.0136 + 0.1321 \\ &= 0.1804\end{aligned}$$

最后, 铬的分子百分率等于

$$\%Cr = 100\% \cdot 0.0347 / 0.1804 = 19\%$$

同样计算镍和铁的分子百分率。

注: 在此计算中使用了磅-分子, 但是只要注意全部计算中单位一致, 摩尔、公斤-分子等也同样应用。

本书中气体的分析都将用分子为基础, 除非另有说明。不过将在第二章说明, 在大多数冶金过程的温度和压力情况下, 以容积为基础的气体分析数字实际上与用分子为基础的完全相同。因此, 气体中组分*i*的分子分数将等于

$$X_i = \frac{V_i}{V_T} \quad (1.4-8)$$

其中 V_i 为组分*i*的体积; V_T 为气体的总体积, 包括组分*i*在内。

气体分析经常地以干样报告, 即所给出的百分率是对除水分以外的全部组分的。因而气体的水分定义为每单位体积或每克分子中的含水量。水分含量的常用单位是每立方米若干克或每立方英尺若干格令。

$$1 \text{ 格令 (grain)} = 6.479891 \times 10^{-5} \text{ 公斤} \quad (1.4-9)$$

必须注意明确水分含量是每单位干气体或湿气体的。

例1.4-3: 一大槽气体含CO 10公斤, CO₂ 10公斤,

H₂O 0.2公斤, 和N₂ 78.0公斤。计算干基分析数字和每公斤-分子干气体含水气多少格令。

解: 要获得用分子百分率表示的干气体分析数字, 除水以外的其他各种气体的质量都要换算成摩尔数。

$$\begin{aligned}N_{CO} &= M_{CO} / MW_{CO} \\ &= 10\text{kgCO} / (28\text{kgCO} / \text{kg-molCO}) \\ &= 0.36\text{kg-molCO}\end{aligned}$$

同样计算得

$$\begin{aligned}N_{CO_2} &= 0.23\text{kg-molCO}_2 \\ N_{N_2} &= 2.79\text{kg-molN}_2\end{aligned}$$

然后, 在干基础上, 即不包括水分,

$$\begin{aligned}N_T &= N_{CO} + N_{CO_2} + N_{N_2} \\ &= 0.36 + 0.23 + 2.79 \\ &= 3.38\text{公斤-分子}\end{aligned}$$

从方程式(1.4-5)和(1.4-6)可见

$$\begin{aligned}\%CO &= 100\% \cdot N_{CO} / N_T \\ &= 100\% \cdot 0.63 / 3.38 \\ &= 10.7\%\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\%CO_2 &= 100\% \cdot 0.23 / 3.38 \\ &= 6.8\%\end{aligned}$$

及

$$\begin{aligned}\%N_2 &= 100\% \cdot 2.79 / 3.38 \\ &= 82.5\%\end{aligned}$$

最后, 除水外, 有3.38公斤-分子气体, 另有水分0.2公斤, 或

$$\begin{aligned}&\left(\frac{0.2\text{公斤H}_2\text{O}}{3.38\text{公斤-分子干气体}} \right) \left(\frac{1 \text{ 格令}}{6.48 \times 10^{-5} \text{ 公斤}} \right) \\ &= 913 \text{ (格令H}_2\text{O/公斤-分子干气体)}\end{aligned}$$

注: 连水分在内, 总共有3.39公斤-分子气体, 如按湿基计算(0.2公斤H₂O/3.39公斤-分子气体)(1格令/6.48×10⁻⁵公斤)

$$= 910 \text{ 格令H}_2\text{O/公斤-分子气体在槽中}.$$

水分含量也可以气体的部分压力或相对湿度来表示。部分压力的定义将在第二章中详细讨论。目前只须假设理想气体的行为, 在理想气体的情况下, 在一包含水分共有 N_T 克分子的混合气体中, H₂O的克分子数 N_{H_2O} , 与水分的部分压力 P_{H_2O} , 和总压力 P_T 的关系以下列方程式来表示

$$X_i = \frac{N_{H_2O}}{N_T} \cdot \frac{P_{H_2O}}{P_T} \quad (1.4-10)$$

在空气或任何气体中所能含有的水分量是受气体的温度和压力的限制的。这一限度称为饱和压力, 而在气体中实际存在的这一最高值的分数或百分率则称为相对湿度。对空气的饱和压力值列于“化学与物理手册”中(参考文献(1), 见1.1.1节脚注)。

例1.4-4: 在寒冷的冬天,空气的露点会达到40°F,而在炎热的夏天,会达到80°F。计算在这两种条件下干空气中所含的水蒸气含量,以每克分子中含多少克为单位。

解: 露点是当气体冷却时水蒸气开始凝结的温度,也就是 H_2O 的部分压力等于饱和压力的温度。在40°F时,饱和压力大约是表压0.123磅/英寸²。因此,假如大气压力是一个大气压或者表压14.696磅/英寸²,在一克分子含水气体中含多少克分子水,可以从方程式(1.4-10)求出

$$\frac{N_{H_2O}}{N_t} = \frac{P_{H_2O}}{P_t}$$

或

$$N_{H_2O} = 1.0 \text{ mol} \left(\frac{0.123 \text{ psig}}{14.696 \text{ psia}} \right) \left(\frac{1.0 \text{ psia}}{1.0 \text{ psig}} \right) \\ = 8.37 \times 10^{-3} \text{ mol } H_2O$$

H_2O 的质量则等于

$$M_{H_2O} = 8.37 \times 10^{-3} \text{ mol } H_2O \left(\frac{18 \text{ g } H_2O}{1.0 \text{ mol } H_2O} \right) \\ = 0.151 \text{ g } H_2O$$

此数即在一克分子含水气体所含 H_2O 的质量。在一克分子干气体中所含 H_2O 的质量应等于

$$m_{H_2O} = 0.151 \text{ g } H_2O / (1.0 - 8.37 \times 10^{-3}) \text{ mol 干气体} \\ = 0.152 \text{ g } H_2O / \text{克分子干气体}$$

在80°F, 饱和压力大致是0.502 psig, 用同样的计算方法可得

$$m_{H_2O} = 2.84 \text{ g } H_2O / \text{克分子干气体}$$

最后,许多冶金过程都有包含固体与液体的混合物形成的物流或产品流。这种混合物称为泥浆(或矿浆)。泥浆中固体的浓度以泥浆总重量的百分率(符号 w/oS)或泥浆总体积的百分率(符号 v/oS)表示。对水泥浆而言(即固体在水中),固体的体积百分率,重量百分率,固相比重(符号 ρ_s)和泥浆混合物比重(符号 ρ_m)之间的关系如下:

$$v/oS = \frac{100}{1 + \rho_s \cdot \left(\frac{100 - w/oS}{w/oS} \right)} \quad (1.4-11a)$$

$$= 100 - \rho_m (100 - w/oS) \quad (1.4-11b)$$

$$= 100 \left(\frac{\rho_m - 1}{\rho_s - 1} \right) \quad (1.4-11c)$$

$$= w/oS \cdot \rho_m / \rho_s \quad (1.4-11d)$$

$$w/oS = \frac{v/oS \cdot \rho_s}{1 + 0.01 \cdot v/oS \cdot (\rho_s - 1)} \quad (1.4-12a)$$

$$= 100 \left(\frac{\rho_m - 1}{\rho_m} \right) \left(\frac{\rho_s}{\rho_s - 1} \right) \quad (1.4-12b)$$

$$= 100 \left(\frac{100 - v/oS}{\rho_m} \right) \quad (1.4-12c)$$

$$= v/oS \cdot \rho_s \cdot \rho_m / \rho_m \quad (1.4-12d)$$

使用图1.4-1可确定上述四个变量中的任何两个。在图上定出两个已知值后,作一连接这两点的直线通过全图。另两个交点给出两变量的值。

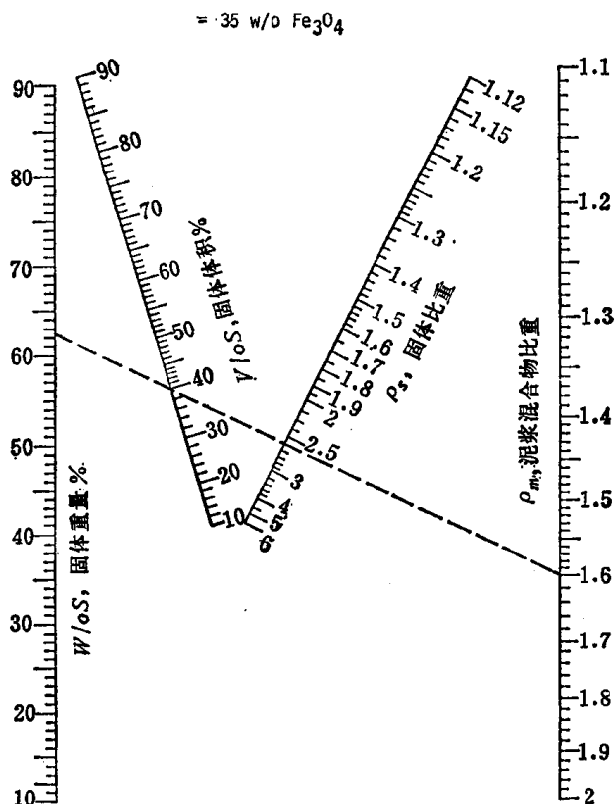


图 1.4-1 泥浆性质计算图表

例1.4-5: 计算要配成比重为1.4的矿浆,100磅水需加多少磁铁矿(符号 Fe_3O_4)。磁铁矿比重为5.2。

解: 已知 $\rho_s = 5.2$, $\rho_m = 1.4$, 代入方程式(1.4-11b)

$$w/oS = \left(\frac{1.4 - 1.0}{1.4} \right) \left(\frac{5.2}{5.2 - 1.0} \right) \\ = 35 w/oFe_3O_4$$

然后,假如泥浆质量 M_m 的其余65%是水,

$$\frac{M_m}{M_{H_2O}} = \frac{100\%}{65\%}$$

或

$$M_m = 100 \cdot 100 / 65 \\ = 154 \text{ 磅}$$

故磁铁矿质量等于

$$M_{Fe_3O_4} = M_m - M_{H_2O} \\ = 54 \text{ 磅}$$

例1.4-6: 计算含石灰为40%(体积)的泥浆的比