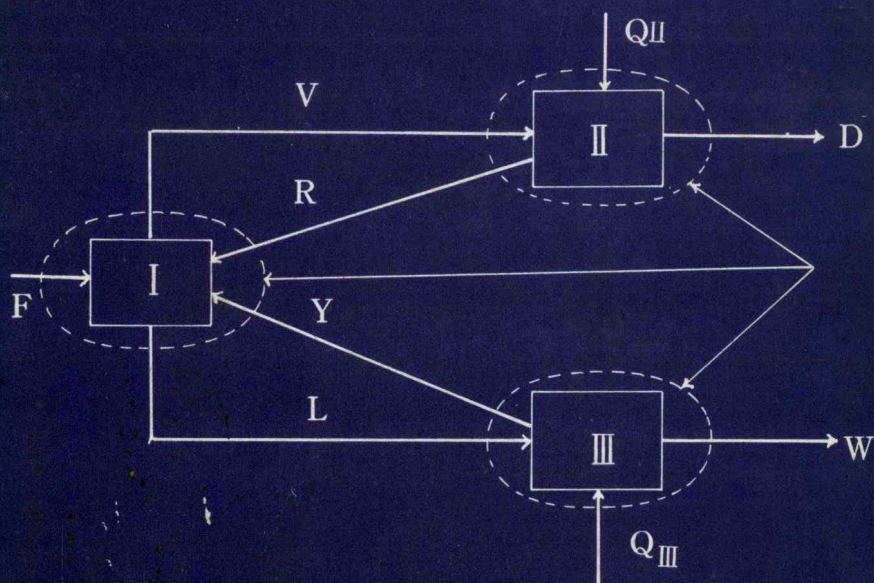


質能均衡

姚東權 編著



總經銷 大學圖書供應社

質能均衡

姚東權編著

總經銷 大學圖書供應社

質 能 均 衡

中華民國 68 年 1 月初版

編著者
發行人
出版者

總經理

印刷者

姚林國彰
地址：台中市文華路七三號
局版台業字 0226 號
大學圖書供應社
地址：台中市文華路七三號
電話：(042) 240273
郵政劃撥：中市 23123 號
東洋印刷廠
台中市自治街 145 號
電話：(042) 228167

定價 **150**

序

質能均衡乃化學工程中最基本、最重要之計算原理，因此其真正的名字應為「化工計算原理」，為化工科系學生必須修習之入門課程。本書介紹解題及計算的技巧，化工資料的運用，同時灌輸學生一些基本的化工知識，使學生瞭解化工程序中質量與能量之輸入、輸出、生成及堆積之觀念，並訓練學生運用質量及能量不滅定律，進行化工程序中質能結算之問題。如能好好研讀本書必可奠定學習化工之良好基礎。

本書係依照一般大學及工專質能均衡課程之教材大綱，編寫而成，適合作為大學、五專及二專化工科系質能均衡每週3小時，一學期之課程教材。亦可作為化學工程之參考教材，且本書內容豐富，圖文並茂，

質能均衡 目 錄

序

第一章 化工計算基本概念

§ 1 - 1	因次及單位.....	1
1 - 1 - 1	單位系統.....	2
1 - 1 - 2	SI 制.....	3
1 - 1 - 3	cg s 制.....	5
1 - 1 - 4	美國工程制.....	5
1 - 1 - 5	單位換算.....	8
§ 1 - 2	莫耳.....	9
§ 1 - 3	密度，比重及比容.....	11
§ 1 - 4	濃度.....	13
1 - 4 - 1	莫耳分率及重量分率.....	13
1 - 4 - 2	成份分析.....	14
1 - 4 - 3	濃度.....	17
§ 1 - 5	溫度.....	17
§ 1 - 6	壓力.....	23
§ 1 - 7	選擇基量.....	31
§ 1 - 8	化學方程式與化學計量.....	34
1 - 8 - 1	不完全反應及過量反應物.....	37
§ 習題		42

第二章 物質均衡

2 質能均衡

§ 2 - 1	物質均衡	50
§ 2 - 2	物質均衡問題之分析方法	51
§ 2 - 3	可直接求解之問題	54
§ 2 - 4	利用代數法求解之問題	61
§ 2 - 5	包含結質之問題	66
§ 2 - 6	回流計算法	72
§ 2 - 7	分流及排放計算法	77
§ 習題		81

第三章 氣體、蒸氣、飽和及濕度

§ 3 - 1	理想氣體定律	89
3 - 1 - 1	標準狀況	90
3 - 1 - 2	理想氣體常數 R	93
3 - 1 - 3	氣體之密度與比重	98
3 - 1 - 4	理想氣體混合物	101
§ 3 - 2	真實氣體之 $P-V-T$ 關係	104
3 - 2 - 1	狀態方程式	106
3 - 2 - 2	壓縮因子	110
3 - 2 - 3	氣體混合物	124
§ 3 - 3	蒸氣壓	133
3 - 3 - 1	溫度對蒸氣壓之影響	137
3 - 3 - 2	壓力對蒸氣壓之影響	138
§ 3 - 4	飽和	139
§ 3 - 5	部份飽和與濕度	144
3 - 5 - 1	相對飽和度 (相對濕度)	146
3 - 5 - 2	莫耳飽和度 (莫耳濕度)	147
3 - 5 - 3	濕度	147
3 - 5 - 4	百分飽和度 (百分濕度)	148

§ 3 - 6 含有氣化及凝結之質量均衡問題	151
§ 習題	157

第四章 能量均衡

§ 4 - 1 單位及基本觀念	162
4 - 1 - 1 單位	162
4 - 1 - 2 基本觀念	163
§ 4 - 2 熱容	171
§ 4 - 3 無相變化時焓值之計算	179
4 - 3 - 1 熱容方程式	179
4 - 3 - 2 平均熱容	180
4 - 3 - 3 混合氣體焓值之計算	181
4 - 3 - 4 焓值表或圖	185
§ 4 - 4 有相變化時之焓值	192
4 - 4 - 1 熔解熱	192
4 - 4 - 2 氣化熱	193
§ 4 - 5 能量均衡	197
§ 4 - 6 標準反應熱	209
4 - 6 - 1 標準生成熱	210
4 - 6 - 2 標準燃燒熱	212
4 - 6 - 3 恒壓及恒容標準反應熱	215
4 - 6 - 4 不完全反應	216
4 - 6 - 5 各種溫度下之反應熱	218
4 - 6 - 6 絕熱反應溫度	226
§ 4 - 7 溶解熱及混合物	229
4 - 7 - 1 理想溶液	229
4 - 7 - 2 真實溶液	229
§ 習題	241

4 質能均衡

第五章 質能均衡綜合應用

§ 5-1 質能均衡公式之綜合應用	248
§ 5-2 焓-濃度圖	255
5-2-1 焓-濃度圖之製作	258
5-2-2 使用焓-濃度圖之圖解法	269
§ 5-3 濕度圖及其應用	276
§ 習題	290

第六章 非穩定狀態之質能結算

§ 6-1 非穩定狀態之質量均衡公式	295
§ 6-2 非穩定狀態之能量均衡公式	297
§ 6-3 非穩定狀態之質能結算	297
§ 習題	308

附 錄

A. 變換因子	310
B. 原子序及原子量	312
C. 蒸氣表	314
D. 各種有機及無機物之物理性質	315
E. 熱容數據	328
F. 生成熱與燃燒熱	333
G. 蒸氣壓	338
H. 溶解熱及稀釋熱	339
I. 焓-濃度數據	341

第一章 化工計算基本概念

1-1 因次 (*Dimension*) 及單位 (*Unit*)

讀者以前可能較注重於解題技巧而對於單位之使用則不太重視。本書之開始，就要強調單位之正確及靈活運用。要知道，即使解題技巧如何正確迅捷，單位用錯，照樣徒勞無功。依照經驗，很多學生解題方法並無錯誤，但解出之結果却非所求，推究其原因，大都是單位運算發生錯誤所致。正確地使用單位，不但符合邏輯，並且有助於正確地分析問題，而得到真正之解答。

在化工化學之計算上，常使用到一些度量的基本概念，(*Basic Concept of Measurement*) 像時間(*t*)，質量(*M*)，長度(*L*)及溫度(*T*)，這些基本概念，我們稱之為因次 (*dimensions*) 。而用來表達因次的，稱為單位 (*units*) ，像公尺，公分為表達長度之單位，公斤，公克為表達質量之單位，小時，分及秒為表達時間之單位。

本書演算問題時，數字間之運算均帶有單位，不僅只是便利讀者閱讀，以後讀者將可發現，使用單位演算問題時，有許多好處：

- (1)減少計算錯誤。
- (2)減少一些不必要之中間計算，節省計算時間。
- (3)能清楚地了解題目，毋須死記公式。
- (4)能顯示出數字所代表之物理意義。

單位應用的原則非常簡單，即“屬於不同因次的單位，不能進行加減乘除等數學運算”。例如呎與磅不可互相加減。相同因次之不同單位要運算時，亦須先將之轉換成相同之單位，才可加減乘除。

$$\text{例如 } 1 \text{ 小時} + 30 \text{ 分} = 60 \text{ 分} + 30 \text{ 分} = 90 \text{ 分}$$

$$\text{或} \quad \quad \quad = 1 \text{ 小時} + 0.5 \text{ 小時} = 1.5 \text{ 小時}$$

1-1-1 單位系統 (*Systems of Units*)

由於地理位置及風俗習慣之不同，各地方之人民對於單位之使用，常採用不同之單位系統，像在台灣市場上仍習慣使用台斤及台尺。常用之單位系統列於表 1-1。單位系統之莫衷一是，對於文化之交

表 1-1 常用之單位系統表

因次 單位	長度	時間	質量	力	能量	溫度
Cgs 制	cm	sec	g	dyne (達因)	erg, joule, calorie (耳格)(焦耳)(卡)	°K, °C
FPS 制	ft	sec	lb	poundle (磅達)	ft poundle (呎磅達)	°R, °F
SI 制	m	sec	kg	N (牛頓)	焦耳	°K, °C
英國工程制	ft	sec	slug	磅重	Btu, ft-lb _r (呎磅)	°R, °F
美國工程制	ft	sec	lb _m	lb _r (磅力)	Btu, ft-lb _r	°R, °F

表 1-2 基本單位換算表

因次	美國工程制	美工程制換算 成 cgs 制	SI 制和 cgs 制	由美工程制 換算成 SI 制
長度	12 in = 1 ft 3 ft = 1 yd 5280 ft = 1 mi	2.54 cm = 1 in	10 mm = 1 cm 100 cm = 1 m	3.28 ft = 1 m
體積	1 ft ³ = 7.48 gal	(2.54 cm) ³ = (1 in) ³	1000 cm ³ = 1 l	35.31 ft ³ = 1.00 m ³
密度	1 ft ³ H ₂ O = 62.4 lb _m	—	1 cm ³ H ₂ O = 1 g 1 cm ³ H ₂ O = 1000 kg	—
質量	1 ton _m = 2000 lb _m	1 lb = 454 g	1000 g = 1 kg	1 lb = 0.454 kg
時間	1 min = 60 sec 1 hr = 60 min	—	1 min = 60 sec 1 hr = 60 min	—

流溝通，確有許多不便之處。以往曾因電學和磁學所用單位不同，而引起許多問題，國際間曾有多次之會議，要求訂定一標準統一之單位系統，直到1960年，才決議採用“國際單位制度”(International System of Units)，簡稱SI制(SI Units)，做為標準單位，現各國皆採用SI制。但是美國之化工界及石油工程界，習慣使用美國工程制(American Engineering System)，已行之有年，一時之間尚無法完全改採SI制。美國工程制仍有其影響力，故讀者對於這兩種系統及其單位之換算，應熟習之。

1-1-2 SI制

又稱MKS制，即長度使用公尺(m)做為基本單位，質量使用公斤(Kg)做為基本單位，時間使用秒(sec)做為基本單位。根據牛頓運動定律

$$\begin{aligned} F &= ma \\ &= (kg)(m/sec^2) \end{aligned}$$

力之單位為(kg)(m)/ sec^2 ，定為1牛頓(Newton)，即

:

$$1\text{ N} = (1\text{ kg})(1\text{ m}/\text{sec}^2) = 1(\text{kg})(\text{m})/\text{sec}^2$$

牛頓之單位係由長度，質量及時間等基本量導出而來，故又稱為導出量。

1 Kg物質所具有之重量，為該物質所受之重力，故：

$$\begin{aligned} F &= mg \\ &= (1\text{ kg})(9.81\text{ m}/\text{sec}^2) \\ &= 9.81\text{ N} \end{aligned}$$

能量的單位，根據功之定義：

$$\begin{aligned} W &= FS \\ &= (\text{N})(\text{m}) \end{aligned}$$

將牛頓·米，($\text{N})(\text{m})$ 定為1焦耳Joule，即

4 質能均衡

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m} = 1 (\text{N} \cdot \text{m})$$

熱 (Heat) 之單位，使用卡 (cal)，卡與焦耳之關係為

$$1 \text{ cal} = 4.184 \text{ J}$$

SI 制的較大或較小之單位，可利用乘上 10 之冪數並冠以字首 (Prefix) 表示：例如千米 (kilometer) 以 km 表示，毫米 (milli-meter) 以 mm 表示，百萬克 (megagram) 以 Mg 表示，千牛頓 (kilonewton) 以 kN 表示，如表 1—2 所示。

$$\begin{array}{lll} 1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}, & 1 \text{ km} = 1000 \text{ m} & 1 \text{ mm} = 0.001 \text{ m} \\ & = 10^3 \text{ m} & = 10^{-3} \text{ m} \\ 1 \text{ Mg} = 10^6 \text{ g} & 1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg} & 1 \text{ kN} = 10^3 \text{ N} \end{array}$$

表 1—3 SI 字首

乘 數	字 首	符 號	乘 數	字 首	符 號
10^{12}	Tera	T	10^{-1}	Deci	d
10^9	Giga	G	10^{-2}	Centi	c
10^6	Mega	M	10^{-3}	Milli	m
10^3	Kilo	K	10^{-6}	Micro	μ
10^2	Hecto	h	10^{-9}	Nano	n
10^1	Deka	da	10^{-12}	Pico	p
			10^{-15}	Femto	f
			10^{-18}	Atto	a

面積之單位，以平方米 m^2 為基本單位，其他之單位與 m^2 之關係，可以乘幂表示：

$$1 \text{ cm}^2 = (1 \text{ cm})^2 = (10^{-2} \text{ m})^2 = 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ mm}^2 = (1 \text{ mm})^2 = (10^{-3} \text{ m})^2 = 10^{-6} \text{ m}^2$$

體積之單位，以立方米 m^3 為基本單位，其他之單位與 m^3 之關係可以乘幂表示：

$$1 \text{ cm}^3 = (1 \text{ cm})^3 = (10^{-2} \text{ m})^3 = 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ mm}^3 = (1 \text{ mm})^3 = (10^{-3} \text{ m})^3 = 10^{-9} \text{ m}^3$$

液體之體積，有時常以升 (liter) 表示

$$1 \ell = 1 \text{ dm}^3 = 10^3 \text{ cm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

1 立方厘米，亦可以簡寫 c.c. (cubic centimeter) 表示：

$$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ c.c.}$$

1-1-3 Cgs 制

Cgs 制即長度單位使用公分 (cm)，質量單位 (g)，時間單位使用秒 (sec)。根據牛頓定律，其力的單位為達因 dyne，即：

$$\begin{aligned} 1 \text{ dyne} &= (1 \text{ g}) \times (1 \text{ cm} / \text{sec}^2) \\ &= 1 (\text{g})(\text{cm}) / \text{sec}^2 \end{aligned}$$

Cgs 制能量單位為爾格 erg $1 \text{ erg} = 1 (\text{dyne} \cdot \text{cm})$

爾格與焦耳之關係為 $1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$

1-1-4 美國工程制

美國工程制度為美國工程界習慣所採用之制度，其最大之特點為具有四個基本量，即長度。使用呎 (ft)，質量使用磅質量 (pound mass) (lb_m)，時間使用秒 (sec)，再加上力之單位使用磅力 (pound force) (lb_f)。

美工制並非十進位，例如 1 噸， $1 \text{ ton} = 2000 \text{ lb}$ ，1 呎等於 12

6 質能均衡

時， $1 \text{ ft} = 12 \text{ in}$ 。其能量之單位為呔磅(力)， $(\text{ft}-\text{lb}_f)$ ，熱之單位使用 Btu。

$$1 \text{ Btu} = 778 (\text{ft}-\text{lb}_f)$$

表 1—1 所列出的幾個常用制度中，SI，Cgs，FPS，及英工程制，其單位具有三個基本量，即長度(L)，質量(M)，及時間(t)，而力的單位係由此三個基本量根據牛頓運動定律所導出者，稱為導出量。美國工程制度與前四者最大之不同，乃是將力的單位亦視為基本量，即美國工程制度一共有四個基本量，由於將力的單位視為基本量，為了符合牛頓運動定律，必須引進一特殊的變換因子，以 g_c 表示，其數值及單位如下：

$$g_c = 32.174 \frac{(\text{ft})(\text{lb}_m)}{(\text{sec}^2)(\text{lb}_f)}$$

依照牛頓定律

$$F = Cma$$

F = 力

m = 質量

a = 加速度

C = 常數，其數值和單位，由 F，m 及 a 的單位決定

cgs 制， $m = 1 \text{ g}$ $a = 1 \text{ cm/sec}^2$

$$F = Cma = C \times 1 \times 1 = C(\text{g})(\text{cm})/\text{sec}^2$$

若令 $1(\text{g})(\text{cm})/\text{sec}^2 = 1 \text{ dyne}$ ，則 C 的數值及單位皆為 1

則 $F = ma = 1(\text{g})(\text{cm})/\text{sec}^2 = 1 \text{ dyne}$

SI 制，若 $m = 1 \text{ kg}$ $a = 1 \text{ m/sec}^2$

$$F = Cma = C \times 1 \times 1 \text{ kg m/sec}^2$$

若令 $1(\text{kg})(\text{m})/\text{sec}^2 = 1 \text{ N (牛頓)}$ ，則 C 的數值及單位皆為 1

則 $F = ma = 1(\text{kg})(\text{m})/\text{sec}^2 = 1\text{N}$

但在美工程制中，已將力的單位，視為基本量其單位為磅力（lbf），其定義為 1 磅質量在地表所具有之重力為 1 磅力，已知地表重力加速度為 32.174 ft/sec^2 ，根據牛頓定律

$$F = Cma$$

$$1 \text{ lb}_f = C \times 1 \text{ lb}_m \times 32.174 \text{ ft/sec}^2$$

為符合上式，因此，C 的單位及數值為 $C = \frac{1 (\text{lb}_f)(\text{sec}^2)}{32.174 (\text{lb}_m)(\text{ft})}$

習慣上以 C 的倒數令為 g_c 即 $g_c = \frac{1}{C}$ ，牛頓公式可寫為

$$F = \frac{1}{g_c} ma$$

上式為美工程制，牛頓公式之表示法，讀者切莫忘記，在美工程制中，凡是涉及質量及力之間的互換，均需乘上此變換因子—— g_c 。常見的形式有

(1) 重力 $F = \frac{1}{g_c} ma$

(2) 動能 $E_k = \frac{1}{2 g_c} mv^2$

(3) 位能 $E_p = \frac{1}{g_c} mgh$

(4) 壓力 $P = \frac{1}{g_c} \rho gh$

【例 1—1】

100 lb 質量之物體，置於距地面 10 ft 高度處，試求其位能為若干呎磅（ft-lbf）？

【解】

$$E_p = \frac{1}{g_c} mgh = \frac{1}{\frac{32.174(\text{ft})(\text{lb}_m)}{(\text{sec}^2)(\text{lb}_f)}} \left| \frac{10 \text{ lb}_m}{\text{sec}^2} \right| \frac{32.2 \text{ ft}}{\text{sec}^2} \left| \frac{10 \text{ ft}}{\text{sec}^2} \right|$$

$$= 1000 (\text{ft})(\text{lb}_f)$$

磅質量 (lb_m) 與磅力 (lb_f)，兩者的意義不同，已詳述如上，然而一般題目中，只寫出磅，而並未證明磅質量或磅力，讀者應注意，由題意判斷之。另外在化學及化工上亦習慣稱此物之重量為 2 Kg ，而不用牛頓，此時之 2 kg 乃代表質量 2 kg 之物體所具有之重量。這是一種習慣之用法，所以當讀者看到本書中寫著： 2 kg 重的某物，或 NaOH 120 克重……時，指的乃是該質量物質所具有之重量，切莫混淆。

1-1-5 單位換算 (*Conversion of Units*)

在工程應用上，遭遇到單位換算的機會甚多，試如本章開頭所言，單位換算為解題最基本之一環，不可不熟練之。本書對於單位換算，採用因次方程式 (*dimensional equation*) 之方法，如例題所示，寫出單位及數字，將欲換算之單位乘上適當之換算因子 (*conversion factor*) 即可。換算因子應熟記之，記得愈多愈有利。表 1-2 為 SI 制及美國工程制之基本換算表，其他重要之換算因子列於附錄 A。以下為長度及質量最基本之換算因子

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ mi} = 5280 \text{ ft} = 5280 (0.3048 \text{ m}) = 1609 \text{ m} = 1.609 \text{ km}$$

$$1 \text{ in} = \frac{1}{12} \text{ ft} = \frac{1}{12} (0.3048 \text{ m}) = 0.0254 \text{ m}$$

$$= 2.54 \text{ cm}$$

$$1 \text{ lb}_m = 454 \text{ g} = 0.454 \text{ kg}$$

注意 $1 \text{ lb}_f = (0.454 \text{ kg}) (9.807 \text{ m/sec}^2)$
 $= 4.448 (\text{kg})(\text{m})/\text{sec}^2 = 4.448 \text{ N}$

【例 1—2】

一飛機以音速之二倍速度飛行，（音速為 1100 ft/sec ），其速度相當於每小時多少哩？

【解】

$$\frac{2}{1} \left| \frac{1100 \text{ ft}}{\text{sec}} \right| \left| \frac{1 \text{ mile}}{5280 \text{ ft}} \right| \left| \frac{60 \text{ sec}}{1 \text{ min}} \right| \left| \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ hr}} \right| = 1500 \text{ mile/hr}$$

【例 1—3】

將 $400 \text{ in}^3/\text{day}$ 轉換為 cm^3/min

【解】

$$\frac{400 \text{ in}^3}{\text{day}} \left| \frac{(2.54 \text{ cm})^3}{1 \text{ in}^3} \right| \left| \frac{1 \text{ day}}{24 \text{ hr}} \right| \left| \frac{1 \text{ hr}}{60 \text{ min}} \right| = 4.55 \frac{\text{cm}^3}{\text{min}}$$

§ 1-2 莫耳

根據原子量及分子量的定義，一莫耳的原子或分子，所具有的質量，稱為該原子或分子的原子量或分子量。SI 單位制，一莫耳約有 6.02×10^{23} 個粒子，稱為一克莫耳（ g mole ）。美國工程制度，一莫耳有 $6.02 \times 10^{23} \times 454$ 個粒子，稱為一磅莫耳（ lb mole ）。因此，一克莫耳的氧原子，其原子量為 16 克，而一磅莫耳的氧原子，其原子量仍為 16 磅。將此兩種莫耳單位表示如下：