

Warren L. McCabe

Julian C. Smith

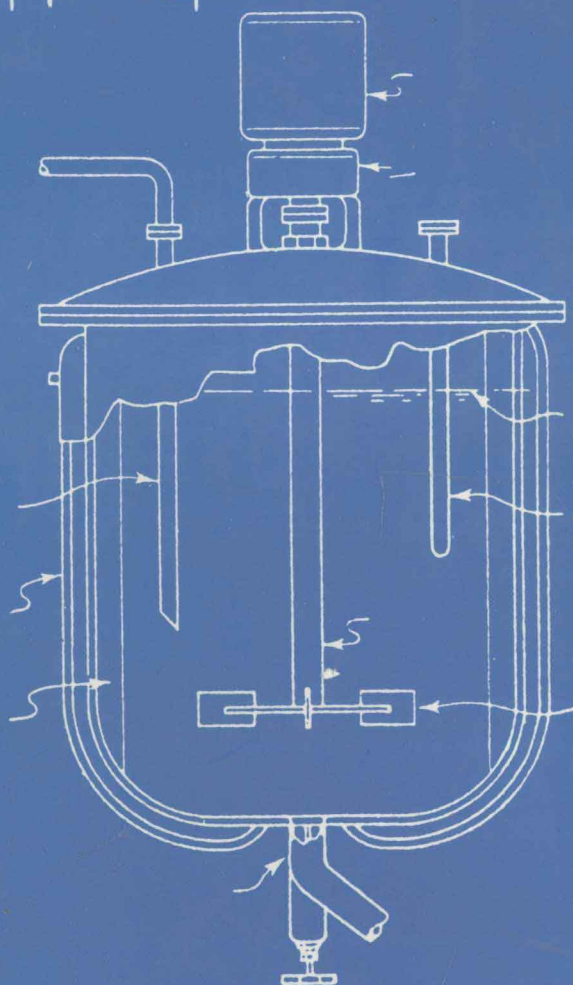
Peter Harriott

第四版

化工單元操作

龔邦仁 譯

上冊



SUPER 超級科技圖書股份有限公司

Warren L. McCabe

Julian C. Smith

Peter Harriott

第四版

化工單元操作

龔邦仁 譯

上冊

SUPER 超級科技圖書股份有限公司

SUPER SUPER SUPER SUPER SUPER SUPER SUPER

化工單元操作

UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING

版權所有

超級

翻印必究

作者 龔邦仁
發行人 李芬玲
發行所 超級科技圖書股份有限公司
業務部 台北市羅斯福路4段119巷26號1樓
電話 7328401 7328403
郵政劃撥帳號 1009155-4
行政院新聞局登記證局版台業字第2405號
承印者 申全盛彩色印刷廠
中和市員山路294巷9號
初版 中華民國七十五年五月
二版 中華民國七十六年三月
定價 上册 貳佰元整
下册 貳佰元整
全册(精裝) 肆佰元整

SUPER SUPER SUPER SUPER SUPER SUPER SUPER

譯者序

參閱專家學者於化工單元操作之著述，版本衆多，不一而足；惟以整體觀念闡述著眼，對化工系高年級學生言，能描繪一清晰簡明之輪廓，當推 McCabe 諸位先進所寫 Unit Operations of Chemical Engineering。

Unit Operations of Chemical Engineering 一書，於 1956 年在美國出版，其後歷經改編，內容益見豐富精練，敘理詳實可觀，乃廣為流傳，化工系學生幾乎人手一冊，奉為經典。此次第四版問世，譯者應超級科技圖書股份有限公司委以重任，嘗試將該書改譯中文。個人基於國內科技理念傳播之迫切，深感此事甚有意義，乃以審慎之心，逐步完成是項工作。

翻譯情事，講究信、達、雅之要求，惟因文化背景之差異，文字運作常有“祇可意會，無法言傳”之缺憾。於本書譯述工作，吾人乃以信實為主，而後為求其語意暢達，文字或有增添，但均不失作者原意，至於是否“典雅”，遂為寄望之理想耳。

本書體例，泰半遵循原著，書末亦有附錄及名稱索引，俾便使用人士查閱。茲值“傳統化工日趨沒落”聲浪喧喊之際，期望此等基礎單元操作觀念，仍能受到世人重視，進而應用原理、程序於其他工程研究領域，造福人類，則幸甚矣。

譯者才疏學淺，經驗不足，譯文如有錯誤疵漏之處，懇請學者先進不吝賜教，以期於再版之時一一匡正。

龔邦仁 謹識

中華民國七十四年十二月於新竹

原 序

這本書是化學工程中單元操作的入門教科書，內容係針對已修過數學、物理、化學及化工概論等課程的大學三、四年級學生所編寫的，同時認為他們具有質能均衡及熱力學原理的基礎知識。

在研討的結構及層次方面，本書依然遵循前版形式，各章均以每個單元的主要操作為主，這些單元可以區分為四個主題：流體力學、熱傳遞、平衡板級與質量傳送及有關固體粉粒的操作。半學年或一學期的課程可依據任何一篇或數篇的組合來講授。

本書限於研討的層次及篇幅影響，許多較特殊的操作，諸如薄膜分離、膠體研磨、冷凍及機械分離等特殊方法，由於篇幅所限無法加以介紹，其他一些重要主題亦被省略，因為若對這些主題作充分的說明將使本書提昇至大部份學生無法理解的層次，基於這些因素，二相流動、三維空間流體形態、電與磁效應、及多成份分離均被省略或稍加提及。我們已經盡力使本書在研討層次上維持其一致性。

化工系學生由於在一或二年級幾乎均已修過質能均衡的課程，所以涉及這方面的討論內容已在第一章中大部份被省略。由於熱力學同樣被包括在化工的其他課程中，縱使其餘幾章中為了討論各種分離而需要使用相圖，相平衡一章仍被省略。估計平衡板級數的彭川法（Ponchon method）已不再介紹，因為實際上已很少應用，而對於簡易的分離，McCabe-Thiele 法已是綽綽有餘，至於較複雜的分離，則必須藉助於計算機。

本書增加了新的一章“吸附”，由於這種操作，特別在污染控制方面已日趨重要。在流體化床、填充床的熱傳遞、過濾設備及其他主題上皆有新增的內容。蒸餾、氣體吸收及乾燥各章，已完全重新編排。在多成份蒸餾及固體的碎研方面，將適度的討論電子計算機模擬的應用。其他部份，一般而言，也經過修訂並且補充了最新的內容以符合目前實用狀況。

第一章討論“單位系統”。將其他單位制轉換成 SI 制在工程應用上非常不完整，而許多目前出版的資料或手冊皆以 fps 或 cgs 制為單位，所以工程師必須要熟悉上述三種單位制，且這三種單位在本書中都有用到但本書強調 SI 及 fps 單位制的使用。讀者必須留意大部份的方程式及其間的關係方程式為無因次的，可應用任意一組單位制。

本書各章末尾的習題共計 239 題，其中 85 題為此版本的新題目，這些題目各有深淺，但均以本書的內容為主，而幾乎所有的題目，不查閱參考資料便可解出；大多數問題可藉手上型計算機求解。第 27 章中有幾個關於碎研方面的題目，則必須以計算機程式求得解答。

先前的作者 Dr. Warren L. McCabe 於 1982 年此版本完成大約一半時去世，他對此版本第一部份竭盡心力，並且對以後的各章所作的更動，亦完全支持，謹呈此書，以資紀念。

*Julian C. Smith
Peter Harriott*

目 錄

譯者序

原序

第一篇 導言 1

第 一 章 定義與原理.....	3
------------------	---

第二篇 流體力學 23

第 二 章 流體力學與其應用.....	25
第 三 章 流體流動的現象.....	41
第 四 章 流體流動的基本方程式.....	63
第 五 章 不可壓縮流體在管道及薄層中的流動.....	83
第 六 章 可壓縮流體的流動.....	121
第 七 章 通過沈浸體的流動.....	145
第 八 章 液體的輸送與計量.....	185
第 九 章 液體的攪拌與混合.....	237

第三篇 熱傳遞及其應用 287

第 十 章 固體中的熱傳導.....	289
第十一章 在流體中熱流動的原理.....	311
第十二章 無相變化的流體熱傳遞.....	333
第十三章 相變化所發生的流體熱傳遞.....	379
第十四章 輻射熱傳遞.....	405
第十五章 熱交換的裝置.....	437
第十六章 蒸發.....	475

第四篇 質傳及其應用 513

第十七章	平衡板級操作	519
第十八章	蒸餾	539
第十九章	瀝濾及萃取	605
第二十章	多成分蒸餾介紹	637
第二十一章	擴散原理與相間質量傳送	663
第二十二章	氣體吸收	699
第二十三章	增濕操作	747
第二十四章	吸附	777
第二十五章	固體的乾燥	801

第五篇 含有顆粒化固體的操作 845

第二十六章	顆粒化固體的性質和處理	847
第二十七章	碎研	867
第二十八章	結晶	899
第二十九章	固體與糊狀物的混合	941
第三十章	機械分離法	961

附錄 1029

1.	對於倍數和約數的 CGS 和 SI 字首	1029
2.	氣體常數值	1030
3.	轉換因數和自然常數	1031
4.	無因次分析	1033
5.	無因次群	1039
6.	標準鋼管的因次、容量和重量	1040
7.	冷凝器和熱交換器的數據	1041
8.	飽和蒸汽和水的性質	1042
9.	氣體的黏度	1043
10.	液體的黏度	1045
11.	金屬的熱傳導係數	1047
12.	氣體和蒸氣的熱傳導係數	1048
13.	水以外的液體的熱傳導係數	1049

14.	液態水的性質.....	1050
15.	氣體的比熱.....	1051
16.	液體的比熱.....	1052
17.	在 1 大氣壓和 100 °C 下，氣體的 <u>普蘭特</u> (Prandtl) 數	1053
18.	液體的 <u>普蘭特</u> (Prandtl) 數.....	1054
19.	在 1 大氣壓和 0 °C 下，氣體在空氣中擴散係數和 <u>史米特</u> (Schmidt) 數	1055
20.	<u>泰勒標準篩網</u> 的尺度	1056
21.	在輕碳氫化合物系的分配係數 (K 值) ；低溫範圍的一 般相關式.....	1057
22.	在輕碳氫化合物系的分配係數 (K 值) ；高溫範圍的一 般相關式.....	1058

第一篇

導 言

2 化工单元操作

第一章

定義與原理

化學工程主要是將原料轉換或分離成有用產品的一種工業程序。化學工程師必須要發展、設計、同時精確建立整個程序及所使用的設備；選取適合的原料，同時有效、安全、且符合經濟效益地操作工廠；並且留意產品是否確能符合顧客需求。化學工程既是一種科學，也是一種藝術，工程師經常需要藉科學知識來解決問題。通常的狀況是當工程師無法從科學知識得到圓滿的解決時，此時他必須藉助往昔的經驗及使用本身的判斷力。而一個工程師的專業性知識與技能，取決於他是否能熟練運用各種的資料來源，使程序問題獲得實際解決。

需要藉助化學工程師服務的程序及工業範圍與種類，極為廣泛。因此很難明確劃分其領域。在化工技術與程序工業的標準論文中所敘述的各種程序，已呈現了化學工程領域的最佳理念⁶。（註：上標代表書末之參考資料編號）

由於現代化工程的種類及複雜性，因此要在單一標題下涵蓋所有化學工程的主要課題與內容，並不切實際。為了方便起見，乃依個人意思將此領域區分為幾個部份，本書主要探討的是化學工程中的“單元操作”。

單元操作

對大部分化學工程中的主題內容，有一種符合經濟效益的組織化方法，其基於下列兩項事實：(1)雖然個別程序的數目很多，但每個個別程序均可分成一系列的步驟，此步驟叫操作，而每一種操作皆依序出現在一個個的程序中。(2)個別的操作皆有共通的技術，並以相同的科學原理為依歸。例如在大多數程序中，固體及流體必須要移動，熱能或其他型式

4 化工單元操作

的能量必須從某物質傳遞到另一物質，同時必須達到諸如：乾燥、碎研、蒸餾、及蒸發等目的。單元操作的概念可作如下之說明：即有系統地探討此等操作本身——這些操作很顯明的橫跨於工業及生產程序中——將整個程序的處理，予以一致化及簡單化。

在處理程序時的嚴謹化學觀念，則與化學工程中的相關領域，即反應力學 (reaction kinetics) 一起研究。單元操作廣泛的用來處置反應物的預備、分離與純化產物、未轉化反應物的再循環、及控制出入化學反應器中能量轉移等主要的物理程序。

單元操作可適用於許多物理程序猶如適用於化學程序一樣。例如，用來製造常用食鹽的程序乃由以下系列的單元操作所組成：固體與液體的輸送、熱傳遞、蒸發、結晶、乾燥及篩選等。在這些程序中沒有出現化學反應。另一方面，不論是否有觸媒，石油的分餾為一種典型大規模處理的化學反應。於此，單元操作——流體與固體的輸送、蒸餾及各種機械分離——均非常重要，分餾反應若無上述程序是無法進行的。化學步驟本身是以控制反應區的質量、能量的進出來處理。

因單元操作為工程的一支，乃依賴科學及經驗，理論與實際必須互相配合才可達成設計出能加以製造、裝配、操作、保養的設備。每個操作的適量討論需要同時考慮理論及設備。本書的主旨在於提供此種均衡的論述。

單元操作的科學基礎 (Scientific foundations of unit operations) 很多科學的理論和技巧均為處理單元操作的基礎。有些是基本的物理及化學定律，例如質能不滅、物理平衡、動力學及某些物性等，本章其餘部份將敘述其用途。其他在化學工程中特別重要的技術，亦在本書適切的提出加以研討。

單位制度

正式的國際單位制度是 SI 制 (Système International d'Unités)。為了使其普遍的使用而成為所有工程及科學上的唯一制度，仍然在作最大的努力。但是舊有的制度，尤其是 cgs 及 fps 工程重力制度 (engineering gravitational systems)，仍在使用中且將持續一段時間。化學工程師發覺有許多 cgs 制的物化數據；而許多計算却以 fps 制最為方便，但在科學及工程上將不斷使用 SI 制。因此，必須要熟悉這三種制度的使用。

在下列論述中，首先討論 SI 制，藉此衍生其他的單位系統。此種程序與歷史上的秩序是相反的，因為 SI 制是從 cgs 制衍生的。不過，SI 制日形重要，在此優先介紹。如果遇到適當的時機，其他制度將被捨棄而予以忽略時，則 SI 制便成為唯一通用的單位制。

物理量

任何物理量由二個部份組成：其一是單位，說明此量為何並給予量度的標準，其二為數值，說明由多少個單位組成此量。例如，敘述兩點之間的距離為 8 ft，意味著：一個一定的長度已被度量，為了度量此長度，選擇一標準長度作為單位稱為 ft，頭尾間需要 8 個 1 ft 的單位，才能包括此距離。假如一個整數單位，對某一既定距離而言，不是太少就是太多，以致於無法量測，吾人乃將此單位再細分若干部份，如此即可進行任意精確程度的測量。除非數值及單位同時存在，否則無法定義物理量。

SI 單位

SI 制包含了整個科學及工程上的領域，甚至於包括電磁學及明亮度。對本書的主旨而言，一部份的 SI 制單位包括化學、重力、力學及熱力學即已綽綽有餘。此單位是導自：(1)四個化學及物理的比例式，(2)對於質量、長度、時間、溫度及莫耳量的任意選取的標準，及(3)兩個比例常數數值的任意選擇。

基本方程式 (Basic equations) 基本的比例式，每一個皆以帶有自身比例常數之方程式表示，即為

$$F = k_1 \frac{d}{dt}(mu) \quad (1-1)$$

$$F = k_2 \frac{m_a m_b}{r^2} \quad (1-2)$$

$$\dot{Q}_c = k_3 W_c \quad (1-3)$$

$$T = k_4 \lim_{p \rightarrow 0} \frac{pV}{m} \quad (1-4)$$

此處[†] $F = \text{力}$

[†] 每章的最後附有符號表。

6 化工單元操作

t = 時間

m = 質量

u = 速度

r = 距離

W_c = 功

Q_c = 熱量

p = 壓力

V = 體積

T = 熱力學上的絕對溫度

k_1, k_2, k_3, k_4 = 比例因數

方程式 1-1 爲牛頓第二運動定律，表示作用於一質量 m 的質點上所有的合力與該質點在合力方向的動量增加率之間成比例。

1-2 式爲牛頓的重力定律，表示間隔距離爲 r 的兩質量 m_a 與 m_b 的質點間的吸引力。

1-3 式爲熱力學第一定律的一種描述。它確認了在一封閉系統內經過一循環所作的功與系統中相同循環所吸收熱量之間的比例關係。

1-4 式表示任何定量氣體的壓力 - 體積乘積在壓力趨於 0 時其與熱力絕對溫度間之比例關係。

上面每一個方程式中所有的變數值均能用某種方法加以量度，且若 k 的數值可由計算求出，則 k 值爲常數，而且僅與量度方程式中變數值所使用的單位有關。

標準 (Standards) 根據國際間的協議，對於質量、長度、時間、溫度及莫耳可以任意制定標準，這些是 SI 制的五種基本單位。一般說來，其標準如下表示：

質量的標準爲仟克 (kg)，將保存在法國 Sevres 的白金圓柱定義爲國際仟克的質量。

長度的標準爲米 (m)，其定義爲 ^{86}Kr 所輻射某種光譜線波長的 $1,650,763.73 \times 10^{-9}$ 倍[†]。

時間的標準爲秒 (s)，定義爲 ^{133}Ce 原子內某一特定量子轉移的頻率週期的 $9,192,631.770 \times 10^8$ 倍。

溫度的標準爲凱爾文 (Kelvin) K，其定義爲當純水在其三相點的

[†] 數目字之後的星號代表該數字是正確值。

溫度，即為液態水、冰及水蒸汽達成平衡的唯一溫度，將此溫度指定為 273.16°K 。

莫耳（簡稱作 mol）定義⁴為包含與 $12^\circ\text{g}^{12}\text{C}$ 相同基本單位數的物質質量。莫耳的定義相當於以克表示之一莫耳純物質的質量，其數值等於從標準的原子量表中計算的分子量，此表中碳的原子量已知為 12.01115 。此數字與 12° 不同，因為它是根據自然界中碳同位素的混合物而算出，而不是純 ^{12}C 。

求常數值（Evaluation of constants）從基本的標準來看，1-1 式及 1-2 式中的 m ， m_a 及 m_b 值是以仟克（kg）來表示，而 r 以米， u 以米/秒來表示。其中 k_1 與 k_2 並非各自獨立，而是由 1-1 式及 1-2 式消去 F 後之關係式得到，

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{d(mu)/dt}{m_a m_b / r^2}$$

k_1 或 k_2 任意一個可加以固定。則另一常數必須由實驗中尋求，實驗可由 1-1 式所得的慣性力再與 1-2 式所得的重力加以比較而得。在 SI 單位制中， k_1 固定為 1 而 k_2 則由實驗求得。故 1-1 式成為

$$F = \frac{d}{dt}(mu) \quad (1-5)$$

由 1-5 式所定義的力，使用於 1-2 式中，稱為牛頓（N）。由 1-5 式，

$$1\text{ N} \equiv 1\text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2 \quad (1-6)$$

常數 k_2 以 G 表示，稱為重力常數（gravitational constant）。美國國家標準局⁴（United States Bureau of Standards）所認可的實驗數值為

$$G = 6.6732 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2 \quad (1-7)$$

功、能量及功率（Work, energy, and power）在 SI 制中，功與能量均以牛頓·米（N·m）來度量，此單位稱作焦耳（J），所以

$$1\text{ J} \equiv 1\text{ N}\cdot\text{m} = 1\text{ kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2 \quad (1-8)$$

而功率是以焦耳/秒（J/s）來度量，此單位稱為瓦特（W）。

熱量（Heat）1-3 式中的常數 k_3 可任意加以固定。在 SI 制中，它如同 k_1 一樣，定為 1。1-3 式成為

$$Q_c = W_c \quad (1-9)$$

熱量如同功一樣，以焦耳（J）度量。

8 化工單元操作

溫度 (Temperature) 1-4 式的 pV/m 量可以用 $(\text{N}/\text{m}^2) \times (\text{m}^3/\text{kg})$ 或 J/kg 度量。藉任意選定的氣體，可由測量恒溫槽中 m kg 氣體的 p 和 V 值而得到 (pV/m) 值。在這實驗中，只需要溫度固定，而與其大小無關。在定溫下可求出不同壓力的 pV/m 值，再外插至壓力等於零的值，即可求得在此恒溫槽溫度下 1-4 式所需的極限值。對於特殊狀況，當恒溫槽的水在三相點時，其極限值以 $(pV/m)_0$ 表示。在此狀況下，1-4 式成為

$$273.16 = k_4 \lim_{p \rightarrow 0} \left(\frac{pV}{m} \right)_0 \quad (1-10)$$

在溫度為 $T\text{K}$ 時的實驗，1-4 式中的 k_4 可與 1-10 式中的 k_4 相消，得到

$$T \equiv 273.16 \frac{\lim_{p \rightarrow 0} (pV/m)_T}{\lim_{p \rightarrow 0} (pV/m)_0} \quad (1-11)$$

1-11 式是由真實氣體的壓力 - 體積性質的實驗所得的凱爾文溫標 (Kelvin temperature scale) 之定義。

攝氏溫度 (Celsius temperature) 實用上，溫度乃以攝氏溫標表示，亦即冰與飽和水蒸汽在一大氣壓下之平衡溫度定義為冰點，以此為攝氏零度。實驗上發現，冰點較水的三相點低 0.01K ，而為 273.15K 。因此攝氏溫度定義為

$$T^\circ\text{C} \equiv T\text{K} - 273.15 \quad (1-12)$$

在攝氏溫標上，在一大氣壓下，實驗上蒸汽溫度亦即水的沸點等於 100°C 。

十進單位制 (Decimal units) 在 SI 制中，對每一量均有獨立單位，但其十進位的倍數及約數亦被認可。其表列於附錄 1。時間可由非十進單位來表示：即分 (min)、小時 (h)、或日 (d)。

標準重力 (Standard gravity) 為某種目的，地球重力場中的自由落體加速度亦被使用。根據 1-2 式中推出此量，以 g 表示，幾乎是常數。當然， g 隨著緯度及海平面的高度略有改變，為了精確計算起見，設定任意標準量 g_n 定義為

$$g_n \equiv 9.80665 \text{ m/s}^2 \quad (1-13)$$

壓力單位 (Pressure units) 在 SI 中，壓力的自然單位為每平方米之牛頓 (N/m^2) 。這單位稱作巴斯卡 (Pa)，由於太小而不方便，其倍數稱為 bar。其定義為

$$1 \text{ bar} \equiv 1 \times 10^5 \text{ Pa} = 1 \times 10^5 \text{ N/m}^2 \quad (1-14)$$