

單元操作與輸送現象

C. O. 貝內特 著

曉園出版社
世界圖書出版公司

單元操作與輸送現象

(1982 年 第三 版)

曉 園 出 版 社
世 界 圖 書 出 版 公 司

北 京 · 廣 州 · 上 海 · 西 安

1992

单元操作与输送现象

〔美〕C. O. 贝内特 著

田福助 著

*

晓园出版社出版

世界图书出版公司北京分公司重印

北京朝阳门内大街 137 号

北京中西印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1993 年 1 月第一版 开本: 850×1168 1/32

1993 年 1 月第一次印刷 印张: 27

印数: 0001-700 字数: 63.6 万字

ISBN: 7-5062-1468-7/Z·55

定价: 17.90 元 (W₉9206/11)

世界图书出版公司通过中华版权代理公司向晓园出版社购得重印权
限国内发行

譯 序

本書第三版（1982年）將一部分內容改為SI單位，一部分仍保留傳統的工程單位，這是原著者明智之舉！正如其在第三版序言中所說的，很多實際上及工程上的測量儀表，及各種工程手冊的數據資料來源，目前為止仍大部分保留傳統的工程單位，尚未完全改為SI單位。因此使學生及工程人員學習此兩種單位是有必要的。

本書原著者在化學工業上有數十年的專業經驗，故本書的內容十分豐富而切合實際需要。其第一版及第二版，在國內一直被一流國立大學化工系採用作教本，而且歷年來“單元操作與輸送現象”在留考、高考、特考、各研究所入學考試，以及就業考試，有很多題目與本書相同或相似。故很適合化工系學生熟讀的一本好書。

譯者任教十餘年來，常常發覺學生對於很多名詞，只能從一般字典上查得，常不能“望文會意”，而坊間許多譯本也都隨譯者自己的喜好而創造很多譯名，因此同一英文名詞就有許多不同譯名，使學生莫衷一是。年來教育部及許多愛國的學者專家，均主張教材中文化，使科技能早日在國內生根，其中最基本的是名詞的統一。因為“單元操作與輸送現象”所用的名詞實際上不但和化學工程名詞有關，而且和機械工程名詞、數學名詞等有關。故在譯述時有關的名詞均採用教育部公布的標準名詞（雖然有些並不太恰當，但均能統一使用也無傷大雅），以期在教材中文化的目標下盡點心力！

有些機械工程名詞和化學工程名詞不完全一樣者，乃先列出機械名詞再列出化工名詞而後面附上原文。例如：雷諾數或芮諾數（Reynolds number）、文氏管或細腰管（Venturi）。大部分名詞後面均附上原文，只有極通俗者才省去原文。希望譯者的苦心能對

讀者有幫助。譯者學淺才疏，疏漏難免，尚祈學者專家惠予指正，俾能改進為感！

譯者 謹識

第三版序言

本書的第三版是為協助教師在輸送程序的課程中，一部分使用 SI 單位而預備的。雖然有些人贊同嚴格的中止使用過去的工程單位系統。但我們認為學生應該被教導使用傳統的工程單位及 SI 單位。磅、質量、及呎這些量已深植在我們的教育中，並且將可能保留一段時間。對大部分的學生而言，要用他們所不熟悉的單位來表示工程問題中的數學公式，而不增加他們的重擔是一件十分困難的事。所有工科的新生，觀看壓力計時，很可能對壓力的大小，仍然以每平方吋磅力的單位來表示。只有極少數的學生觀看壓力計時以巴斯噶（pascals）為單位，這對大部分的學生是不容易的事。需要等一段時間才會熟悉。我們認為對工科學生而言，當他們開始學習輸送程序時，能很快地用數學答出他們問題的答案，養成此種習慣是很重要的。此時，最好能用他們所熟悉而有意義的單位來表示其答案。

本書中僅一部分轉換為 SI 制的第二個理由，乃由於大部分的工程數據，其資料來源仍用傳統的工程單位表示。因此對一些工程師而言，須要一段時間的訓練，才能很快地由一單位系統改變成另一單位系統。若學生們不能熟悉二種單位系統，則我們對他們沒有盡到照顧的責任。

在本書中的導出單位，我們仍然繼續選用因次常數 g_c ，來作化學工程的計算。若學生知道在 SI 制中， g_c 的數值等於 1 而且沒有因次，這對 SI 系統沒有影響，但在其他單位系統中 g_c 仍然很重要。在本書大部分的章節中，頭一個例題保留工程單位，而第二個及以後的例題才轉換為 SI 單位。然而，在質量傳遞中的大部分

問題仍然保留工程單位，因為其單位改變是不重要的。在質量傳遞的章節中，有很多的量仍然用非 SI 米制單位，因為許多數據都用這些單位。

在此版本中其他的改變很少。然而，所有測量單位均用縮寫符號，不論是傳統的單位系統或 SI 系統，這些縮寫符號均符合“美國國家標準學會”(ANSI)所推荐的現代通用符號。例如，以前的 see 現在用 s，以前的 hr 現在用 h 等。此外，所採用的一些文獻及少數章節已加修訂，以反映現代的趨向或新的方法以解決某些問題。整體而言，本書仍保留大部分過去傳授輸送程序的方法。此版本在國外有五個國家出版，並用三種外國文字出版。我們一直相信教育工程師的最好方法，是使他們修習簡單一致的基本物理及數學作為學習輸送程序的基礎，藉着這些理論的應用來解決實際的工程問題。

C. O. BENNETT

J. E. MYERS

第二版序言

本書是一本修習動量、熱量、及質量傳遞的大學部教科書。本書不是一本完整的論文，我們不打算在理論上或實用上討論所有的問題。但我們嘗試將最重要的原理和應用，以嚴謹的方式並避免過分詳細而造成雜亂，來向讀者介紹。

一本包含像這樣廣泛主題的教科書，只能對各主題作一個簡介。學生若想更深的了解，應該繼續研讀有關流體動力學、熱傳遞、質量傳遞、及單元操作等方面的專門書籍。然而，工科的學生現在必須修習那麼多的課程，因此我們認為應該提供一本在一年內可修習完，有關輸送程序概略介紹的教科書。我們已嘗試討論輸送程序最重要的部分，並且提供詳細的說明，以使讀者能使用所得的資料來解出典型的問題。

在這本書中我們將單元操作的原理應用加以介紹，並指出過去工程師們所應用的相關式基礎，並希望讀者在日後使用這些關係式時，能提出新的相關式。本書並非針對程度好的學生或準備進研究所的學生而寫。本書乃是為那些日後在其所從事的工作上必須具備輸送程序基本認識的所有學生而寫。雖然本書內容的組織是以原理為基礎，但我們期望使用本書的學生能應用科學的原理以解決實際的問題，能由手冊中尋找數據，能了解工程術語，並能得到問題的數值解答。

已經有許多書籍對於過濾、蒸發、及其他程序設備等方面都有詳細的敘述，並有許多圖片說明。雖然在本書中我們採用很多工程圖及圖片來說明這些主題，但是對設備及實驗相關式的詳細介紹，我們提議讀者參考 Perry's Chemical Engineer's Handbook (佩

利的化學工程師手冊)。

當工程各方面的知識更被了解時，訓練上的差異就可消除。雖然著者在化學工程上有專業的經驗，但我們希望本書能引導工程師們在動量、質量、及熱量傳遞等方面的所有領域都能在此課程上被研習。在流體動力學及熱傳遞方面，我們介紹了所有工程師所必須知道的基本觀念和定律。在過去對於質量傳遞的研究，幾乎僅限於化學工程師。但是最近，其他領域的工程師們，對質量傳遞也顯示極大的興趣。我們認為本書所介紹的質量傳遞其份量和動量、熱量傳遞相等，對這些工程師們將有益處。

我們假定讀者已具有熱力學、微積分及常微分方程等方面的基本知識。此書的本文未使用向量符號，但和此符號有關的重要方程式則列於附錄中。因此教師或讀者可以自己選用適當的基本方程式來表達。

本書的全部內容及一部分習題可在 125 小時內授完，即兩個四學分的課程。若已修習熱力學和物理化學課程，則這些課程可在三年級修習。若欲在兩個三學分的課程內修完，根據我們的經驗，在不影響本書的連貫性原則下，有些章節可以簡略介紹或省略。例如，在第一部分的“流體動力學”中，有關微分平衡及擾流速度分佈等章節可以省略。有經驗的教師就會對各主題作合適的選擇，我們不必強調那些主題對他的學生最適當。

本書以目前的形式出版，是多年來和同事及學生們交換意見的結果，因人數太多不便列出人名。當他們閱讀此版本時，我們希望他們能因我們接受他們的意見修訂本書，而感到欣慰！

C. O. BENNETT

J. E. MYERS

目 錄

第 一 章 緒 論	1
-----------	---

第 一 篇 流體動力學

第 二 章 流體行爲緒論	19
第 三 章 總質量平衡	33
第 四 章 總能量平衡	47
第 五 章 總動量平衡	69
第 六 章 流動測定	79
第 七 章 微分質量平衡	95
第 八 章 微分能量平衡	103
第 九 章 微分動量平衡	109
第 十 章 運動方程式的一些解法	121
第十一章 界面層流動	141
第十二章 速度分布和擾流的阻力	157
第十三章 因次分析在流體動力學上的應用	187
第十四章 不可壓縮流體的一些設計方程式	205
第十五章 過 濾	233

第 二 篇 熱 傳 遞

第十六章	熱傳遞緒論	259
第十七章	傳導與熱傳導係數	263
第十八章	穩態熱傳導	271
第十九章	不穩態熱傳導	285
第二十章	傳熱導分析中的數值法、圖解法及類比法	303
第二十一章	對流熱傳遞係數	319
第二十二章	層流的熱傳遞	343
第二十三章	擾流的熱傳遞	365
第二十四章	對流熱傳遞的一些設計方程式	387
第二十五章	沸騰與冷凝	415
第二十六章	輻射熱傳遞	435
第二十七章	熱交換設備	469

第三篇 質量傳遞

第二十八章	質量傳遞緒論	499
第二十九章	分子擴散與擴散係數	503
第三十章	二元混合物的擴散	515
第三十一章	對流質量傳遞係數	537
第三十二章	層流的質量傳遞	559
第三十三章	擾流的質量傳遞	569
第三十四章	對流質量傳遞的一些設計方程式	585
第三十五章	不互溶相的連續接觸	607
第三十六章	同時發生的動量、熱量及質量傳遞	633
第三十七章	平衡級的分離：不互溶相	667

第三十八章	部分互溶相接觸	689
第三十九章	二元混合物的蒸餾	709
第四十章	多成分的分離	759
附	錄	781
索	引	835

第一章

緒論

很多的工業，工程師們利用化學反應和物理變化，將原料轉變成產品。有些工業和化學變化有關，例如由硫化物礦石製造硫酸、氨的製造、以及將石油轉變成各種石油化學產品。在其他的工業裡，諸如由甜菜製糖，或由玉米萃取植物油等，均屬於物理變化。許多的工業操作包含一系列的物理和化學的變化，此種系列的變化稱為程序（process）。

工業上許多工程師的工作包括程序的研究發展及工廠操作的設計。程序發展（process development）是工程師所用的術語，用以描述如何尋找程序的最適裝置和條件。構成程序的步驟通常已經知道，將這些步驟組合，使得此程序用於大規模的裝置時仍能適用，此過程稱為“發展”（developing）一個程序。在設計上化學工程師的工作往往是決定裝置的一般特性和大小。例如，他們設計一個蒸餾塔時，要設計其高度、直徑、板數、及控制方法。但是塔壁的厚度及根基的尺寸，通常由機械工程師來設計，而控制系統的細節一般由電機工程師來負責。在工廠操作上，工程師的功用不僅是監督例行的生產操作，而且要改變現狀的程序以提高工廠的效率。若工程師對於一個程序的化學和物理的變化原理能徹底了解，則他們必能發揮其最大功用。

在化學工程的專業性被認定前，化學工業已開始一段長時間。每一工業的技術被認為是特別的專門知識，因此現在所從事這些工作的化學工程師們被訓練成化學家、機械工程師、及技術人員。化學工程的早期課程是著重於工業技術的研究。後來由於單元操作觀念的引入，這些課程就大大地改變。對於廣泛不同的工業，由於其所發生物理變化的相似性，導致對許多工業共同步驟的研究，這些成為現在所知道的單元操作（unit operations）。例如，不論是在製糖或製肥料的程序裡，由溶液中蒸發一液體

2 單元操作與輸送現象

的原理是相同的。因此蒸發變成最早知道的單元操作之一。許多其他的步驟也是具有單元操作的特性，包括流體流動、熱傳遞、增濕、乾燥、蒸餾、氣體吸收、萃取、壓碎與研磨、結晶、過濾、及混合等。

當單元操作更被了解時，很顯然的它們不是特別的實體。過濾顯然地是流體流動的特殊例子，蒸發是熱傳遞的一種形式，萃取和氣體吸收涉及質量傳遞。乾燥和蒸餾的操作均涉及熱量和質量的傳遞。因此單元操作被認為是熱傳遞、質量傳遞、及流體流動的特殊情況或三者的綜合。對於後者，工程師們稱為輸送現象（transport phenomena），它們是單元操作的基礎。任何單元操作的基本研究，最終變成這些輸送現象的研究。

大部分重要的單元操作是討論在程序裝置中流體的行為。化學反應器往往是程序的心臟，此時工程師可以同時利用流體力學、熱傳遞、質量傳遞、及化學動力學與熱力學的原理。在製備反應物及分離產物方面，過濾、瀝濾、吸收、萃取、及蒸餾等的單元操作是很重要的。流體流動和熱傳遞的原理是程序的每一步驟的基礎。流體必須被輸送，而其溫度必須被控制。在化學程序中，其組成是一個變數，故質量傳遞的原理對於分離裝置或反應裝置的設計是很重要的。

輸送現象是研究單元操作的基礎，也是機械工程師和航空工程師解決流體流動問題及熱傳遞問題的基礎。這些問題沒有複雜的化學反應，而且所涉及的幾何形狀也相當簡單，諸如在管中的流動或圍繞一旋轉物體的流動。由於化學反應系統中同時有熱量和質量的傳遞，以及相間接觸裝置的複雜幾何形狀等所造成的複雜性，因此對化學工程師而言，以實驗和觀察的研討方式是最有效的。直到最近，流體動力學和熱傳遞的基本理論才被物理學家、機械工程師和航空工程師們所研究出來。相反地，化學工程師們在質量傳遞方面有顯著的貢獻。然而，在最近幾年來，其他的工程師們對質量傳遞變得很有興趣，而且化學工程師們也發現了很多流體動力學和熱傳遞理論的應用。數位電子計算機的使用，大大地加強理論的實際重要性。而且藉著計算機可以把理論應用於解決複雜的情況，在過去是須要用實驗方法才能解決的。



由上述的討論，可以很清楚的看出各類型工程師們在各自領域上的研究成果，使傳統上專業化所造成的差異消失。輸送現象原理的研究變成每一個工程師的中心主題——不論是那一個專業化的領域均一樣。雖然本書中爲了說明這些原理所舉的許多例子，係取自化學工程上的應用實例，但實際上只有第 15 章“過濾”及第 39 章“二元混合物的蒸餾”等有關的主題，可能和化學工程師特別有關。

在輸送現象及單元操作上，越在基本上接近問題，對這些問題的數學分析越顯重要。計算機除了應用於設計的計算外，今日在工廠上也用來控制操作變數。爲了使計算機能應用於這些方面，以及給予程序可以在最適經濟條件下操作，通常須要建立程序的數學模式。此種數學模式的建立，須要比過去對程序更詳細的了解和更多的數學分析。

用計算機控制的工廠裡，其操作條件可以隨著原料、催化劑的活性、裝置的尺寸、天氣的情況、或市場的需要等因素的改變而改變。因此工程師們須要了解一個程序的不穩定狀態行爲，其所須的數學分析就更困難了。此類的主題通常稱爲程序動力學（process dynamics）。

由於上述的理由，讀者將會發現在本書中對於分析上、數學方法上非常強調，希望能奠立良好的根基以能解決日後工作上所遇到較深的工程問題。

符號、單位和因次

在本章末尾所列的表，將本書中大部分所用的符號加以解釋。有些符號在書內有更完全的解釋，有些符號只用到幾次，故在表中不列出。

在討論力學時，一般習慣上均參考牛頓定律來定義所謂的基本單位，

$$F = Ma \quad (1-1)$$

由此步驟導出下列關係：

厘米 - 克 - 秒（cgs）系統：

$$1 \text{ 達因} = \frac{(1 \text{ g})(1 \text{ cm})}{s^2} \quad (1-2)$$

4 單元操作與輸送現象

米 - 仟克 - 秒 (mks) 系統：

$$1 \text{ 牛頓} = \frac{(1 \text{ kg})(1 \text{ m})}{\text{s}^2} \quad (1-3)$$

英國質量系統：

$$1 \text{ 磅達} = \frac{(1 \text{ lb})(1 \text{ ft})}{\text{s}^2} \quad (1-4)$$

在上述的系統中，力的單位是由質量、長度、及時間的單位所導出的，這些在力學中通常視為基本單位。若用因次表示，我們稱為一個 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[t]$ 系統，則力的因次為 $[ML/t^2]$ 。

相反地，在所謂美國工程系統中，磅力被當作基本單位，因此有下列關係

$$1 \text{ lb}_f = \frac{(1 \text{ slug})(1 \text{ ft})}{\text{s}^2} \quad (1-5)$$

磅力可定義為 $(0.4536)(9.807)$ ，或 4.448 N ，即 $4.448 (\text{kg})(\text{m})/\text{s}^2$ 。在此種 $[F]$ 、 $[L]$ 、 $[t]$ 系統中，一史拉格 (slug) 等於 $1 (\text{lb}_f)(\text{s}^2)/\text{ft}$ ，而質量的因次為 $[Ft^2/L]$ 。

美國化學工程在傳統上採用四個基本單位及因次，而不用三個，即秒、呎、磅、及磅力。磅力可定義為作用於一磅質量物體上使產生 32.1740 ft/s^2 的加速度所須的力。此加速度相當於在標準重力場的重力加速度。選擇此種單位時，在牛頓第二定律中須要使用一個因次常數，即

$$F = \frac{Ma}{g_c} \quad (1-6)$$

因此

$$1 \text{ lb}_f = \frac{(1 \text{ lb})(32.17 \text{ ft/s}^2)}{g_c} \quad (1-7)$$

故常數 g_c 為

$$g_c = 32.17 (\text{lb})(\text{ft})/(\text{lb}_f)(\text{s}^2) \quad (1-8)$$

在此 $[F]$ 、 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[t]$ 系統中，磅力具有一定大小的值，它不像磅重或仟克重隨各地的 g 值而改變（它和 g 值無關）。當然，

g_c 的值是選擇地球上在標準重力場時，一磅質量的物質產生一磅力的力。在本書中，大部分用此系統來表示，我們稱之為 *USChE* 制（美國化學工程制）。

此系統的使用，符合大部分的工業測定裝置。其實在美國很少發現用史拉格表示的重量，在英國的壓力計讀數也很少用每平方吋磅達表示。事實上，即使在用米制的國家中，壓力計用巴（bar）（ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 0.9869 \text{ atm}$ ）或 kg_f/cm^2 （ $= 0.9628 \text{ atm}$ ）表示，但很少用巴斯噶（pascals）（ N/m^2 ）表示。

現今在整個世界有一個趨向，即採用米制系統的 SI 單位。其單位大部分為 mks 系統而不用 cgs 系統。在電學單位方面的合理化可說是最進步的，不過若要深入於程序工業尚須一段時間。因此在符號表中我們保留英制單位，但一位優秀的工程師必須會使用米制和使用英制一樣的方便容易。

為了能應用任何一組單位，方程式的因次必須是均一的，即所有的項具有相同的因次。在 $[F]$ 、 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[\theta]$ 系統中，因次常數 g_c 在牛頓定律中是必須的，以確保其因次的均一性。 g_c 的數值和所使用的單位有關，例如它可等於 $9.81 (\text{kg})(\text{m})/(\text{kg}_f)(\text{s}^2)$ 。出現在因次均一的代數式中的任何數值是無因次的。若我們寫成 $32.2 F = Ma$ ，則式 (1-6) 的因次就不均一。除了式 (1-8) 的單位以外，其他單位均不能使式 (1-6) 成立。相反地，在 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[\theta]$ 系統中，式 (1-1) 為因次均一。若使用較少基本因次時，令 F 代表具有因次 Ma ，則 g_c 為無因次的數值 1.0。

到目前為止我們僅討論力學系統。如果熱效應是重要的，則我們可使用熱能因次 $[H]$ 及溫度因次 $[T]$ 。因此在本書中所使用的一組完整的因次為 $[F]$ 、 $[M]$ 、 $[L]$ 、 $[\theta]$ 、 $[H]$ 、 $[T]$ 。當然，此數目可以減少，例如我們已討論過力學的量，可刪去 $[H]$ 及 $[T]$ ，而關於 $[H]$ 其因次為 $[FL]$ 。事實上，在 SI 單位中，焦耳可用作熱及機械能的單位。

符號 V 、 H 等，為示強性質，即 ft^3/lb 或 Btu/lb 。而示量性質用附