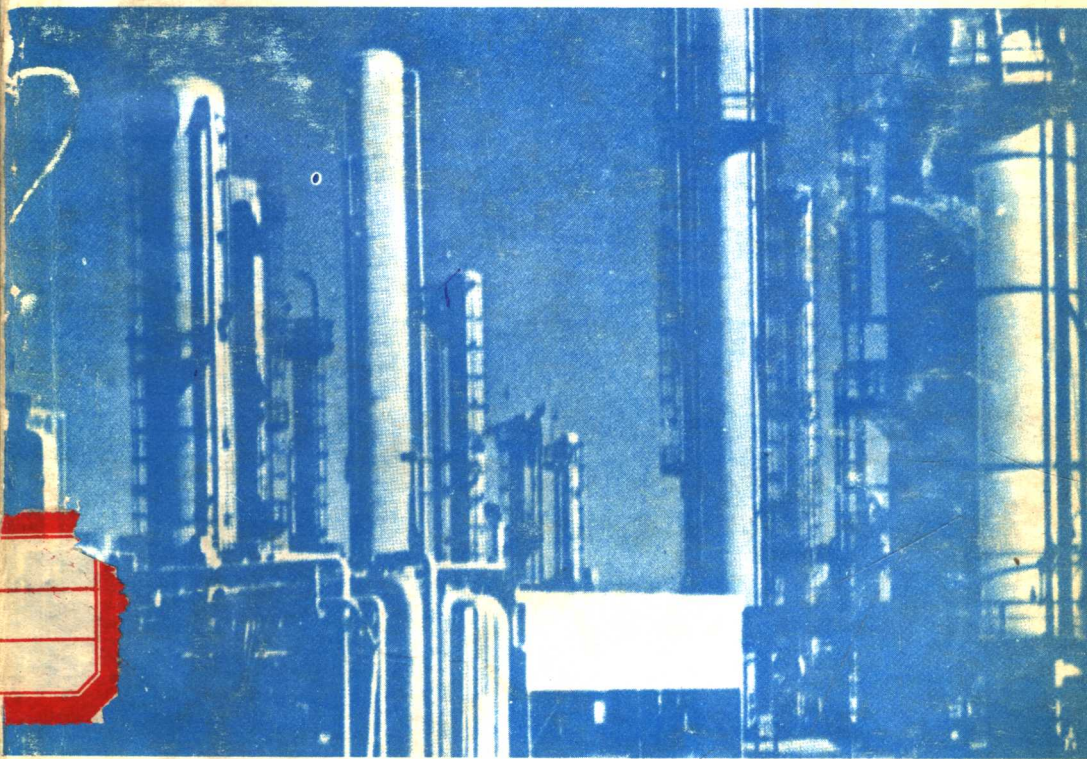


大專科技用書

單元操作 (上)

許啓榮 編著



總經銷 大學圖書供應社

TQ 00

22/1

大專科技用書

單元操作 (上)

許啓榮 編著

江苏工业学院图书馆
藏书章

總經銷 大學圖書供應社

單元操作（上册）

中華民國 68 年 8 月初版	著者	許	啓	榮
	發行人	林	平	南
	出版者	國	彰	社
		地	址：台中市文華路七三號	
		局	版台業字 0226 號	
	總經銷	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	
	印刷者	珠	美打字印刷行	
		地	址：台中市進化路 199-3 號	
		電	話：(042)322422	

定價：120 元

編 者 序

- 一、單元操作爲修習化學工程者最重要之學科之一，分爲流體力學、熱量輸送及質量輸送三個部份，均爲探討化工廠中各種物理處理之問題。
- 二、本書係依照一般大學及工專單元操作課程之教材大綱，加上編者之教學心得編寫而成，適合作爲大專化學工程科系單元操作教學之用。
- 三、本書文字，力求簡潔，對於繁雜艱深之理論部份，均酌予刪減，兼又顧及實用問題之描述，故亦適合從事化工業之有關技術人員參考及高工化工科學生進修之用。若化學系或其他科系學生欲自修研習單元操作，此書亦多少對他們有些助益。
- 四、本書編排雖力求完整嚴密，但錯誤仍恐難免，尚祈各方先進不吝指正，不勝感激。

目 錄

(上冊)

第一章 緒 論

1-1	前言	1
1-2	單位與因次	2
1-3	因次分析	3
1-4	物理平衡	5
1-5	輸送現象與輸送速率	6
1-6	質量與能量之結算	6

第二章 流體輸送之基本原理

2-1	流體之特性	9
2-2	流體之粘度	9
2-3	非牛頓流體	11
2-4	流體靜力學	12
2-5	流系之質量與能量結算	14

第三章 流體在管內之流動及輸送計算

3-1	流體之流動	17
3-2	動量結算	18
3-3	流體在圓管內之線流	20
3-4	流體在圓管內之湍流	24
3-5	摩擦因數	27
3-6	管線中之摩擦損失	30
3-7	流體輸送之功率計算	34
3-8	流體輸送之流量計算	38

2 單元操作

3-9	流體在非管內之流動及輸送	41
3-10	可壓縮流體之流動	45

第四章 流體流經單一固體粒子與粒子床

4-1	牽引力	50
4-2	固體粒子在流體中之沉降	52
4-3	球形粒子在流體中運動方式	54
4-4	粒子床及流體流經粒子床之壓力降	55
4-5	流體化	60

第五章 流體流量之測量

5-1	測壓計	65
5-2	流速計	67
5-3	流率計	70
5-4	流量積算計	76

第六章 流體輸送機械

6-1	泵	78
6-2	氣體輸送機械	85
6-3	真空泵	88

第七章 管件及閥

7-1	管及其材料	90
7-2	管件	91
7-3	管之接合法	93
7-4	閥	94

第八章 流體之攪拌與混合

8-1	混合與攪拌定義	98
-----	---------	----

8-2	攪拌裝置及其特性	98
8-3	通氣攪拌槽	101
8-4	其他流體之混合	102
8-5	攪拌功率之推算與攪拌槽之規模放大	104

第九章 分離操作

9-1	過濾之種類與裝置	111
9-2	過濾理論	121
9-3	過濾操作與管理	126
9-4	濾渣之洗滌	128
9-5	離心分離之原理	129
9-6	各種離心分離器	130
9-7	離析原理	133
9-8	離析裝置	136
9-9	沉降實驗	139
9-10	稠化器之原理與計算	141
9-11	淨化方法	143
9-12	各種集塵氣體與淨化裝置及其選擇	143

第十章 固體操作

10-1	固體之物性	149
10-2	群體粒子之特性	152
10-3	粒徑分析	154
10-4	篩選	157
10-5	粉粒體之混合	160
10-6	粉粒體之輸送	162
10-7	滅積	168
10-8	造粒	175

10 - 9	浮選	178
--------	----	-----

第十一章 熱傳導輸送

11 - 1	熱傳導概論	180
11 - 2	傅立葉定律	180
11 - 3	熱傳導度	182
11 - 4	衡續狀態之熱傳導	184

第十二章 對流熱輸送

12 - 1	自然對流與強制對流	197
12 - 2	熱傳送係數	197
12 - 3	強制對流之熱輸送	199
12 - 4	自然對流之熱輸送	207

第十三章 沸騰與冷凝

13 - 1	沸騰現象	212
13 - 2	沸騰之熱傳送係數	216
13 - 3	冷凝現象	217
13 - 4	冷凝之熱傳送係數	218

附 錄

第一章 緒 論

1-1 前言

化學工程是工程學之一支，用以討論工業中之化學及物理變化，並設法將廉價之原料藉工業化程序變成有價值之產品。

化學工業之種類雖然很多，但其中涉及頗多共同之物理及化學變化。前者稱為單元操作 (unit operations)，為本書討論主題；後者稱為單元程序 (unit processes)，則不在本書討論範圍。

所謂單元操作，乃是化學工業中各種物理處理之總稱。重要的單元操作項目如下：1. 流體之流動，2. 過濾，3. 熱之傳送，4. 蒸發，5. 蒸餾，6. 濕度及空氣調理，7. 加熱、冷卻與保溫，8. 吸收，9. 萃取，10. 結晶，11. 乾燥，12. 混合，13. 固體之分離，14. 壓碎及研磨，15. 固體之分離，16. 固體之輸送。化學工業種類雖多，但只要學習其共同之理論即可簡化許多。例如蒸發為製鹽及製糖之共同操作；蒸餾為提煉石油與製造酒精之共同操作，雖所處理之物料、所採用機械之形式大小有所不同，但其原理則一。

一個優秀的化學工程師必須兼具多方面才能。他必須了解一個過程為何能進行及如何進行；他必須有足夠能力負起裝備之設計，安裝及操作之任務，而使一個過程能順利進行。例如於硝酸工業中，硝酸乃由二氧化氮與水起化學作用而成，此為放熱反應，若欲藉冷水不斷通過浸於熱硝酸中之管子而取掉熱量，以合理地控制反應效率，則化學工程師之任務乃是決定管長、管徑、管之材料選擇以及冷水流動速率使過剩之熱量可及時棄掉。除此之外，一個優秀之化學工程師亦應具有豐富之經濟知識，如此才能對某一工程之費用及利潤作預估，以決定該工程是否值得投資與進行。

1-2 單位與因次

凡是物理量均有單位，其單位常視使用之習俗與國情而定。目前常用之單位有公制與英制之分。科學研究多用公制，工程上慣用英制。公制單位，長度以厘米 (centimeter) 或米 (meter)，質量以克 (gram) 或仟克 (kilogram)，時間以秒 (second) 表示，故又稱 C.G.S. 制或 M.K.S. 制。英制單位，長度以呎 (foot)，質量以磅 (pound)，時間以秒 (second) 表示，故又稱 F.P.S. 制。

一般物理量以長度，質量及時間作為基量 (primary quantity)，其他各物理量依此基量所組成者稱為次量 (secondary quantity)，但是各物理量有許多單位可以表示，如長度可用米，厘米，毫米，呎，吋等表示，但為明確表示其長度特性，可用因次 L 表示。各物理量均可以符號表示其因次，如長度以 L ，質量以 M ，時間以 θ 等。故體積之因次為 L^3 ，加速度之因次為 L/θ^2 等。

由於使用單位可能為公制，也可能為英制，故需經常作單位之換算。單位換算表列於附錄(一)

[例 1-1]：一飛機之速度為 2200 呎/秒，試換算成若干哩/小時。

[解]：1 小時 = 3600 秒，1 哩 = 5280 呎

$$\therefore \frac{2200 \text{ 呎}}{\text{秒}} \times \frac{3600 \text{ 秒}}{1 \text{ 小時}} \times \frac{1 \text{ 哩}}{5280 \text{ 呎}} = 1500 \text{ 哩/小時}$$

工程上慣用長度 L ，時間 θ ，質量 M 及力 F 為基量。故在地球海平面上 1 kg 質量受地心引力為 1 kgf，亦即 1 kg 質量在海平面上之重量為 1 kg。此種力之單位稱為力之工程單位，以 kgf 表示。海平面上之重力加速度為 $g = 9.8 \text{ m/sec}^2$ ，則

$$F = \frac{mg}{g_c}, \quad g_c = \frac{mg}{F} = 9.8 \text{ kg (m/sec}^2\text{) / kg}_f \dots (1-1)$$

同理，1 磅質量在海平面上之重量為 1 磅力，海平面上之重力加速度為 32.174 ft/sec^2 ，故 g_c 之單位亦可表示為

$$g_c = 32.174 \frac{(\text{磅})(\text{呎})}{(\text{磅力})(\text{秒})^2} = \frac{32.174 (\text{lb}_m)(\text{ft})}{(\text{lb}_f)(\text{sec})^2} \dots (1-2)$$

式中， g_c 為力之單位變換因數，與重力加速度 g 在海面上之數值相同而單位與因次不同。

1-3 因次分析

化學工程中常有若干物理問題，情況甚為複雜，非通常理論或數學法則所能完全解決，於是使用因次分析法 (dimensionless analysis) 較為方便。

因次分析法為布來茲曼 (Bridgeman) 所創。布氏鑒於一般科學及技術上之基本方程式，不因採用單位之不同，形式上有所改變，乃將有關變數作合理之歸併，成為少數無因次羣 (dimensionless group)。例如流動在管內流動，其有關變數為管之內徑 (D)，流體速度 (u)，密度 (ρ)，粘度 (μ) 等四項。欲求彼等之關係，勢必令其中一項變化，並維持其他三項不變，像如此作一連串之實驗，藉求其結果，工作之冗繁實不待言。若將此四項合併成為無因次羣 $\frac{Du\rho}{\mu}$ ，則進行實驗時，每次可變更數項變數，而實驗之結果，僅視該無因次羣數值之變化，不必顧及各別變數之變化為何。

因次分析法之進行須循下列三步驟：(1) 列出影響該情況之變數；(2) 將各變數以其因次代入；(3) 將變數作適宜之排列，成為少數無因次羣，其方程式當成下列形式：

4 單元操作

$$X_0 = C X_1^a X_2^b X_3^c \cdots X_n^z \cdots \quad (1-3)$$

X = 變數。 C = 比例因數。 $a, b, c, \dots, z$ 為整數或分數。

[例1-2]：設單擺 (simple pendulum) 之擺動時間，視乎長度、質量及重力加速度諸變數。試用因次分析法求出各變數間之關係。

第一步：

變 數	符 號	因 次
擺 之 長 度	ℓ	L
擺 之 質 量	m	M
重 力 加 速 度	g	$L\theta^{-2}$
擺 動 時 間	t	θ

第二步：

$$t = C \ell^a m^b g^c$$

每一變數用其因次代入， $\theta = L^a M^b (L\theta^{-2})^c$

第三步：

因方程式中任一項之因次必須相等，故令方程左方各項因次之指數與右方相等。

θ 項： $1 = -2c$ ，因左方 θ 項之指數為 1，右方為 $-2c$ 。

L 項： $0 = a + c$ ，因左方 L 項之指數為 0，右方為 $a + c$ 。

M 項： $0 = b$ ，因左方 M 項之指數為 0，右方為 b 。

解之，得 $c = -\frac{1}{2}$ ， $a = \frac{1}{2}$ ， $b = 0$ 。

代入， 於是 $t = C \ell^{\frac{1}{2}} m^0 g^{-\frac{1}{2}}$ 。

$$\therefore t = C \sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad \text{或} \quad C = t \sqrt{\frac{g}{\ell}}$$

由上式可知擺之質量與擺動時間無關，物理學已證明其為正確。根據理論之分析，得知 C 之值為 2π 。此比例常數係藉數學方法或實驗求得之，非因次分析法所能為之。

1-4 物理平衡

當處理物質中之各相 (phase)，在一定溫度、壓力及化學成份作較長時間之接觸，則互相可達平衡。平衡之狀態，視當時情況而定，而構成狀態之各項性質不因時間而改變。所謂平衡，可包括物理平衡及化學平衡，而單元操作所指之平衡，為屬於物理平衡。

物質僅有三態，即固態、液態及氣態，但却有很多之相。凡是有境界面 (boundary) 之物質，均有多相存在。而同一相內之狀態，平衡時各部份將均勻存在。譬如水與四氯化碳互不相混，常溫下皆屬於液態，故不相混之水與四氯化碳有明顯之境界面存在，成為兩相共存，即水相與四氯化碳相。

若干重要之單元操作，例如蒸餾、萃取、乾燥、吸收及結晶等，包括有氣液、液液、液固、固氣等兩相接觸之物料分離或精製，其輸送程序終將趨於兩相平衡。相與相間平衡依 Gibbs 相律得

$$V = C - P + 2 \dots\dots\dots (1-4)$$

式中 V = 獨立變數， C = 成份數， P = 相數

例如純水之汽液兩相之平衡， $C = 1$ ， $P = 2$ ，代入上式得 $V = 1$ ，則純水之汽液兩相平衡，僅有一獨立變數可影響其平衡。又如水與乙醇二成份系之汽液兩相平衡， $C = 2$ ， $P = 2$ ，故得 $V = 2$ ，亦即有二獨立變數可影響其平衡。

1-5 輸送現象與輸送速率

1960年Bird所編著之“輸送現象”(Transport Phenomena)一書出版後，化學工程遂被認為有關化學工程科學與化學工程技術之總和，並借助於物理、化學之知識及以數學為工具，將其整理成一門更條理化，而有系統之科學，逐漸以理論之推演來代替以前從經驗探索所獲之技術。

近幾年來由於輸送現象之更趨明朗，各種單元操作之基本理論傾向於歸納成為動量，熱量與質量輸送，然後作有系統之研究與發展，促使實用上單元操作之高度技術急速進展。如吸收、乾燥與結晶等各單元操作，雖然其操作目的與方法各異，然後其操作之原理却一致，故質量輸送機構及質量輸送理論之預先了解，對於任何有關質量輸送之吸收，乾燥與結晶等操作均易於學習與運用，則單元操作之學習從輸送現象之基本原理着手，將有事半功倍之效。

自然界中許多程序之所以進行，多是未達平衡之故，於是輸送現象即發生。動量，熱量與質量之輸送，其輸送速率及方向，視位勢差與阻力兩項因素而定，其關係如下：

$$\text{輸送速率} = \frac{\text{位 勢 差}}{\text{阻 力}} \dots\dots\dots (1-5)$$

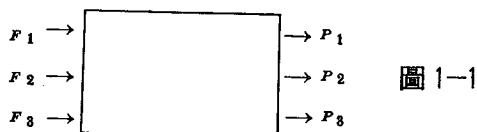
例如，流體流動之位勢差為速度差，熱量傳送之位勢差為溫度差，而質量傳送之位勢差為濃度差。

1-6 質量與能量之結算

質量不能創造亦不能毀滅。故進入系內之全部物質與離開系內之全部物質之質量相等，只須扣除在系內蓄積之量即可。在一連續程序

中物質如不蓄積，則輸入物質與輸出物質之質量流率 (mass flow rate) 相等，稱此程序之輸入與輸出呈穩態 (steady state)

。如下圖所示：



$\dot{m}_F$ 為輸入之質量流率， $\dot{m}_P$ 為輸出之質量流率， x_F 與 x_P 分別為輸入與輸出某成份之質量分率，則在穩態 (衡續狀態) 下其總質量結算式為：

$$(\dot{m}_{F_1} + \dot{m}_{F_2} + \dot{m}_{F_3}) - (\dot{m}_{P_1} + \dot{m}_{P_2} + \dot{m}_{P_3}) = (\text{蓄積量}) \cdots (1-6)$$

但在穩態下，蓄積量為零，故

$$(\dot{m}_{F_1} + \dot{m}_{F_2} + \dot{m}_{F_3}) = (\dot{m}_{P_1} + \dot{m}_{P_2} + \dot{m}_{P_3}) \cdots \cdots (1-7)$$

$$\text{或 } \Sigma \dot{m}_{F_i} = \Sigma \dot{m}_{P_j} \cdots \cdots (1-8)$$

同理某成份之質量結算式為：

$$\dot{m}_{F_1} x_{F_1} + \dot{m}_{F_2} x_{F_2} + \dot{m}_{F_3} x_{F_3} = \dot{m}_{P_1} x_{P_1} + \dot{m}_{P_2} x_{P_2} + \dot{m}_{P_3} x_{P_3}$$

$$\text{或 } \Sigma \dot{m}_{F_i} x_{F_i} = \Sigma \dot{m}_{P_j} x_{P_j} \cdots \cdots (1-9)$$

與質量一樣，能量既不創造亦不能毀滅。一般化學工程之各項化學變化或物理變化並不涉及原子分裂，雖然能量可以變化成各種形態，但總能量恒保持不變，此為能量不滅定律。對於非流動系統，系內之內能變化量 ΔE ，應等於對外所作之功 W 與外界對系內所加之熱量 Q 之代數和，即

$$\Delta E = \Sigma Q_i - \Sigma W_j \cdots \cdots (1-10)$$

若內能沒有變化，則所作之功等於所吸收之熱，其中外界加熱於系內或系內對外界所做之功，符號均為正，反之則為負。

習題

1. 換算下列單位

- ① 壓力 $P = 20 \text{ kgf/cm}^2$ 換算成若干 lb_f/in^2 ?
- ② 體積流量 $V = 100 \text{ gal/min}$ 換算成若干 m^3/hr ?
- ③ 粘度 $\mu = 1 \text{ g/(cm)(sec)}$ 換算成若干 $\text{lb}_m/(\text{ft})(\text{sec})$?
- ④ 加速度 $a = 10 \text{ cm/sec}^2$ 換算成若干 km/hr^2 ?

2. 名詞解釋

- ① 單元操作
- ② 單元程序

3. 某硝化作業產生廢酸之組成爲 21 % HNO_3 ，55 % H_2SO_4 ，24 % H_2O ，今擬在此廢酸中加入 96 % 之濃硫酸及 90 % 之濃硝酸，以形成含硝酸 28 %，硫酸 62 %，水 10 % 之硝化用混酸，如欲得生成之混酸 1000 kg，須用廢酸及 96 % 濃硫酸，90 % 濃硝酸各若干？
4. 加力於具有 2 磅質量之某物體，使其產生 20 ft/sec^2 之加速度，試求該力爲若干？

第二章 流體輸送之基本原理

2-1 流體之特性

所謂流體，乃指液體，氣體與蒸氣。流體無一定之形狀，能自由流動。在某溫度某壓力下，某一種流體有一定之密度。換言之，流體之密度與溫度，壓力有關，其中，液體之密度隨溫度與壓力之變化不大，而氣體與蒸氣之密度則對溫度與壓力之變化甚具敏感性，故稱液體為不可壓縮流體（*incompressible fluids*），氣體與蒸氣為可壓縮流體（*compressible fluids*）。

當流體以定質量流動速率通過導管時，稱為穩定流動；否則稱為非穩定流動。流體呈穩定流動時，單位時間從管之一端流入之質量必等於同時間從另一端流出之質量，亦等於流過管中任一橫斷面積之質量。穩定流動時，流體之流動與時間無關，非穩定流動時，流體之流動情形隨時間而異。

有關流體之幾個重要特性，與單元操作有關者，如流體之粘度，熱傳導度，擴散係數及流體之靜壓力均容後詳述。

2-2 流體之粘度

粘度（*viscosity*）為流體最重要之性質。流體由於具有粘度，因此對於切力（*shearing force*）有抵抗作用，粘度愈大，對切力之抵抗亦愈大。一刀片在水中滑行所需之力量，遠比以同速度在油中滑行所需之力為小，此證明油之粘度遠比水之粘度大。粘度對流體之流動影響甚鉅；粘度小之流體比粘度大者易於流動。