

單元操作與熱傳

原著者：A L. Lydersen

譯述者：謝立身 蕭聰明

乾泰圖書有限公司

單元操作與熱傳

原著者：A L. Lydersen

譯述者：謝立身 蕭聰明

江苏工业学院图书馆
藏 书 章

乾泰圖書有限公司

本書就化工用的單元操作與熱傳作統一探討。其程度以大專高年級為準，全部使用 SI 單位。除供作教科書外，又可作為實踐工程師手邊的參考書。在理論與實驗公式之後，均附以實際在實驗室與生產工廠中所獲得的資料作為例題，故為難得一見切合真實情況的教本。這本書的著者是挪威 Trondheim 大學化工系教授，也為本國科技出版界所少見的北歐著作。

特價新台幣160元

版權所有
翻印必究

出版者：乾 泰 圖 書 有 限 公 司

總經銷：科 技 圖 書 股 份 有 限 公 司

台北市重慶南路一段49號四樓之一

電 話：3118308・3118794

郵政劃撥帳號 0015697-3

七十四年六月初版

原 序

在本世紀 50 年代，很少人能具備化工程序的細部知識，結果“化學工程學”就成爲一項特殊課程，在歐美大學中開始作導引性的開講。由各種單元操作所建立的化工程序，得在其所形成的問題逐漸展開研究。例如，過濾原理，在此項單元操作下，不論用在礦砂洗滌、肥料製造、顏料合成、油脂過濾，以及製藥工業程序等，均屬相同。因之要研究化工程序，只需將若干種標準化的單元操作瞭解清楚，即可應付現代複雜的化學工業以及附屬的工業程序用。

在這下半世紀，單元操作的種類逐漸增加，由於更複雜的處理方法與日積月累的經驗資料，使單獨個人，不可能成爲單元操作的全科專家，因而改變了前半世紀的工業化學觀點。著者認爲：

“現今從事實際化學工業工程師，急切需要一種簡短而明確的教科書，內容包含具一般性的共同基本公式、經驗資料，與適用的文獻目錄，更含實際工程上要求的例題，加上說明要點與結果，列舉容易記住，不致忘懷而可依樣葫蘆作爲練習範本的習題等”。

本書對以上這些要求，將學生們與實踐工程師們所需要的機械式單元操作以及有關化工的熱傳遞問題編寫成書。書中儘量保持精簡扼要，但舉有充足、直接由工業實踐躬行所得的成果，提供參考。在其他有關細部解釋與儀錶器具說明以及其他特殊設計計算等凡一般教科書已有更詳細的解釋者，在此儘量避免重覆。這些可查閱 R.H. Perry 與 C. H. Chilton 所著的 Chemical Engineer's 手冊，立刻得到所需豐富資料。

化學工程師的任務，必需對其工作成果具有利潤的生產方式。這當然要靠生產品質與成本格價而得。故對最終產品與成本，全靠選擇單元操作的適當與否而定。這些因數只能從器具尺寸知識與其效率着

手，用先鋒實驗工場中所獲得有關量方面的資料。Kelvin 爵士對從事科學與技術工作者的警語“唯有能用數字表達與量度實際所得的，才算獲得成功”，值得我們深思熟慮。

本書對主要工具尺寸與所需能量等的計算，均有列論，但對應力計算以及很多細節設計，因其範圍過廣，事涉專門，需要機械工程師來幫忙。在此免談。

工程師必需樽節其自己的時光。這是說，務必以最少工作得到正確的要求。若在操作中的變異大於使用簡捷近似計算所得的誤差，就不必化上整天功夫從事複雜的正確計算。若能運用常識，加上隨時校正結果的良好習慣，這是最聰明的辦法。能隨時隨地檢查計算過程中產生任何誤差，將會永恒受到利益的。

A. Lydersen 賴德遜
挪威·Trondheim大學

單元操作與熱傳

目 錄

原 序

第一章 管道、接頭與裝置的壓力降

1.1 層 流.....	3
1.2 紊 流.....	3
1.3 Bernoulli 方程式.....	4
1.4 接 頭.....	8
1.5 螺旋管.....	9
1.6 管 堆.....	10
1.7 顆粒牀.....	12
1.8 雙相流.....	14
1.9 例 題.....	16
1.10 習 題.....	40
1.11 參考書目.....	43

第二章 因次分析與無因次羣

2.1 因次分析.....	45
2.2 模型定律.....	47
2.3 例 題.....	48
2.4 習 題.....	64
2.5 參考書目.....	65

第三章 流動量測

3.1 噴嘴與孔口.....	66
----------------	----

2 單元操作與熱傳

3.2	文氏計	70
3.3	皮托管	70
3.4	浮子流量計	71
3.5	磁力流量計	72
3.6	例題	72
3.7	習題	80
3.8	參考書目	81

第四章 泵吸、壓縮與膨脹

4.1	泵吸	82
4.2	離心泵	84
4.3	正位移泵	86
4.4	壓縮	87
4.5	真空泵	96
4.6	膨脹	101
4.7	蒸汽噴射器	102
4.8	例題	105
4.9	習題	136
4.10	參考書目	138

第五章 攪拌

5.1	攪拌器	139
5.2	功率消耗	141
5.3	攪拌效應	141
5.4	例題	144
5.5	習題	150
5.6	參考書目	151

第六章 粒子與液滴的流動機構

6.1	終端速度	153
-----	------	-----

6.2	分 類	156
6.3	阻滯沉降	158
6.4	流體化	158
6.5	空氣輸送	161
6.6	液滴與氣泡	162
6.7	傾 析	162
6.8	離心機、旋風分離器與水力旋風器	162
6.9	衝擊式分離器	174
6.10	金屬鋼除霧器	176
6.11	纖維除霧器	179
6.12	細菌過濾器	180
6.13	袋式過濾器	180
6.14	洗滌器	182
6.15	靜電集塵器	190
6.16	例 題	195
6.17	習 題	222
6.18	參考書目	223

第七章 液體過濾法與浮選法

7.1	過 濾	226
7.2	浮 懸	240
7.3	例 題	243
7.4	習 題	254
7.5	參考書目	255

第八章 霧化、分散、勻和化、粉碎與研磨

8.1	在氣體中液體的霧化	256
8.2	氣體在液體中的分散	257
8.3	液體在另一液體中的分散	258
8.4	勻和化	260

4 單元操作與熱傳

8.5	粉粹與研磨	261
8.6	例題	265
8.7	習題	268
8.8	參考書目	269

第九章 穩態與傳遞

9.1	熱傳導	270
9.2	輻射	275
9.3	對流	278
9.4	管堆	283
9.5	盤管	284
9.6	攪拌容器	284
9.7	刮削管	285
9.8	顆粒牀	286
9.9	液體薄膜	286
9.10	冷凝	287
9.11	沸騰	289
9.12	總熱傳	292
9.13	溫度差	293
9.14	熱交換器	297
9.15	蒸發	306
9.16	例題	309
9.17	習題	339
9.18	參考書目	341

第十章 不穩定熱傳

10.1	包含相的改變	344
10.2	無相的變化	347
10.3	Schmidt 圖解法	351
10.4	例題	355

10.5 習 題.....	372
10.6 參考書目.....	373

第十一章 經濟能量

11.1 最低需求能量.....	375
11.2 廢熱回收.....	377
11.3 低溫操作.....	378
11.4 多效蒸發.....	379
11.5 熱 泵.....	381
11.6 其它程序.....	382
11.7 例 題.....	383
11.8 習 題.....	389
11.9 參考書目.....	390

附錄一 單位、換算因數與符號

A1.1 單 位.....	392
A1.2 字 首.....	393
A1.3 換算因數.....	393
A1.4 溫 度.....	397
A1.5 符號說明.....	398

附錄二 氣體與液體的物理特性

第一章

管道、接頭與裝置的壓力降

假設讀者對基本流體靜力學與動力學已有了認識；因此，本章主要限於對一般化學工程上計算的方程式與經驗數據作集中整理。討論的範圍也僅限於 Newton 流體(Newtonian fluids)這是一種黏滯度 (viscosity) 依其速度及時間梯度 (gradient) du/dy 的流體；被定義成如下的方程式

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.1)$$

其中， τ 為剪應力 (shear stress)，而 du/dy 為速度梯度 (velocity gradient)，其方向與流體流動的方向成垂直，如圖 1.1 所示。

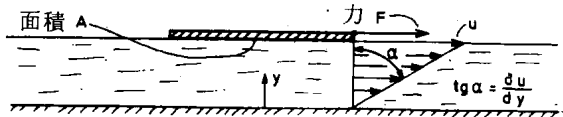


圖 1.1 由力 F 推動，流體在兩平板間，其中有一板不動的層流 (laminar flow) 速度分佈曲線

黏滯度 μ 的單位為 $g/(cm \cdot s)$ (cgs 制)，在 SI- 制中為 $N \cdot s/m^2$ 。

膏狀物 (paste) 與含纖維物的懸浮液等，通常均為非 Newton 流體 (non-Newtonian fluids)。在 Newton 流體中，速度梯度 du/dy 為剪應力的線性函數，如圖 1.2 所示的曲線 b 如 a，c 及 d 線則為不同型態的非 Newton 流體中 du/dy 與剪應力間的關係曲線。通常，許多非 Newton 流體，其黏滯度為已消逝 (prehistory) 流動的函數；亦即同時為剪應力與時間兩者的函數。

圖 1.3 所示為一種 Bingham 塑性流體 (Bingham plastic

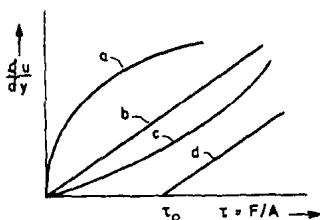


圖 1.2 剪應力 $\tau = F/A$ ，為速度梯度 du/dy 的函數；圖中的(a): 膨脹性流體；(b): 牛頓型流體；(c): 偽塑性 (Pseudo-plastic) 流體；(d): Bingham型塑性流體

fluid) 流經一長度為 L 的管子，作用在半徑 r 的圓柱體上的力為 $F = p\pi r^2$ ，其表面積 $A = 2\pi rL$ 。其剪應力為

$$\tau = p\pi r^2 / 2\pi rL = \frac{p}{2L} r \quad (1.2)$$

即：剪應力隨半徑 r 的增加而作直線增大，起始剪應力 (threshold shear stress) τ_0 (見圖 1.2) 在其半徑為 r_0 時即可求得。當 $r < r_0$ ，剪應力小於起始剪應力 τ_0 時，該部分流體的移動，如同一個固體棒。當 $r > r_0$ ，其速度梯度隨着半徑增加而增大，如圖 1.3 所示。

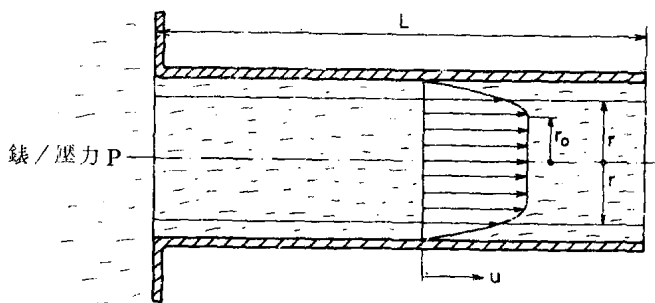


圖 1.3 為 Bingham 型塑性流體流經長 L ，壓力降 p 的管道

有關非 Newton 流體的計算，讀者可另參考書目中的(1)，(2)。

1.1 層 流

以低速流經一直線管路時，所有流體單位的移動與管軸平行。同時，所有的流體單位，凡與軸的距離相同，其流速亦相同。速度分佈曲線如圖 1.4 所示，呈一拋物線，其平均速度 V ，為中心最大速度 $u_{\max}$ 的一半。此種流動型態，在特定點的速度為一定值，而與時間無關，因其呈一種層次分明的流動，通常稱為流線性流動 (streamline flow) 或黏滯流 (viscous flow)。

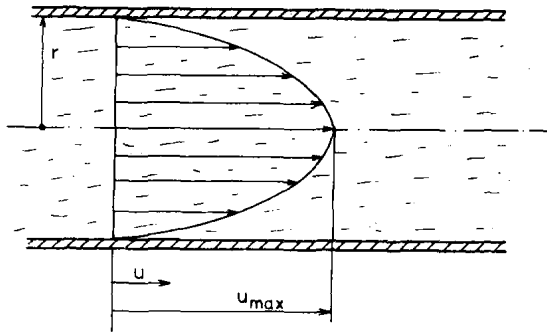


圖 1.4 層流：拋物線形速度分佈，平均速度
 $V = u_{\max}/2$

在單元操作 (unit operation) 中，單純層流僅出現在少數的過濾。濾餅的細孔道 (tiny channel) 中，才有若干非 Newton 流體以及極端黏滯性 Newton 流體的流動。

1.2 紊 流

在高速時，旋渦的慣性力 (inertial force) 與黏滯力 (viscous force) 的比，亦即 Reynolds 數 $Re = \rho V D / \mu$ ，在一直管中超過 2300，管中間旋渦會不時產生與消失，接近管壁的流動，大致為層流，因此會有一過渡區域在層流與旋渦流之間。此旋渦流常稱為紊流 (turbulent flow)。

4 單元操作與熱傳

在直管中，紊流的平均速度 V 等於 $u_{\max}/1.2$ (圖 1.5) 接近管壁的層流非常重要，因其提供流體整體與管壁熱傳與質傳 (heat and mass transfer) 的阻力，當 Reynolds 數從 $Re = 10,000$ 升到 $Re = 100,000$ 時，層流厚度由 $0.0043r$ 減小到 $0.00055r$ 。

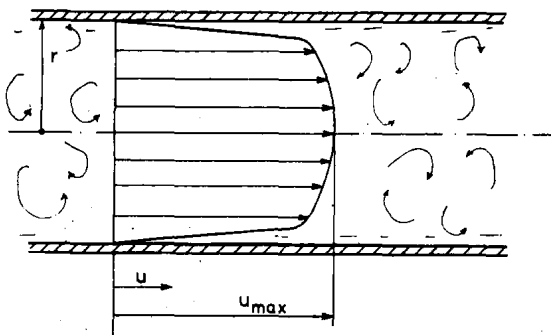


圖 1.5 紊流的平均速度 (流動方向) $V = u_{\max}/1.2$

1.3 Bernoulli 方程式

Bernoulli 方程式在無摩擦力不可壓縮的流體，可由機械能平衡原理導出每單位質量，在某一定點，其機械能為下列各項的和

p/ρ ：為流體流動所作的功， $1/\rho$ 為對壓力 p 的阻力。

$V^2/2$ ：單位質量的動能。

zg ：取水平基準面 $0-0$ 為參考面，單位質量的位能。

在圖 1.6 中，點 1 與點 2 間的流動，若用單位質量的流體，不考慮能量的聚積與摩擦力，則 Bernoulli 方程式可寫為

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + z_2 g$$

或

$$p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + z_1 \rho g = p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + z_2 \rho g \quad (1.3)$$

上式中每單位面積所受的力以 Pa 或 N/m^2 計。將式 (1.3) 除以 ρg ，得

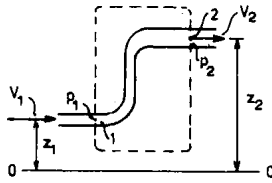
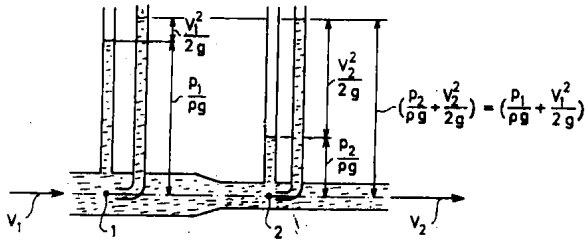


圖 1.6 從點 1 到點 2 流動的能量平衡

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (1.4)$$

式 (1.4) 的長度或高度單位為 m。第一項稱為壓力頭 (pressure head)、第二項稱為速度頭 (velocity head)；它們代表液體液面的高度如圖 1.7。

圖 1.7 在無摩擦流動。從點 1 到點 2 的壓力頭 ($p/\rho g$) 與速度頭 ($V^2/2g$)

在真實流體的流動中，由於流體本身的摩擦力有些機械能會轉變為熱能。因摩擦損耗的機械能，可用靜壓 Δp_f 表示，將此項加在式 (1.3) 的右邊，得有摩擦損耗的流動機械能平衡方程式

$$p_1 + \rho \frac{V_1^2}{2} + z_1 \rho g = p_2 + \rho \frac{V_2^2}{2} + z_2 \rho g + \Delta p_f \quad (1.5)$$

或

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{\Delta p_f}{\rho g} \quad (1.6)$$

6 單元操作與熱傳

其中，式 (1.5) 具有壓力的因次 (Pa 或 N/m^2)，式 (1.6) 的高度單位為 (m)。

在一直徑為 D ，流速一定的水平管中，相距 L 長的兩點間，由於摩擦損耗所產生的壓力降 (pressure drop)，其摩擦力為 $\Delta p_f (\pi/4) D^2$ 則管壁與流體間的剪應力，可用式 (1.1) 得

$$\tau_w = \frac{\Delta p_f \frac{\pi}{4} D^2}{\pi D L} = \frac{\Delta p_f D}{4L} = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_w$$

或

$$\Delta p_f = 4 \frac{L}{D} \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_w \quad (1.7)$$

在紊流中，層流層的厚度幾與其流動的動能成比例關係，而在壁上的速度梯度 $(du/dy)_w$ ，亦與動能 $\rho V^2/2$ 成正比。因此，式 (1.7) 可寫成

$$\Delta p_f \approx 4 f \rho \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \quad (1.8)$$

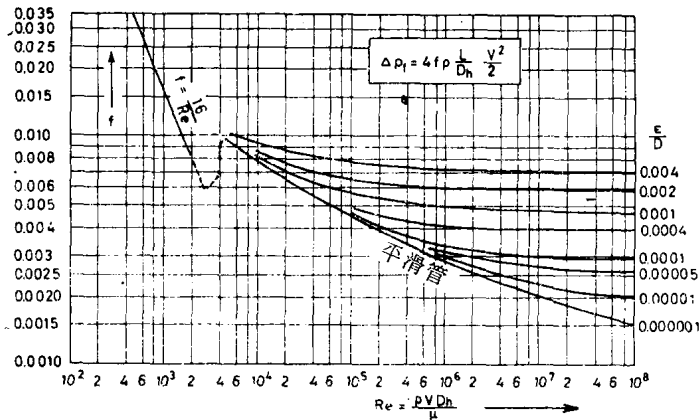


圖 1.8 在層流及紊流區，用摩擦因數 f 為 Reynolds 數 $Re = \rho V D / \mu$ 的函數畫出的關係圖 (3)。計算紊流 ($Re > \sim 2,300$) 時，其誤差約為 $\pm 10\%$

其中， f 為摩擦因數，由 Reynolds 數（即內聚力與附着力的比）及管壁的粗糙度而定

$$f = f(\text{Re}, \epsilon/D) \quad (1.9)$$

上式中， Re 為 Reynolds， ϵ/D 為壁面對管徑不均勻度的比。層流中（ $\text{Re} < 2300$ ）的摩擦因數為 $4f = 64/\text{Re}$ 。圖 1.8 中顯示層流的摩擦因數與紊流摩擦因數的經驗值。至於表面粗糙度的數值，在表 1.1 中列出。

表 1.1 管表面的粗糙度

材 料	ϵ mm
抽製管（銅、鉛、玻璃）	0.0015
抽製管鋼管	
新品	0.04-0.15
已用品	0.10-0.20
略銹品	0.2-0.5
鍍鋅鐵	0.15
銲接鋼管	
新品	0.05-0.1
已用品	0.15-0.25
附略銹層	0.4
抗銹銅	0.01
光混凝土	0.3-0.8
木料、新、鉋光	0.2
塑膠無縫管，直徑 < 200 mm	0.1
玻璃纖維補強塑膠管，直徑 > 200 mm	0.05-0.085

式（1.8）與圖 1.8，適用於管中的流動。若用於其他截面的管道中，則 D 需用水力直徑（hydraulic diameter） D_h 取代修