

鄧 禮 堂 編著

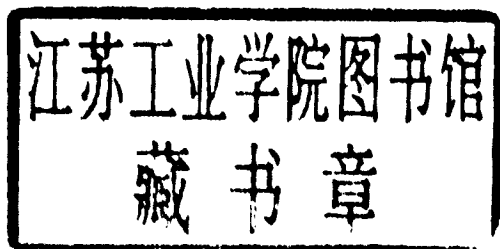
單元操作實驗



協志工業叢書

鄧 禮 堂 編著

單元操作實驗



協志工業叢書出版股份有限公司

協志工業叢書

知識應爲萬人所享有，我們承繼前人之精神遺產，得以建立現代之文化。前人既有良知傳給我們，我們應將此良知推廣發展遺留給後人。而要盡此責任，必先深切認識前人之功績。

我們是一羣從事工業的人，希望在其進步方面有一點貢獻。謹此發行協志工業叢書，想與世人一同研究先進之業績。若能藉此啓發青年學徒之工業思想，實爲幸甚。

協志工業振興會

理事長 林 尚 志 謹啓

中華民國四十四年十一月十一日

中華民國六十五年六月初版

協志工業叢書（自然二四）

單元操作實驗

平裝本定價一二〇元

精裝本另加二十五元

編著者：鄧 禮 堂

台北市北安路573巷2弄4號之3

出版者：協志工業叢書
出版股份有限公司

新聞局出版登記證局版臺業字第〇七八四號

發行人：林 挺 生

臺北市中山北路三段四〇號

發行所：協志工業叢書
出版股份有限公司

臺北市中山北路三段四〇號
電話：五四一（三七一）
郵撥帳號：第一三四九九號

印刷所：原色印刷有限公司

臺北市西園路一段八〇號

經銷處：全省各大書局

版權所有 不准翻印

自序

「單元操作」乃化學工程中主要部門之一，不僅為應用化學研究之基礎，且為化學工業實地應用之法門。

筆者在大同工學院講授「單元操作」，並負責「單元操作實驗」多年，深感優良之教材實為有效教學之基礎，惟現今坊間有關單元操作實驗之書籍甚為缺乏，有鑒於此，故不揣謏陋，編成此書，以應需要。

本書計分流體流動、熱傳遞、質量輸送以及粉粒體技術四大部份，共有四十一個實驗項目，實驗內容皆係根據現有設備，採用統一格式撰寫。實驗所涉及之理論與實驗裝置皆配以簡明圖表，部份設備並附以照片以增加其真實感。本書之內容力求完備，編排力求嚴謹，務期學生能經由此書而瞭解單元操作理論與實務配合之重要性，熟悉單元操作中各種機械之裝置原理及其操作法，並藉此培養學生撰寫完整而有條理之實驗報告與蒐集參考資料之能力。

本書內容適用於大學工學院化工系三、四年級，可供上下兩學期教學之用；專科學校化工科高年級採用時，可由教師酌予刪減；同時，本書亦可供與化學工業有關之技術人員自修與參考。

筆者才疏學淺，而此書倉促付梓，漏誤之處，在所難免，尚祈國內外先進，不吝批評與指教，俾再版時得以修正，無任感荷。

本書承蒙大同工學院林院長挺生、林教務長昭揚、化工系楊主任金平以及協志工業叢書出版公司王總經理順南之鼓勵與支持，得以順利出版，特此謹致謝忱。此外，本書之編成，尚蒙機械系同仁提供「自然對流傳熱」、「強制對流傳熱」、「膜式與滴狀冷凝」以及「叉流型熱交換器」等四項實驗之珍貴資料，感激不盡。又本

系林子方教授與江文彥教授在本書撰寫期間，提供許多寶貴意見；朱宗澤 同仁義務爲本書校對，在此一併致謝。最後，對內子曉麗所給予之精神鼓勵與協助整理稿件，並致由衷之謝意。

鄧 禮 堂 謹識

民國六十五年五月於大同工學院化工系

單元操作實驗

目 錄

自 序

第一部 流體流動 (Fluid Flow)

實驗 1. 因次分析——液滴之形成 (Dimensional Analysis— Drop Formation)	1
實驗 2. 牛頓液體之粘度 (Viscosities of Newtonian Liquids)	10
實驗 3. 非牛頓流體之流動 (Fluid Flow of Non-Newtonian Fluids)	21
實驗 4. 浮子流量計 (Rotameter)	32
實驗 5. 皮托管 (Pitot Tube)	43
實驗 6. 堰 (Weir)	54
實驗 7. 銳孔流量計與文氏流量計 (Sharp-edged Orifice Meter and Venturi Meter)	63
實驗 8. 管中流體流動之摩擦係數 (Friction Factors for Flow in Circular Pipes)	82
實驗 9. 閥特性係數之決定 (Determination of a Valve Coefficient)	96
實驗 10. 射流時間之測定 (Determination of Efflux Time)	105
實驗 11. 離心泵之運轉試驗 (Performance Test of a	

2 單元操作實驗

Centrifugal Pump)	114
實驗 12. 攪拌所需之動力 (Power Requirement of Agitation)	132
實驗 13. 填充床與流體化床 (Flow of Fluid through Packed and Fluidized Beds)	153
實驗 14. 填充塔之壓力降落 (Pressure Drop of a Packed Tower)	168
實驗 15. 恒壓過濾 (Constant Pressure Filtration)	181

第二部 熱傳遞 (Heat Transfer)

實驗 16. 固體之熱傳導係數 (Thermal Conductivity of Solids)	196
實驗 17. 固體中之溫度分佈 (Temperature Profiles in Solids)	211
實驗 18. 自然對流傳熱 (Heat Transfer by Natural Convection)	220
實驗 19. 強制對流傳熱 (Heat Transfer by Forced Convection)	238
實驗 20. 膜式與滴狀冷凝 (Film-type and Dropwise Condensation)	249
實驗 21. 紅外線輻射 (Infrared Radiation)	269
實驗 22. 總包傳熱係數 (Overall Heat Transfer Coefficient)	277
實驗 23. 攪拌槽中之傳熱 (Heat Transfer in Agitated Tank)	290
實驗 24. 填充床中之傳熱 (Heat Transfer in Packed Bed)	299

實驗 25. 套管熱交換器 (Double Pipe Heat Exchanger)	312
實驗 26. 叉流型熱交換器 (Cross Flow Heat Exchanger)	325

第三部 質量輸送 (Mass Transfer)

實驗 27. 擴散係數之測定 (Determination of Diffusivity)	337
實驗 28. 濕壁塔 (Wetted Wall Column)	345
實驗 29. 吸收 (Absorption)	361
實驗 30. 乾燥 (Drying)	377
實驗 31. 蒸發 (Evaporation)	393
實驗 32. 冷卻塔之操作 (Cooling Tower Performance)	401
實驗 33. 平衡蒸餾 (Equilibrium Distillation)	412
實驗 34. 簡單蒸餾 (Simple Distillation)	426
實驗 35. 泡罩塔蒸餾 (Distillation in a Single Bubble Cap Column)	433
實驗 36. 攪拌與溶解 (Agitation and Dissolution)	450

第四部 粉粒體技術 (Particulate Technology)

實驗 37. 篩析 (Screen Analysis)	457
實驗 38. 以沉降法測定粉體粒徑分佈 (Measurement of Particle Size Distribution of Powders by Sedimentation Analysis)	468
實驗 39. 旋風分離器 (Cyclone Separator)	497
實驗 40. 粉體比表面積之測定 (Determination of Specific Surface Area of Powder)	509

4 單元操作實驗

實驗 41. 壓碎 (Crushing)	519
----------------------------	-----

附 錄 (Appendix)

附錄 I 實驗數據之處理 (Treatment of Experimental Data)	527
附錄 II 報告之寫法 (Report Writing)	559
附錄 III 實驗規則 (Laboratory Rules)	562
附錄 IV 熱電偶 (Thermocouple)	564
附錄 V 各坐標系之微分平衡式 (The Differential Balances Expressed in Several Coordinate Systems) ...	575
附錄 VI 單位換算表 (Table of Conversion Factors)	580
中英文名詞對照表	585

實 驗 1

因次分析——液滴之形成

(Dimensional Analysis — Drop Formation)

一、目 的：

學習應用因次分析 (Dimensional Analysis) 法以研討在兩種不互溶之液體中，影響液滴形成之物理因素並求出有關之無因次羣 (Dimensionless Groups) 間其相互關係之實驗式。

二、理 論：

在吾人日常接觸到的許多實際問題中，常遇到一些非常複雜之問題，有些甚至不能直接用數學上之理論來分析處理。在這種情況下，如要了解各變數間之關係，因次分析 (Dimensional Analysis) 是一個有力之數學工具。但此方法不能提供吾人各變數間關係之全部知識，還需依靠實驗方能獲得解決，不過却已大大的減少了實驗之時間。因此，必須先知道影響所研究系統之所有變數，再將因次分析和實驗配合起來，才能發揮其效用。

一般而言，對一切之物理現象，如使用之基本量度單位一致，則表示物理量間相互關係之方程式與所選用之單位制度無關，函數間關係不變。此時之方程式稱為完全方程式。

今假設對某一問題共需考慮 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 等 n 個變數 (包括因次常數)，形成 $\phi(\alpha, \beta, \gamma, \dots) = 0$ 之完全方程式，以及用 m 個基本因次來分析此問題，則 $\alpha, \beta, \gamma, \dots$ 等 n 個變數將按一定規律組合成 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots$ 等 $n - m$ 個無因次群 (Dimensionless

2 單元操作實驗

Groups)，成如下之關係：

$$F(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots) = 0 \quad (1)$$

此稱為 π 定理 (Buckingham's Pi Theorem)。它使得吾人在研究時不必測定變數本身間之關係，而只需測定它們邏輯似組合的某些無因次群間之關係。

如圖 1-1 所示，與液體 A 不相混合之液體 B 在針尖形成液滴後徐徐放出，所形成液滴之體積與針孔之內徑、液體 B 之密度、液體 A 與液體 B 之密度差、兩液體間之表面張力以及重力加速度有關。故這些變數間之關係可以下式表示之：

$$V = f \Delta \rho^a \sigma^b \rho_B^c g^d D^e \quad (2)$$

其中 a, b, c, d, e, f ：未定常數(—)

V ：液滴之體積 (cm^3)

$\Delta \rho$ ：液體 A 與液體 B 之密度差
(g/cm^3)

σ ：液體 A 與液體 B 間之表面張力
(g/sec^2)

ρ_B ：液體 B 之密度 (g/cm^3)

g ：重力加速度 (cm/sec^2)

D ：針孔之內徑 (cm)

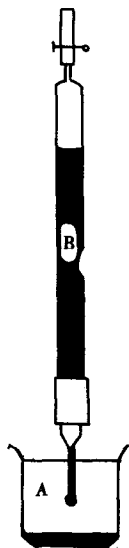


圖 1-1 液滴之形成

若以 L 代表長度因次， M 代表質量因次， T 代表時間因次，將適當之因次代入，(2) 式可寫成如下之因次式：

$$L^3 = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{M}{T^2}\right)^b \left(\frac{M}{L^3}\right)^c \left(\frac{L}{T^2}\right)^d L^e \quad (3)$$

(3)式兩邊之因次必須相等，故：

$$L : 3 = -3a - 3c + d + e$$

$$M : 0 = a + b + c \quad (4)$$

$$T : 0 = -2b - 2d$$

吾人對此物系共考慮 6 個變數並用 3 個基本因次 (L 、 M 與 T) 分析之，根據前述之 π 定理，則有 $6 - 3 = 3$ 個無因次群；(4)式共有 a 、 b 、 c 、 d 、 e 等五個未知數，僅有三個方程式，故把 a 、 b 當作常數，就 c 、 d 、 e 三未知數解(4)之聯立方程式可得

$$c = -a - b$$

$$d = -b \quad (5)$$

$$e = 3 - 2b$$

將以上所得之值代入(2)式整理後得：

$$f = \left(\frac{D^3}{V}\right)^{-1} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_B}\right)^{-a} \left(\frac{\sigma}{D^2\rho_B g}\right)^{-b} \quad (6)$$

本實驗乃改變 D 、 $\Delta\rho$ 、 ρ_B 以及 σ 之值時，測定 V 值，並利用此實驗數據，求出 f 、 a 與 b 之值。

三、實驗裝置：

實驗裝置如圖 1-2 所示。

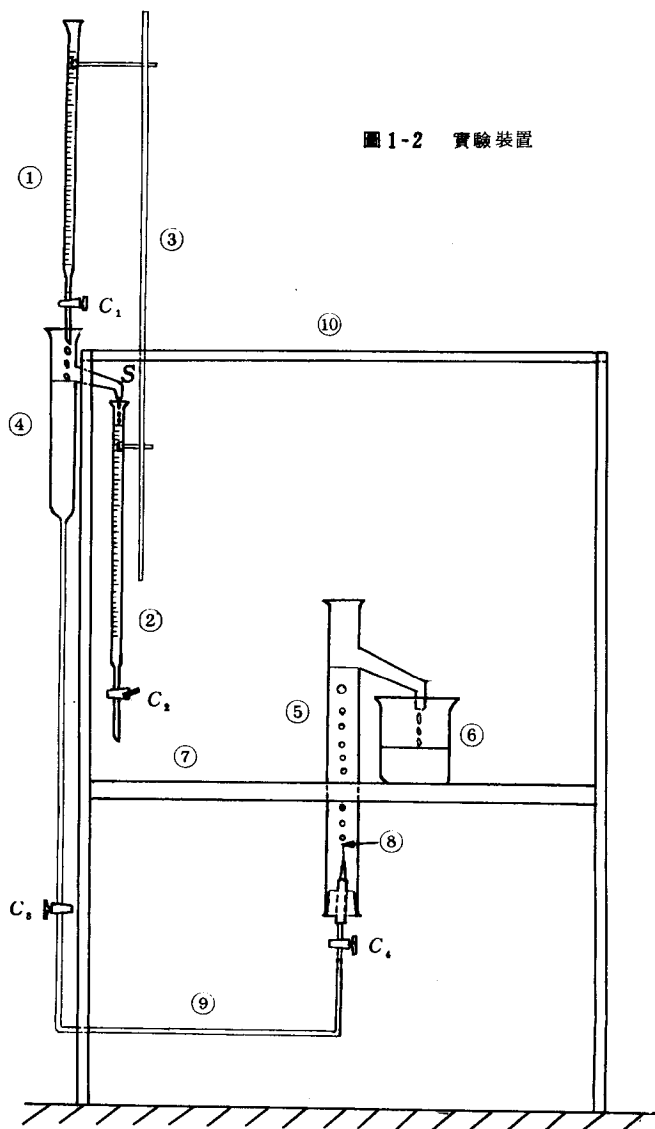
①、②：50 cc 滴定管

③：固定滴定管①與②用之鐵棒

④、⑤：附有支管之玻璃筒

4 單元操作實驗

圖 1-2 實驗裝置



- ⑥：燒杯
- ⑦：木板
- ⑧：針尖
- ⑨：玻璃製導管或橡皮管
- ⑩：萬能角鋼製成之鐵架
- C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 ：活栓
- S：支管

四、實驗步驟：

- (1) 將液體 A〔連續相 (Continuous Phase)〕注入玻璃筒⑤中，液體 B〔分散相 (Dispersion Phase)〕注入滴定管①中。打開活栓 C_1 、 C_2 及 C_4 ，使液體 B 充滿於針尖⑧與①間之管中，注意其間不允許有氣泡存在。然後關閉 C_1 與 C_2 。
- (2) 首先調整活栓 C_4 ，使在針尖上形成相當大之液滴，以便能讀取液滴之形成時間 (Formation Time)。(一般而言，在針尖形成之液滴大小係與通過針孔之流速有關，但若將液滴之形成時間加長，流速超過界限值時，液滴之大小將成一定，不再受流速之影響。此界限流速雖因針孔直徑與液體 - 液體物系之物理性質而異，但通常都是 2~3 秒 / 滴，亦即液滴之生成時間每滴在 2~3 秒以上時，液滴之大小不受影響。)
- (3) 打開活栓 C_1 ，使液體 B 由支管 S 溢流至滴定管②，然後關閉 C_1 ，讀取與記錄滴定管①與②中液體 B 之體積。
- (4) 同時打開 C_1 及 C_2 ，此時，針尖上開始有液滴形成，數所形成之液滴數並記錄形成液滴之時間。
- (5) 約產生 50 滴 (參考值) 之液滴後，關閉 C_1 與 C_2 ，記錄正確之液滴數及此時滴定管①與②之讀數。將滴定管①所減少液體 B 之體積減流向滴定管②之體積所得之差，除以總液滴

6 單元操作實驗

數便得每一液滴之體積 V 。

(6) 調整 C_4 ，改變液滴之大小，重複步驟(2)~(5)。

(7) 改變針尖之大小與液體 B (見表 1-1)，重複步驟(2)~(6)。

註：本實驗之液體 A 係以水為試料；供作液體 B 用之試料與其物理性質如表 1-1 所示。此外，當使用較水重之液體 B 時，針必須倒置 (見圖 1-1，此時液體 B 較液體 A 重)，或將液體 A 與液體 B 二者之位置互換。

表 1-1 各種試料之物理性質

較水輕之試料	密度 (g/cm^3)	和水之間之表面張力 (dyne/cm)
苯 (Benzene)	0.87865 (20°C)	34.96 (20°C)
正己烷 (n-Hexane)	0.659 (20°C)	51.1 (20°C)
乙醚 (Ethyl Ether)	0.71925 (15°C)	9.69 (20°C)
較水重之試料		
四氯化碳 (Carbon Tetrachloride)	1.595 (20°C)	45.05 (20°C)

五、數據記錄與報告事項：

(1) 數據記錄：

液體 A ：

液體 B ：

$\Delta\rho/\rho_B$ ：

操作次數	針孔 內徑 $D(\text{cm})$	滴定管① 所減少之 體積 (ml)	流向滴 定管② 之體積 (ml)	液滴數 (-)	液滴 體積 $V(\text{ml})$	D^3/V (-)	$\frac{\sigma}{D\rho_B g}$ (-)	液滴之 形成時 間 $t(\text{sec})$

註：本實驗所採用之針尖，其號碼與針孔內徑為：

針尖號碼	針孔內徑 (cm)
No. 16	0.123
No. 17	0.101
No. 20	0.068
No. 24	0.035

(2) 結果之整理：(參考附錄 I 實驗數據之處理)

(a) 將(6)式兩邊取對數得：

$$\ln \left(\frac{D^3}{V} \right) = -\ln f - a \ln \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_B} \right) - b \ln \left(\frac{\sigma}{D^2 \rho_B g} \right) \quad (7)$$

當液體之組合為一定，上式右邊之第2項乃一定。故如以 $\Delta \rho / \rho_B$ 為參數，以 $\ln(D^3/V)$ 對 $\ln(\sigma/D^2 \rho_B g)$ 作圖，(可在全對數紙上以 D^3/V 對 $\sigma/D^2 \rho_B g$ 作圖)，若以上所做之因次分析為正確，可得一組平行線，自平行線之斜率可得 b 值，如圖 1-3 所示。

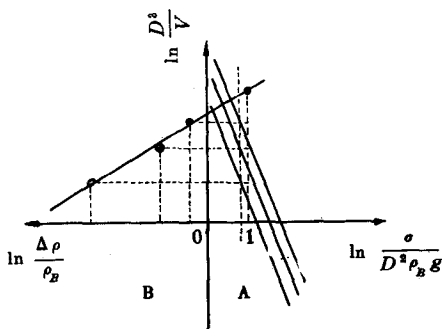


圖 1-3 實驗數據之處理

(b) 如圖 1-3 所示在 A 處，作任意直線平行縱軸與各平行線相交，得數交點。將交點之 $\ln(D^3/V)$ 值移至 B 處，在其橫軸上定出對應各液體組合之 $\ln(\Delta\rho/\rho_B)$ 值，可得如圖示之直線。

(c) 若 $\sigma/D^2\rho_B g$ 為一定，自(7)式得

$$\ln\left(\frac{D^3}{V}\right) = -a \ln\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_B}\right) - \ln K \quad (8)$$

$$\text{而 } \ln K = + \ln f + b \ln\left(\frac{\sigma}{D^2\rho_B g}\right) \quad (9)$$

故以 $\ln(D^3/V)$ 對 $\ln\left(\frac{\Delta\rho}{\rho_B}\right)$ 作圖，若以上所做之因次分析為正確，亦可得一組平行線*，自平行線之斜率可得 a 值。又自圖上讀取 $\Delta\rho/\rho_B = 1$ 時之 D^3/V 值，得 K 值後計算 f 值。

六、討論問題：

1. 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。試用因次分析法證明擺動時間與擺之質量無關。
2. 已知球體在液體中之沉降速度為球之直徑、液體之密度、粘度以及重力加速度之函數，試利用因次分析法求其中變數間之關係，並設計一實驗來求這些無因次群間之未定常數。
3. 試討論因次分析之用途。
4. 試改用長度、質量、時間、力四因次系統進行因次分析，並將其結果與(6)式比較。

*若不能得到平行線，則表示(8)式所選擇之無因次群不適合本實驗，必須再以因次分析之手法，另找他種無因次群。