

化 學 工 程

(化工計算)

CHEMICAL ENGINEERING

PAUL P. DE RIENZO, P.E.

吳永連 編譯

復 文 書 局

化 學 工 程

(化工計算)

CHEMICAL ENGINEERING

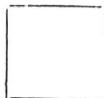
PAUL P. DE RIENZO, P.E.

吳永連 編譯

復 文 書 局

化 學 工 程

版權所有



翻印必究

中華民國六十七年十月初版發行

平裝特價 72 元

著 作 者： PAUL P. DE RIENZO, P.E.

編 譯 者： 吳 永 連

發 行 者： 吳 主 和

發 行 所： 復 文 書 局

地址：臺南市東門路421巷28號

電 號：3 7 0 0 0 3 號

郵 政 劃 撥 帳 戶 32104號

No.28. LANE421 DONG-MEN
ROAD TAINA TAIWAN REPUB-
LIC OF CHINA
TEL: 3 7 0 0 0 3

行政院新聞局登記證局版台業字第 0 3 7 0 號

原 序

依作者的經驗，一般職業工程執照的候選人可分成兩類：一類是剛畢業的年輕工程師，一類是已有相當經驗，但因為某種原因而未曾參考執照考試的人。這本書對他們都有很大的幫助。這本書不是要用來代替標準的化工教科書或化工手冊，而只是敘述一些化工上遇到的問題並尋求解答而已。

作者無意把所有的化工問題都包括在這本書裏，只是把考試上常見的單元操作 (unit operation)、程序應用等問題濃縮在本書裏。這包括最普通的流體流動、熱量傳送、質量傳送等單元操作，也包括某些設備和程序的說明與選擇。舉例來說，這本書的最後一章處理了儀表設備、程序控制、水處理和腐蝕等問題。

這本書分成六章，各章的結構都相同。即先陳述基本理論，再舉例說明理論的應用。最後再附以一些實用的練習題並加以解答。

作者希望這本書對準備參加執照考試的人有用。

Paul P. DE. Rieny, P.E.

譯 序

本書譯自DE RIENZO氏Chemical Engineering一書。該書係針對美國化工職業執照的候選人而寫。讀者不難由本書中看出化工問題的大概和解題的方法。原書中少許錯誤已經修改。

本書適合做大學化工系“質能平衡”或五專、二專化工科“化工計算”教材。一般化工界人士自修或參加各類考試亦頗適用。

化學工程

目 錄

第一章 流體的流動

1 - 1	管子內部流體的流動	3
1 - 2	幫浦、功率	10
1 - 3	壓力計	14
1 - 4	流量的量度	15
1 - 5	經濟管徑	33
1 - 6	幫浦與閥	39
1 - 7	練習題	47

第二章 熱傳、蒸發、燃燒

2 - 1	傳導熱傳送	51
2 - 2	軸射熱傳導	56
2 - 3	對流熱傳送	58
2 - 4	蒸發	66
2 - 5	燃燒	69
2 - 6	練習題	77

第三章 熱力學

3 - 1	物質平衡	82
-------	------	----

3 - 2	氣體的性質.....	83
3 - 3	物理熱力學.....	85
3 - 4	冷 凍.....	89
3 - 5	化學熱力學.....	93
3 - 6	練 習 題.....	97

第四章 乾 燥

4 - 1	濕 度.....	101
4 - 2	濕 度 圖.....	103
4 - 3	乾燥器的型式.....	107
4 - 4	乾燥程序.....	110
4 - 5	乾燥速率.....	114
4 - 6	練 習 題.....	119

第五章 蒸餾、結晶與萃取

5 - 1	溶 液.....	121
5 - 2	勞特定律與亨利定律	123
5 - 3	平衡蒸餾與簡單蒸餾	126
5 - 4	蒸氣蒸餾.....	129
5 - 5	結 晶.....	130
5 - 6	萃 取.....	134
5 - 7	練 習 題.....	135

第六章 化工程序、設備與控制

6 - 1	水 處 理.....	137
6 - 2	腐 蝕.....	140

6 - 3	設備製造法	149
6 - 4	程序控制和儀表設備	154
6 - 5	練習題	161

題解

第一章	題解	163
第二章	題解	177
第三章	題解	192
第四章	題解	204
第五章	題解	212
第六章	題解	219

索引	232
----------	-----

參考書目	239
------------	-----

第一章 流體的流動

符 號：

A：管子的截面積，平方英呎。

BHP：制動馬力（ Brake horsepower ）。

C_c ：收縮係數（ coefficient of constraction ）。

C_d ：小孔計的排洩係數（ coefficient of discharge ）。

C'_d ：小孔計的排洩係數（飽和蒸氣）。

C_p ：定壓比熱，英熱單位／磅-°F。

C_v ：文氏計的排洩係數。

C_v ：速度係數。

C_v ：定容比熱，英熱單位／磅 - °F。

D：直徑，呎。

d：距離，呎。

e：效率。

F：力，磅。

f：摩擦係數。

g：重力加速度，呎／秒²。

h：流體高度，吋。

H_f ：摩擦頂，呎流體。

H_o ：小孔計量出的壓力差，呎流體。

H_p ：皮托管量出的壓力差，呎流體。

H_v ：文氏計量出的壓力差，呎流體。

J：熱功當量，呎 - 磅／英熱單位。

k：定壓比熱除以定容比熱之值，無因次。

L：管子的相當長度（ equivalent length ）。

M：分子量，磅／磅莫耳。

N：幫浦速度。

n：流體磅莫耳數。

NPSH：淨正吸吮高度（net positive suction head），呎流體

p：絕對壓力，psia（每平方吋幾磅力）。

Q：體積流率（volumetric flow），立方呎／秒。

R：理想氣體常數，呎 - 磅／磅莫耳 - °R。

R_o：雷諾數。

t：溫度，°F。

T：溫度，°R。

V：體積，立方呎。

v：速度，呎／秒。

v：比容，立方呎／磅。

w：幫浦頂（pump head）或渦輪機頂（turbine head），呎流體。

W：功，呎 - 磅。

w：重量流率，磅／小時。

w'：流體重量，磅。

W_T：總淨頂，呎流體。

Y：膨脹係數。

Z：靜頂（static head）或由基準起算的上升高度，呎流體。

希臘字母：

Δ：差，無因次。

ρ：密度，磅／立方呎。

τ：動黏度，呎²／秒。

μ：絕對黏度，磅／呎 - 秒。

下 標：

1，2，3 表示在第 1 點、第 2 點和第三點的情況。

c：小孔計束縮截面（orifice vena contracta）或臨界情況

- o : 小孔計開口。
- p : 皮托管。
- r : 一致情況 (reduced condition) 。
- t : 文氏計喉頭 (venturi throat) 。
- v : 文氏計。
- v : 速度。
- x : 流體 x 。

1.1 管子內部流體的流動

在化工應用上，利用幫浦 (pump ，或稱唧筒、泵) 把流體從點 1 打到點 2 是很平常的事。處理這一類的問題可利用柏努利方程式 (Bernouli's equation) 。柏努利方程式是能量不減定律的一個特殊情況，在導衍這個方程式時，我們做了如下的假設：

- (a) 流率一定。
- (b) 整個程序是絕熱系統 (adiabatic system) ——除了特別說明的情況而外。
- (c) 流體的內能 (internal energy) 沒有改變。
- (d) 沒有其他能量的損耗。

對於一磅的流體，柏努利方程式可以表示為：

$$Z_1 + p_1 v_1 + \frac{V_1^2}{2g} + W = Z_2 + p_2 v_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

這些項表示在點 1 和點 2 的總能量 (total energy) 。如果沒有能量的損耗，則在此兩點的總能量應該相等。在上式中我們是以長度的單位來表示能量。現在看看上式等號左邊的 W ，如果 W 大於零，表示我們對流體做功而把流體從點 1 打到點 2 ；如果 W 的值小於零，則表示在流體從點 1 流到點 2 的過程中，流體會對外界做功，譬如渦輪機 (Turbine) 就是這種情況。

因為流體的密度是比容 (specific volume) 的倒數，所以柏努利方程式可以改寫為：

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2g} + W = Z_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2g}$$

流體在管子裏面的流動可以分爲三種：層流（Laminar flow）、渦流（Turbulent flow）還有界於這兩種之間的混合流。我們常用雷諾數（Reynolds number）來表示流體的流動情形。雷諾數的定義如下：

$$R_e = \frac{DV\rho}{\mu}$$

它是一個無因次參數（dimensionless parameter）。假使雷諾數小於 2100，流動屬於層流。雷諾數大於 10,000 時，流動屬於渦流。當雷諾數介於這兩數之間，則流動爲混合流。

我們可以在標準的化工參考書上查到流體的密度和黏度的大小。如果流體是氣體的話，那麼它的密度幾乎跟理想氣體的密度一樣。黏度則和壓力的大小有關，我們必須把壓力對黏度的影響列入考慮，如果忽略了這種影響，則在高壓時會引起很大的誤差，這一點我們要注意。

1.1.1 範例 1

表壓 80 psi，溫度 80 F 的乾空氣以每分鐘 100 立方英尺自由空氣（free air）的速率流經一支 2 - 吋管（內徑 2.067 英吋）。也就是說，如果以一大氣壓力（14.7 psi）的壓力和 80 F 的溫度來計算的話，流動速率是每分鐘 100 立方英尺。找出這些條件的雷諾數。

【解】：

基量：80 F，14.7 psia 下流率 100 cfm 的乾空氣。（cfm 即 cubic feet per minute，每分鐘多少立方英尺）。

1. 計算 80 F，94.7 psia 下的速度：

$$p = 80 \text{ psig} + 14.7 = 94.7 \text{ psia}$$

$$t = 80 \text{ F}$$

$$D = 2.067 / 12 = 0.172 \text{ 呎}$$

$$Q = 100 \text{ cfm at } 80 \text{ F and } 14.7 \text{ psia}$$

$$A = 0.785 D^2 = 0.785 (0.172)^2 = 0.0232 \text{ 平方英尺}$$

$$V = \frac{1}{60} \left(\frac{100}{0.0232} \right) \left(\frac{14.7}{94.7} \right) = 11.1 \text{ 呎/秒}$$

2. 計算空氣密度：

假設理想氣體定律可以適用。

$$pV = nRT = \frac{w'}{M} RT$$

其中 p = 壓力，psi (即 pound force per square inch)，
每平方英尺多少磅力。

V = 體積，立方呎

T = 溫度， $R = F + 460$

R = 氣體常數 = 1543 磅力·呎/磅莫耳·R

$$= 10.71 \text{ 磅力·立方呎/平方吋·磅莫耳·R}$$

$$n = \text{空氣莫耳數} = \frac{w'}{M}$$

w' = 空氣重量，磅

M = 空氣分子量 = 29 磅/磅莫耳

氣體定律可寫成：

$$\frac{w'}{V} = \frac{pM}{RT}$$

又因為氣體的密度， $\rho = w'/V$ ，

所以

$$\rho = w'/V$$

$$= pM/RT$$

$$= (94.7)(29)/(10.71)(460 + 80)$$

$$= 0.476 \text{ 磅/立方英尺} \cdots \cdots 80 \text{ F, } 80 \text{ psig 下}$$

3. 空氣的黏度：

$\mu = 0.018 \text{ cp} \cdots \cdots 80 \text{ F, } 14.7 \text{ psia 下}$ (此數據由 Perry 氏所著化工手冊 371 頁〔18〕查得)。

4. 對壓力作黏度修正：

$$\begin{aligned}\text{空氣的臨界壓力, } P_c &= (37.2 \text{ 大氣壓}) (14.7) \\ &= 547 \text{ psia}\end{aligned}$$

$$\text{臨界溫度, } T_c = 132.5 \text{ K} = 238.5 \text{ R}$$

$$\begin{aligned}\text{一致壓力 (reduced pressure), } p_r &= p / P_c \\ &= 94.7 / 547 \\ &= 0.173\end{aligned}$$

一致溫度 (reduced temperature),

$$T_r = T / T_c = 540 / 238.5 = 2.26$$

如果令 $\mu_1 = 94.7 \text{ psia}$ 、80 F 下的黏度

$\mu_2 = 14.7 \text{ psia}$ 、80 F 下的黏度

由 Perry 氏化工手冊第 372 頁查得 [18]。

$$\mu_2 / \mu_1 = 1.05$$

$$\begin{aligned}\therefore \mu_2 &= (1.05) (0.018) = 0.0189 \text{ cp} \\ &= 0.0189 (0.000672) = 1.27 \times 10^{-5} \text{ lb/ft-sec}\end{aligned}$$

5. 計算雷諾數：

$$\begin{aligned}R_o &= DV\rho/\mu \\ &= (0.172) (11.1) (0.467) / 1.27 \times 10^{-5} \\ R_o &= 70,200\end{aligned}$$

把點 1 和點 2 之間因磨擦而引起的能量損失列入考慮時，柏努利方程式必需加以修正。修正後的柏努利方程式為：

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2g} + W = Z_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2g} + H_f$$

其中 H_f 稱為磨擦頂 (friction head)。計算磨擦頂的方程式為：

$$H_f = f \left(\frac{V^2}{2g} \right) \left(\frac{L}{D} \right)$$

上式稱為 D'Arcy 或 Fanning 方程式，其中磨擦因子， f ，是雷諾數和管壁相對粗糙度 (relative roughness) 的函數。(f 可以從 Perry 氏化工手冊第 382 頁，圖 23 查得)。但在層流 (laminar

flow) 的範圍裡，磨擦因子可直接由下式計算而得：

$$f = 64 / \text{Re}$$

上式稱為 Hagan-Poiseuille 方程式，只適用於圓管。但是，如果管子不是圓形或者雖是圓管而管徑不均一的時候，上式中的 D 必須換成相當直徑 (equivalent diameter)， D_{eq} 。各種不同形狀的管子有不同的 D_{eq} 。讀者可參看 Clarke 氏的著作 185 頁或其他書籍。

除了管子裡面的磨擦損失以外，還有從各種管件 (fitting) 和閥 (valve) 所造成的能量損耗。管徑增大或減小時也會造成損耗。在美國的工科職業考試裡，除了特別聲明以外，這些損耗都忽略不計。而跟摩擦損耗比較起來，它們對壓降的影響可以忽略不計。

[註：柏努利方程式中每一項都稱為頂 (head)，如 p/ρ 稱為壓力頂， Z 稱為靜力頂， $V^2/2g$ 稱為速度頂……等等。它們的因次都是長度]。

1.1.2 範例 2

用一個幫浦把溫度 68 F，比重 1.26 的甘油從儲槽經兩個互相平行的管子打到另一儲槽，流量每小時 28,000 立方英尺。每條管子都是 100 英尺長，其中一條是標準的 4-吋鋼管，另一條是 10-吋管。忽略由管件引起的壓力差降。

- 小管裡的流速多少？
- 壓力差降多少？
- 如果這二條管子把甘油導入一個空

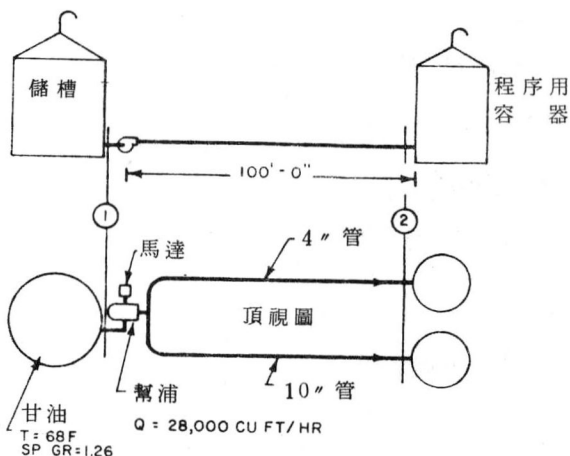


圖 1-1

儲槽裡的話則此一幫必須提供多少頂 (head) ?

基量：每小時 28,000 立方呎甘油。

(A) 計算小管裡的流速：

- 管子尺寸：由 Clarke 氏的著作 217, 218 頁或其他書籍可查到：

	內 徑	截面積
4 吋管	4.026 吋, 0.336 呎	0.0884 平方英尺
10 吋管	10.020 吋, 0.835 呎	0.5475 平方英尺

- 在每條管子裡的流速：

因為兩條管子是平行連接，所以它們由流動所造成的壓力差降應該相同。

運用柏努利方程式：1 表進口，2 表出口

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho_1} + \frac{V_1^2}{2g} + W = Z_2 + \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{V_2^2}{2g} + H_f$$

因為 $Z_1 = Z_2$, $p_1 = p_2$, $V_1 = V_2 = 0$, 所以每條管子的壓力差降都只由磨擦引起。因此，兩條管中的速度將使得 $H_{f_4} = H_{f_{10}}$ 。(4 表 4 吋管, 10 表 10 吋管) (否則兩管的壓降不同) 利用 D'Arcy 方程式求壓降。

$$H_f = f (L/D) (V^2/2g)$$

$$\therefore f_4 (L/D_4) (V_4^2/2g) = f_{10} (L/D_{10}) (V_{10}^2/2g)$$

(假設兩管內都是層流)。

以 $f = 64/Re = 64\mu/DV\rho$ 代入上式，得

$$\begin{aligned} & (64\mu/D_4 V_4 \rho) (L/D_4) (V_4^2/2g) \\ & = (64\mu/D_{10} V_{10} \rho) (L/D_{10}) (V_{10}^2/2g) \end{aligned}$$

上式化簡後得

$$\frac{V_4}{D_4^2} = \frac{V_{10}}{D_{10}^2}$$

因為兩管的流量相加等於總流量，所以

$$Q_4 + Q_{10} = 28,000 / 3600 = 7.777 \text{ 立方呎/秒}$$

$$\text{即 } V_4 A_4 + V_{10} A_{10} = 7.777$$

把管子的直徑代入：

$$\frac{V_4}{(0.336)^2} = \frac{V_{10}}{(0.835)^2}$$

$$\text{即 } V_4 = 0.162 V_{10}$$

$$\text{又 } V_4 (0.0884) + V_{10} (0.5475) = 7.777$$

$$\text{即 } V_4 + 6.19 V_{10} = 88.0$$

解上兩式，得

$$V_4 = 2.24 \text{ 呎/秒} \cdots \cdots \cdots \text{小管流速}$$

$$V_{10} = 13.82 \text{ 呎/秒} \cdots \cdots \cdots \text{大管流速}$$

現在驗正前面層流的假設：

$$R_e = D_4 V_4 \rho / \mu$$

$$\text{其中 } \rho = (1.26) (62.4) = 78.5 \text{ 磅/立方呎}$$

$$\mu = 750 \text{ cp} = 0.503 \text{ 磅/呎-秒}$$

$$\begin{aligned} R_{e_4} &= (0.336) (2.24) (78.5) / 0.503 \\ &= 117 < 2100 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{e_{10}} &= (0.835) (13.82) (78.5) / 0.503 \\ &= 1802 < 2100 \end{aligned}$$

由上兩式可知我們的假設正確。

(B) 兩管裡的壓降一致，所以

$$H_{f_4} = H_{f_{10}} = \Delta p = f_4 (L/D_4) (V_4^2/2g)$$

$$f_4 = 64/R_{e_4} = 64/117 = 0.546$$

$$L/D_4 = 100/0.336 = 298$$

$$V_4^2/2g = (2.24)^2/64.4 = 0.0781$$

$$\Delta p = 0.546 (298) (0.0781) = 12.7 \text{ 呎甘油}$$

(C) 因為兩管平行放置，所以幫浦必需提供的頂 (head) 等於每管的壓力差降，即

$$\text{Pump head, } W = H_{f_4} = H_{f_{10}} = 12.7 \text{ 呎甘油}$$