

化學工程導論

INTRODUCTION
TO CHEMICAL
ENGINEERING

原著者：Thompson/Ceckler

譯述者：江建利

2117
552

化學工程導論

INTRODUCTION
TO CHEMICAL
ENGINEERING

原著者：Thompson/Ceckler

譯述者：江建利

科技圖書股份有限公司



原 序

本書為化學工程的介紹書，並可作為化工與其相關科目入門的教科書。在此階段的學生，計有三個基本要求：(1)對化學程序工業的性質與範圍的了解；(2)在從事化學程序分析時，對有關化學與物理原理的了解；(3)組織資料與解決問題的系統解法。本書是依上述的需要而編寫的。為想討論若干特殊的化學工業，並提出對物質與能量平衡的完整性做法，筆者認為，在主題的組織與處理兩方面，都有必要與傳統的教科書有所不同才可。

本書的主要目的是幫助學生在求解有關化學程序的物質與能量平衡時，能自己建立一套解決的技巧。但依筆者的經驗，當大二學生開始研讀化工課程時，他們對化學與化學反應雖已有興趣，但對化學程序與化學程序工業的性質都不甚熟悉，甚至會被迷惑。筆者感到，對化學工程的介紹，將使他們對程序工業有個認識，而這些又是他們將來必會親身參與的。因此，本書中將討論幾個較重要的化學程序工業。所選擇的工業範例計有兩個原因，一是顯示化工的寬廣，另一方面是可解釋重要而有興趣的化學、物理程序特性。這些將在以下幾章中，作進一步的推導。

因想同時介紹化學程序工業與物質，能量平衡，就需將這些題材編在一起，構成一個結實的單元。本書是依下列方式編寫的；將二十一章分成六篇，每篇都談到一個物質與能量平衡的重點。每篇先用一章介紹一個特殊的化學工業；接着在同一篇內的幾章，談到物質與能量平衡。解釋的內容、例題以及每篇的章末習題都取材於該篇所介紹的工業。舉例來說，第二到第四章的章末習題，皆取材於第一章討論過的石油精煉廠流程圖。筆者發現，若根據學生所熟悉的裝置出習題，他們對這些習題與解決，將具更大興趣。由特殊的程序裝置出題，乃為本書的特點之一。

此外，對物質與能量平衡所採的作法，也與傳統的教科書不同。一般教科書都是前半部談物質平衡，後半部討論能量平衡。筆者認為這種分法不只是人為的，事實上，在教學方面也是不健全的。基本上，化工與相關科系的學生都對化學反應系統與程序有興趣，但若不先介紹些觀念與含有能量計算的技巧，而要用任何水準來處理這些題材是不可能的。因此，第三章先提出能量觀念，第四章再談能量平衡。在此，都是根據學生已熟悉的觀念來討論。但要注意，在開始階段，並不用最一般性的形式來討論能量平衡。筆者發現，若先討論些穩定狀態程序的焓與熱，再導出更一般性的能量平衡觀念，學生就易接受能量與能量平衡的觀念。有如學生對解決問題有了經驗與信心之後，就能解出更複雜的問題。

筆者相信，對這樣的一本教科書，問題與解決問題的方法都具無比的重要性。就一般而言，要了解質量與能量不減的一般觀念，或解題的某些特殊技巧，都不會有太大困難。但若要組織思維，使問題的分析更為有效，就需相當的努力。因此，筆者雖希望學生們能自己建立一套解決問題的方法，但開始時，還是用本書的輸入-輸出表為宜。這方法的應用，在本書內到處可見。熟悉這個方法，就有深厚的基礎，來發展更進一步的分析技巧。

本書與一般書不同，所談到的內容幾乎都與化學程序、或了解物質與能量平衡所需的觀念及技巧直接有關。雖然，另需介紹某些附加題材，例如 Raoult 定律，或蒸氣壓觀念（一般在物理化學教科書內談到），但已使這些題材減到最少。最近幾年來，在大一的普通化學課程中，就已講到這些補助題材，且有增加的趨向。因此對大二學生而言，這些內容，很多只是一個複習。

目前，化學工程師的棘手問題為量度單位制的選擇。現在已由 CGS 制，英國工程制轉變為 SI 制的傾向。特別是科學雜誌與科學、工程方面的書。無疑的，將來，SI 制必會取代 CGS 與英國工程制。但最近的將來，大部分工程師還會碰到以 CGS 與英國工程制表示的資料與裝置。因此，尚需能用三種單位制來解決問題。本書中提到的最常見的化學工程問題，所用的 SI 制、英國制，與 CGS 制的份

量約略相等。

最後，本章內討論些計算機的用法。若能用手計算很快得到答案，那就不必用計算機來解。但含有平衡反應與功的幾章中，有些問題，用計算機算則較有效。本書所用的輸入-輸出表法，很易寫成計算機程式，以解出複雜的物質與能量平衡。筆者曾選用一些題目作教材，學生的反應良好。

我很感謝過去三年來，學生們對本書的建議與修正，以及不同工業界人士的幫忙。他們親切的提供了本書的資料與圖片。特別感謝我們的系主任，Edward G. Bobalek，他使我們兩人一起擔任“化學工程導論”的教學達五年之久，因此，使初步教材能作更進一步的延伸。最後，在本書編輯期間，感謝家人的諒解與幫助。

Edward V. Thompson

William H. Ceckler 謹識

化學工程導論

目 錄

原 序

第一篇 不含化學反應的物質與能量平衡

第一章 一座現代石油精煉廠

1.1 原 油	2
1.2 一座現代石油精煉複合工廠	5
1.3 原油分餾	9
1.4 化學處理	10
1.5 精煉廠產品	21

第二章 物質平衡：無化學反應的平衡

2.1 單位制與 mol	26
2.2 物質平衡的觀念	28
2.3 穩定 - 狀態下操作	30
2.4 解物質平衡問題的步驟	31
2.5 原子平衡	37
2.6 習 題	43

第三章 熱、焓與熱容量

3.1 能的形式	53
3.2 熱	54
3.3 焓	56
3.4 焓數據	60
3.5 熱容量	63

2 化學工程導論

3.6 熱容量數據	67
3.7 例題	71
3.8 習題	75

第四章 焓與熱的能量平衡

4.1 能量平衡的觀念	79
4.2 含熱與焓的能量平衡	80
4.3 習題	85

第二篇 含化學反應的物質與能量平衡

第五章 磷苯二酸酐的製造

5.1 磷苯二甲酸與磷苯二酸酐	89
5.2 原料：苯與磷二甲苯	90
5.3 磷苯二酸酐的製造	94
5.4 磷苯二酸酐的用途	103

第六章 反應熱

6.1 反應熱	108
6.2 標準生成熱	09
6.3 標準燃燒熱	110
6.4 標準反應熱	11
6.5 非標準狀態下的反應熱	113
6.6 習題	120

第七章 含化學反應與結物的物質平衡

7.1 定義	123
7.2 連帶物	126
7.3 習題	131

第八章 含化學反應的能量平衡：恆溫反應器

8.1 含化學反應與熱傳的能量平衡	138
8.2 能量平衡用的輸入-輸出表	139
8.3 恆溫反應器	145
8.4 習題	150

第九章 有化學反應的能量平衡：絕熱反應器

9.1 絕熱反應器	162
9.2 習題	169

第三篇 含回流操作的物質與能量平衡

第十章 環氧乙烷的製造

10.1 環氧乙烷的製造	177
10.2 環氧乙烷的用途	180

第十一章 含回流的物質平衡

11.1 回流觀念與若干定義	185
11.2 回流操作中的物質平衡	187
11.3 理想分離的回流	188
11.4 無分離的回流	190
11.5 環氧乙烷的製造	193
11.6 習題	196

第四篇 含分離操作的物質與能量平衡

第十二章 發酵程序

12.1 酵母的發酵過程	204
12.2 工業酒精的製造	209

4. 化學工程導論

12.3 盤尼西林	213
-----------------	-----

第十三章 氣 - 液平衡與蒸餾程序

13.1 純物質的蒸汽壓	217
13.2 不互溶的混合物	220
13.3 互溶系	227
13.4 液 - 蒸氣平衡	231
13.5 蒸餾程序	237
13.6 習題	245

第十四章 由鹽水與混合鹽中回收氯化鉀

14.1 鉀石鹽的漂浮選礦處理	251
14.2 鉀石鹽的部份結晶處理	255
14.3 光鹼石處理	256

第十五章 液 - 固平衡與結晶程序

15.1 二 - 成分的液 - 固平衡	258
15.2 三 - 成分液 - 固平衡	263
15.3 習題	279

第十六章 紙漿與紙的製造

16.1 木材的構造	277
16.2 打漿法	279
16.3 造紙法	284

第十七章 濕度、乾燥與蒸發程序

17.1 定義	291
17.2 水蒸汽與空氣的濕度圖與焓圖	294
17.3 絕熱蒸發	298
17.4 空氣調節	300

17.5 蒸 發	303
17.6 習 題	310

第五篇 含化學平衡反應的物質與能量平衡

第十八章 氮的合成與其他高壓程序

18.1 氮的合成	319
18.2 氮的用途	324
18.3 其他高壓程序	328

第十九章 含平衡反應的物質與能量平衡

19.1 化學平衡	333
19.2 含平衡反應的物質與能量平衡	341
19.3 習 題	346

第六篇 含功的物質與能量平衡

第二十章 原子能與核能的產生

20.1 原子反應	355
20.2 核能反應器	360
20.3 核子燃料	368
20.4 核子反應堆	372

第二十一章 含功的能量平衡

21.1 含功的能量平衡	377
21.2 含功的能量平衡	380
21.3 含功的能量平衡	387
21.4 含功的能量平衡	392

第一篇 不含化學反應的 物質與能量平衡

第一章 一座現代石油精煉廠

在所有的化學程序工業 (chemical process industries) 中，石油工業 (petroleum industry) 是規模最大，也是影響最大的一種工業。最近幾年來，世界石油產量達到每年 150 億桶，其中約有 50 億桶產自美國。全世界的石油產品消耗量約為每天 15 億加侖，其主要用途是供應世界所需的半數能源。美國的十五家最大公司中，有五家是石油公司，它們的交易額與資金，約佔全部的 25 % 與 45 %。相關工業，例如汽車製造業。在這十五家最大公司中，也佔有四家，有趣的是，這十五家公司，只有一家是非石油化學程序工業，那是鋼鐵工業。當吾人瞭解以上所提到的 25 % 交易額與 45 % 的資金，分別代表 400 億與 500 億美元時，就能對本節所學的數字有一更深刻的印象。很明顯，石油工業對世界的經濟以及人類的的生活，具有無可比擬的重要性。

由化學與物理學觀點，在所有化學程序工業中，石油工業是最複雜的。也許會問，吾人是否由此開始研究？很明顯，若能一開始就研究那樣重要的操作，很容易讓人滿足。但不能忽略一個事實，亦即，只要不牽涉到太複雜的分析或設計問題，就能瞭解一個典型精煉廠的全部操作，而對那些分析或是設計問題，目前，尚無足夠能力來處理。稍後，將詳細研究些較簡單的程序 (process)。而且，除想研究的以外，尚有一個可提供相當有趣實例的精煉流程圖 (refinery flow-sheet)，這些實例可作為研究物質平衡的基礎。

產品種類繁多的現代石油精煉工廠，其設計容量，在每天處理 75,000 桶到 400,000 桶原油之間。當然，也有一些小型操作所，只

此外，對物質與能量平衡所採的作法，也與傳統的教科書不同。一般教科書都是前半部談物質平衡，後半部討論能量平衡。筆者認為這種分法不只是人為的，事實上，在教學方面也是不健全的。基本上，化工與相關科系的學生都對化學反應系統與程序有興趣，但若不先介紹些觀念與含有能量計算的技巧，而要用任何水準來處理這些題材是不可能的。因此，第三章先提出能量觀念，第四章再談能量平衡。在此，都是根據學生已熟悉的觀念來討論。但要注意，在開始階段，並不用最一般性的形式來討論能量平衡。筆者發現，若先討論些穩定狀態程序的焓與熱，再導出更一般性的能量平衡觀念，學生就 very 易接受能量與能量平衡的觀念。有如學生對解決問題有了經驗與信心之後，就能解出更複雜的問題。

筆者相信，對這樣的一本教科書，問題與解決問題的方法都具無比的重要性。就一般而言，要了解質量與能量不減的一般觀念，或解題的某些特殊技巧，都不會有太大困難。但若要組織思維，使問題的分析更為有效，就需相當的努力。因此，筆者雖希望學生們能自己建立一套解決問題的方法，但開始時，還是用本書的輸入-輸出表為宜。這方法的應用，在本書內到處可見。熟悉這個方法，就有深厚的基礎，來發展更進一步的分析技巧。

本書與一般書不同，所談到的內容幾乎都與化學程序、或了解物質與能量平衡所需的觀念及技巧直接有關。雖然，另需介紹某些附加題材，例如 Raoult 定律，或蒸氣壓觀念（一般在物理化學教科書內談到），但已使這些題材減到最少。最近幾年來，在大一的普通化學課程中，就已講到這些補助題材，且有增加的趨向。因此對大二學生而言，這些內容，很多只是一個複習。

目前，化學工程師的棘手問題為量度單位制的選擇。現在已由 CGS 制，英國工程制轉變為 SI 制的傾向。特別是科學雜誌與科學、工程方面的書。無疑的，將來，SI 制必會取代 CGS 與英國工程制。但最近的將來，大部分工程師還會碰到以 CGS 與英國工程制表示的資料與裝置。因此，尚需能用三種單位制來解決問題。本書中提到的最常見的化學工程問題，所用的 SI 制、英國制，與 CGS 制的份

點由 90 到 200°F；現先研究不同型態群的構造。由此，可得到若干觀念。要得到有用的產品，必需作那些化學處理。這些不同的烴化合物，可簡述如下。

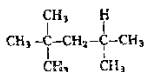
[1] 飽和，開鏈（烷屬烴）

- (A) 正烷類 (*n*-Paraffins) [正烷屬烴 (*n*-alkanes)]。此類為實驗式 C_nH_{2n+2} 的直鏈 (straight chain)，飽和烴化合物。一典型的例如正庚烷 (*n*-heptane)



實際上，不論何種原油，此類皆佔最大比率：其中各化合物的含量，一般是正己烷 (*n*-hexane) 含 2 到 3%，正庚烷 (*n*-heptane) 含 2 到 4%。但正烷類 (*n*-paraffins) 的辛烷值 (octane number) 皆較低，依定義，正庚烷的辛烷值為零，所以產生需要的產品，必需作更進一步的處理。

- (B) 異烷類 (isoparaffins) [異烷屬烴 (isoalkanes)]。此類為實驗式 C_nH_{2n+2} 的側鏈 (branched-chain)，飽和烴化合物。一典型的例為異辛烷 [依命名的觀點而言，為 2, 2, 4-三甲基戊烷 (trimethylpentane)]



一般來說，異烷類皆為高辛烷值 (high octane number)。依定義，異辛烷的辛烷值為 100。因此，異烷類為吾人所欲的產品。但通常只有少量或幾可忽略。但某些原油却含有 1.5% 的 3-甲基戊烷 (methylpentane) 與 1.0% 的 2, 3-二甲基戊烷 (dimethylpentane)。

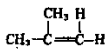
[2] 不飽和，開鏈（烯或炔）

4 化學工程導論

此類包括含一個或更多個雙鍵的直鏈或側鏈烴化物。若只含一雙鍵，其實驗式為 C_nH_{2n} 。典型的例為正烯類 (normal alkene)，如丙烯 (propene)



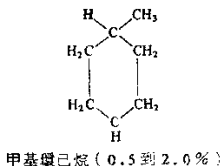
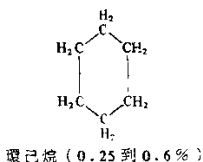
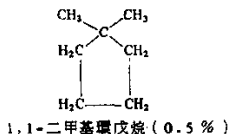
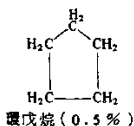
與含側鏈的烯類，如異丁烯 (isobutylene) [或 2-甲基丙烯 (methylpropene)]



烯類 (olefins)，具有高辛烷值，且為其他程序內極有用的中間體 (intermediates)。但在原油中幾乎不存在，即使有亦極稀少。

[3] 飽和，環狀 [萘 (naphthenes)]

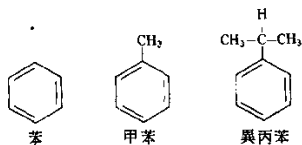
除正烷類外，此類為大部分原油內存量最豐富者。典型的例與其含量如下



這些化合物有時其本身很有價值，但通常再被進一步轉換成其他物質。

[4] 不飽和，環狀 (芳香族)

此類最常見的為苯 (benzene) 與其衍生物：



這些物質因具高辛烷值而極為有用，且可作為溶劑與其他程序內的中間體。但除 Borneo 與 Sumatra 所產的原油（芳香族含量高達 40 %）外，其他地方原油中芳香族的含量都很少。

1.2 一座現代石油精煉複合工廠

圖 1-1，為一座現代中型石油精煉廠的鳥瞰圖，並附有不同複合程序特性的說明。由此程序開始研究此精煉廠的最後產品，必可得到頗多益處，且可瞭解此精煉廠與貯存設備的相對大小。

圖 1-1 為整個程序的鳥瞰透視圖以及若干不同操作的一般設計，故相當有用。但欲作程序分析，必需將程序與操作單元間的關係，用簡單的圖形來表示。此圖形稱為流程圖（flowsheet）。

圖 1-2，為該程序的全部流程圖，將在以下各節中討論。要注意，此流程圖與圖 1-1 所示的有些不同，為求研究方便，希望能加簡化。圖 1-2 似乎有些混淆，因此，由整個程序起點的左邊，到代表產品的右邊，讀者需花些時間來研究每條實線或流線（stream）。不論是物理或化學上的性質，圖上的方塊代表各自的程序，且每一流線與程序也都加上註解。儘可能用水平線表示流線，而相同或類似的程序則用縱向配置。讀本卷必沿不同的流線，由一個程序到另一程序，由左到右，直到完全熟悉為止。另外，也不必因未及瞭解再通量（reflux）或再源物（recycle）等術語，而感到困擾。目前，重要的是能認識流線與各程序間的比較。每一流線與程序均需詳加研究，即會作詳細的探討。

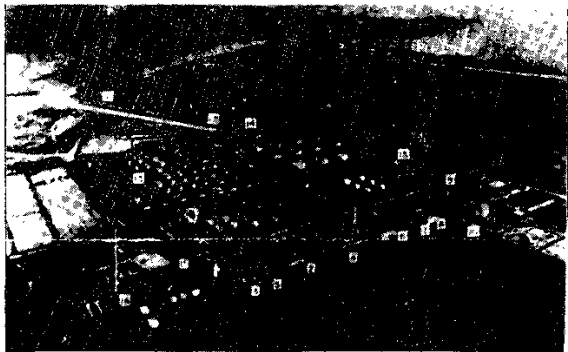


圖 1-1 Getty 油公司 Delaware 精煉廠的鳥瞰圖。該裝置每天可處理 15 萬桶原油。(1) 航道終點(2) 原油分餾單位(3) 流體焦化單位(4) 流體催化裂解塔(5) 氣體工廠(6) 烷基化單位(7) 催化重組塔(8) 氫化脫硫塔(9) 氫氣工廠(10) 氫化裂解塔(11) 回收硫單位(12) 河水抽取站(13) 貯蓄與混合(凍土 (frozen-earth) 的丙烷貯藏所(14) 控制實驗室(15) 發電所

流程圖的閱讀與闡釋，為初學者所必需具備的技巧。將來的事業發展，也少不了它。且將發現，對所欲研究的不同問題與狀況，最根本的方法是繪流程圖與圖表。此外，必需培養自己閱讀與描繪流程圖的習慣，這樣，必能受用無窮。

當已熟悉圖 1-2 所示的全部流程時，可以將其與圖 1-3（與圖 1-2 相似）互相對照，就會發現它的用處。在圖 1-3 中，假設進入分體塔的原油為 100 lb，由圖上的數字，就能瞭解每一流線的量。同樣，讀者應詳細觀察每一流線，注意，每一程序步驟內的相對流線量。

在詳細討論精煉廠內不同的程序前，先概略的觀察整催操作，也許，可有系統的綜合到如下的草圖。

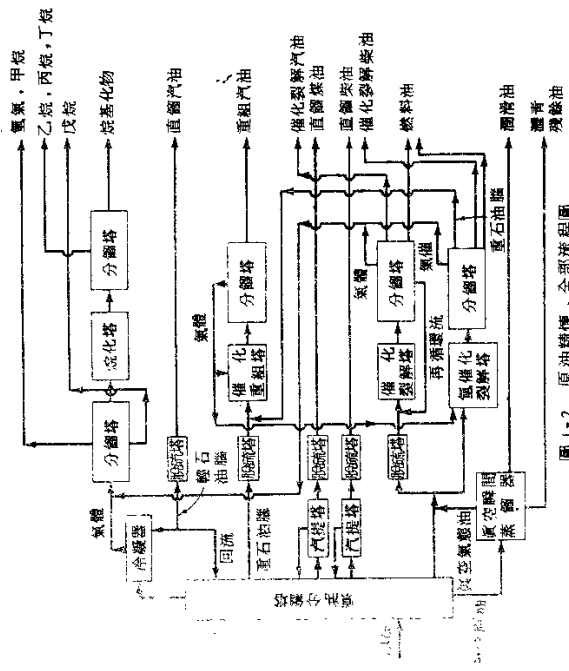


圖 1-2 原油精煉，全部流程圖