

食品加工程序

Food Process Engineering

原著者：Dennis R. Heldman

译述者：林俊杰 楊敏智

食品加工程序

Food Process Engineering

原著者：Dennis R. Heldman

譯述者：林俊杰 楊敏智

科技圖書股份有限公司

前言一

Blaise Pascal，是一位對工程界相當有貢獻的科學家。他曾說過：“寫一本書的最後一件事，要將什麼資料放在開始。這本書也是如此。前言，是在這本書完成之後才寫的，將本書內容的簡介，作為寫此前言的基礎。

每位讀者、每位使用者，對一本書的要求不同，有的希望許多問題能獲得回答，或需要獲得適當的資料。因此，了解具有企圖的讀者，首要的工作，至少要使其中的一部分能獲得滿足。同時，一本書必需要比十年或十五年前更具技術性並更為精闢。

食品工業的範圍非常廣泛，需由作者決定所需的領域以涵蓋其中心課題。本書主要的八章，都可寫成一本書，但限於討論設計方面，只要對微積分有些認識，並具廣泛知識的工程師與科學者都可應用此書以增進其知識。作者在這方面確認能符合讀書的需要。

本書強調加工，而不注重產品流程或工廠經營。因此，考慮本書所提的物料時，可設計發展各種不同的操作。其他的書籍，可提供有關產品與工廠的資料。作者將其範圍侷限於單元操作的功能。

作者引用此工程領域中有關他自己或其他學者的資料寫成一本具有深度、廣度的書，使工程師能達到其最後目標，即設計。本書亦提供一些基本的、技術的資料，以滿足食品工業快速的發展。學生與工業界的有關人士，可用本書作為研究對象或作參考。

華盛頓大學工學院院長 C.W. Hall.

前言二

這本書，在食品工程領域內的可利用性，在食品科學與技術領域，最爲顯著。特別對培養食品工程知識的專攻學生與研究生、或在食品工業界、政府機構以及大學中的有關人員而言。Heldman 氏在密大攻讀博士時，我有機會與他一起工作。他在工程學、食品科學與技術方面具有獨到的經驗，使他能寫成一本符合大家需要的本書。

食品科學與技術所需發展的，是食品工程學。能跨越這些領域的年青科學者却很少，我們很幸運看到他能寫成此書。當食品及其有關工業日新月異這方面的資料更具意義，尤其是從分批式，進步到連續式的操作。

幾年來，我們深覺日益強調加工食品的營養，利用食物組成分的物理與化學特性來發展產品與安全性，以及環境保護計畫，因而對食品工程方面的知識日益需要。我深信此書的資料能提供許多科學者與工程師們職業性的基礎。希望這樣的認識與了解，確實能應付食品工業界所發生的變化。因此，我建議讀者要對 Heldman 先生所提供的資料多予注意。

加州大學食品科學與技術系 B. S. Schweigert

原 序

食品工業，是提供營養的、健康的食品給消費者，將完全仰賴加工與處理的機械設備。完成這些處理、加工與分配等階段，為加工與設備設計的函數。工程學所具備的重要任務極為明顯。

由於商品化食品的大量需求，具有特殊技術的人才，對很複雜的加工與設備的設計，以及對食物的處理、加工及分配所需的加工與設備，均應有清晰的了解。同時對食品的化學、微生物學以及生物化學的知識亦應有所認識。顯然，食品工程師的培養，可提供有關如何將工程學原理應用到食物的處理、加工以及分配的方式來訓練。本書所提供的資料使讀者有機會應用工程原理以設計食品工業的系統與程序。

本書是用來指導設計的，故假定讀者已具有微積分、微分方程、熱傳遞、熱力學、物理化學及流體力學等知識。因此，本書適於已學習工程學的學生以及對工程有興趣的食品科學研究生讀的。

本書所用的敘述與 S. E. Charm 所編的“食品工程基本原理”及 R. L. Earle 所編的“食品加工的單元操作”有明顯的相似處。作者主要目標是將對工程學學生重要的主題集合在一起，使能勝任從事食品工業的職務。

有些部分作省略或簡略的介紹，作者並非忽視其重要性，只是希望藉着所提供的資料使學生有能力自習省略的部分，如熱處理操作的設計，需要相當篇幅來介紹。描述殘存曲線及加熱或冷卻曲線的基本資料，都提供給學生們，使能在研究熱加工時能有效地應用。

作者編寫此書，是由華盛頓州立大學 C. W. Hall 博士的鼓舞。在編寫期間又受到加州大學 B. S. Schweigert 及密西根州立大學 B. A. Stout 先生等的鼓勵。

R. L. Merson, D. D. Lund, J. C. Harper, C. G. Haugh,

B. L. Cary, R. W. Dickerson, D. R. Thompson, J. L. Blaisdell, S. W. Fletcher, D. F. Farkner, F. W. Bakker Arkema, J. M. Harper, T. P. Labuza, V. A. Jones, J. R. Rosenau, R. Holmes 博士，以及 E. Seltzer 教授對本書均有重大的貢獻。

這些權威的意見，建設性的批評與鼓勵，使本書更為完善。另外，作者感謝 Carole Steinberg 花費許多時間將原稿多次打字。

作者並對所有參加本書草稿工作的學生們致謝。所有的意見與評論，作者都熱誠地接受。

密歇根大學農工系及食品營養系教授 D. R. Heldman

食品加工程序

目 錄

前言一

前言二

原 序

第一章 總 論

1.1 緒 論	1
1.2 熱力學用於食品加工	4
1.3 加工食品發生之反應動力學	9
1.4 食品加工過程中一質量傳遞的基本原理	16
符號說明	19
附 標	20
參考文獻	20

第二章 加工實品質流學

2.1 質流學定義	22
2.2 物料的應力—應變行為	22
2.3 液態食品的性質	24
2.3.1 黏滯度	24
2.3.2 摩 擦	39
2.3.3 層 流	40
2.3.4 亂 流	44
2.3.5 泵送液態食品應考慮諸事項	48
2.4 懸浮液與濃縮產品的性質	52
2.4.1 黏滯度	53
2.4.2 管內的流動	55
2.5 粒狀食物與粉末的性質	59

2 食品加工程序

2.5.1 密度	59
2.5.2 顆粒大小與大小的分佈	60
2.5.3 粉末食品的流動	63
2.6 固態食品的性質	65
2.6.1 黏彈參數的測定	68
2.6.2 食品質地	69
符號說明	70
附 標	73
參考文獻	74

第三章 加熱與冷却程序

3.1 熱傳遞模式	76
3.1.1 傳 導	77
3.1.2 對 流	80
3.1.3 輻 射	84
3.1.4 總熱傳送	84
3.2 食品的熱性質	85
3.2.1 比 熱	85
3.2.2 熱傳導度	86
3.2.3 測 定	90
3.3 穩定狀態加熱與冷却	91
3.3.1 熱交換器	97
3.4 用輻射法加熱與冷却	104
3.5 不穩定狀態下加熱或冷却	107
3.5.1 忽略內阻力	107
3.5.2 忽略表面阻力	109
3.5.3 有限的表面與內部阻力	109
3.5.4 有限物體	115
3.5.5 不規則物體與橢圓體	118
3.5.6 數值方法	123

3.5.7 攪拌容器·····	125
符號說明·····	126
附 標·····	129
參考文獻·····	130

第四章 食品冷凍熱力學

4.1 冷凍食品的性質·····	132
4.1.1 冰點下降·····	133
4.1.2 冰晶體的形成·····	137
4.2 冷凍過程中焓的改變·····	141
4.2.1 實驗探討·····	147
4.3 製品冷凍速率的預測·····	150
4.3.1 Plank 方程式·····	151
4.3.2 Neumann 問題·····	155
4.3.3 數值解·····	158
4.4 食品冷凍器具的設計·····	162
4.4.1 空氣流動冷凍機·····	162
4.4.2 平板冷凍機·····	166
4.4.3 浸液冷凍機·····	168
符號說明·····	170
附 標·····	172
參考文獻·····	173

第五章 液態食品濃縮的蒸發

5.1 蒸發的熱力學·····	176
5.1.1 相變化·····	176
5.1.2 沸點上昇·····	177
5.2 蒸發時的熱傳遞·····	181
5.2.1 熱介質·····	181
5.2.2 熱表面·····	183

4 食品加工程序

5.2.3 製品	183
5.2.4 熱傳遞係數	186
5.3 蒸發系統的設計	188
5.3.1 滯留時間	190
5.3.2 單效系統	194
5.3.3 多效系統	196
5.4 其它蒸發系統	202
5.4.1 熱再壓縮系統	203
5.4.2 低溫蒸發器	204
符號說明	205
附 標	207
參考文獻	208

第六章 食品脫水

6.1 脫水的基本原則	210
6.1.1 濕度學	210
6.1.2 一定速率期間的脫水	213
6.1.3 速率下降期間的脫水	214
6.1.4 平衡含水量	219
6.2 固定盤脫水法	224
6.2.1 架櫃乾燥法	225
6.2 隧道乾燥法	228
6.3 移動床脫水法	232
6.3.1 輸送帶乾燥法	232
6.3.2 皮帶乾燥法	233
6.4 空氣懸浮製品	233
6.4.1 噴灑乾燥法	233
6.4.2 氣力乾燥法	256
6.4.3 液化床乾燥法	257
6.5 轉筒脫水法	257

6.5.1 轉筒乾燥器的型式	258
6.5.2 設計參數	258
6.6 各種脫水程序	261
6.7 冷凍脫水	261
6.7.1 熱傳遞與質量傳遞	262
6.7.2 冷凍乾燥時間	263
6.7.3 參數的影響	267
6.7.4 大氣冷凍乾燥	270
符號說明	270
附 標	273
上面附標	274
參考文獻	274

第七章 接觸平衡程序

7.1 基本原理	277
7.1.1 傳遞程序的一般表示法	278
7.1.2 材料平衡	278
7.2 氣體吸收	284
7.2.1 物質平衡	285
7.2.2 多段與連續接觸操作	286
7.2.3 多成分系統	289
7.3 萃 取	290
7.3.1 萃取速率	291
7.3.2 瀝 濾	293
7.3.3 液體—液體萃取	298
7.4 蒸 餾	301
7.4.1 蒸氣—液體平衡	301
7.4.2 沖式蒸發	303
7.4.3 分批式蒸餾	306
7.4.4 分 餾	308

7.4.5 水蒸汽蒸餾	314
符號說明	315
附 標	317
參考文獻	317

第八章 機械分離程序

8.1 過 濾	318
8.1.1 操作方程式	319
8.1.2 過濾機制	323
8.1.3 過濾系統的設計	324
8.2 沉 澱	326
8.2.1 低濃度懸浮液的沉澱速率	326
8.2.2 高濃度懸浮液的沉澱速率	328
8.3 離 心	330
8.3.1 基本方程式	330
8.3.2 分離速率	331
8.3.3 液體—液體分離	332
8.3.4 固體—氣體分離	334
符號說明	334
附 標	335
參考文獻	336

附 錄

圖 與 表	337
參考文獻	358

第一章 總 論

1.1 緒 論

現代化超級市場，展示出許多的食品。這些食品以數百種不同的方法來加工，以期滿足消費者的需求。此項可供給多種類產品的工業，端賴化學、微生物學與加工、包裝工程學的健全發展。與食品工業有關的工程方面，主要涉及改變食品原料的加工程序。食品工程學科有兩個不同部份：(a)敘述部份，是討論機械設備，詳細的描述食品加工過程涉及的程序；(b)理論部分，包括加工設備的數學描述及成品在處理、加工、貯藏期間所可能發生的變化。這兩部份皆很重要，且在許多情況中是相輔相成的。目前所要提出的主題，較偏於食品加工的理論方面。無論如何都將努力使這些數學的運算變得有用，能計算設備的大小，並描述整個的程序。

一個單一類型的食品加工廠，事實上是幾乎不可能包括所有成品的每一程序。在物料的類別、涉及的加工程序，以及用現代化加工技術製成的產品間實在有許多的差異。但仍需嘗試描述一個假想的工廠，而此工廠含有現代食品加工工業所有最重要的單元操作，除了這些最重要的單元操作（unit operation），外，幾個附屬因素也將介紹，沒有這些相關的範圍、領域，現代化的工廠是無法運轉的。

參閱圖 1.1，可觀察到物料用各種不同的形態到達加工廠，從低

2 食品加工程序

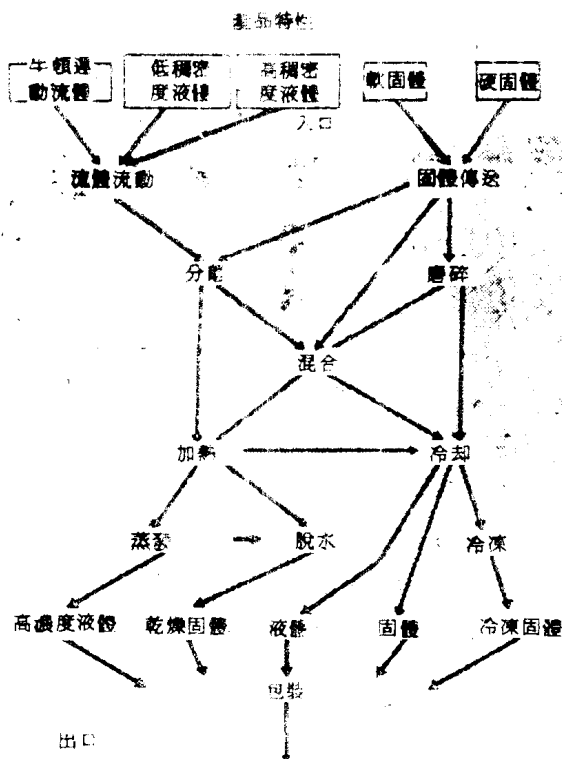


圖 1-1 一般食品加工廠流程圖示

黏滯性液體到硬固體都有。這些物料用某些方式在工廠中被傳送，這個傳送操作，介紹了在現在食品加工廠中最重要的單元操作中的一種。流體的流動或流體力學在大部份食品加工廠中是相當重要的，它雖自成一門學科，但有些不可忽視的基本觀念必需知道與了解，才能設計液態食品所需的傳送系統。但是，這方面因食品具有非牛頓流體的性質（non-Newtonian flow characteristics）而變得更為複雜，無法用類似水的流體來處理。固體的傳送，要用各種不同的形態，不可能發展出一般性的敘述。

次一種單元操作討論將產品依其物理或化學特性來分離成各種成份，這些操作包括：(a)藉著離心力或過濾的機械分離；(b)藉著產品揮

發性的蒸餾 (distillation) ; (c) 萃取 (extraction) , 包括溶劑將固體溶質或液體 - 液體的萃取 ; 及 (d) 基於重力對產品各個成份的影響而沉澱。在加工廠中 , 另有一類似的操作為磨碎 , 則僅應用於固態物料。在原料被分成各別成份或磨碎成更小塊之後 , 次一必然的操作是將某些成份混合成消費者可接受的希望形式。所需混合操作類型 , 因製造產物的種類而定。

對於所有加工食品 , 普遍需要的單元操作為熱傳遞 (heat transfer) 。幾乎每一個加工食品在經由工廠到達消費者手中之間的某些時間皆需加熱或冷卻。對於食品加熱或冷卻的性質基本上的了解是很重要的。熱傳遞的特殊操作所包括的項目 , 計有不同形態的熱交換器、巴氏消毒 (pasteurization) 與殺菌 (sterilization) 。經過這個階段 , 許多產品直接進入包裝的操作裝入容器中 , 最後到達消費者手中。

尚有其他單元操作 , 對食品加工工程在理論方面有興趣的同學們值得注意。第二種是冷凍 (freezing) 。乃因有許多產品是以冷凍狀態到達消費者手中 ; 第二種是蒸發 (evaporation) , 此為無法看到的操作 , 可以降低含水量高的食品體積 , 以利傳送或作進一步脫水 ; 第三種是食品脫水需予了解注意 , 因將來需要許多乾燥食品上市 , 以應超級市場的需求。

到目前為止 , 所談到的單元操作 , 係食品製造過程中幾個主要程序。尚有幾個附屬或相關的論題必需提一下 , 為確保學生對在每一操作的特性不致誤解 , 對這些相關的論題計包括 : (a) 儀器與程序控制 ; (b) 清淨操作 ; (c) 物料處理 ; (d) 電力 ; (e) 設備維護 ; (f) 工廠企畫與設計。這些對於加工廠是否能成功地運轉是非常重要的。Brennan 等 (1969) 、Earle (1966) 、Farrall (1963) 、Joslyn 及 Heid (1963) 、或 Slade (1967 、 1971) 諸人均曾詳細介紹。

加工的食品 , 依它們進入工廠狀態中的某一種狀態送出工廠 , 包括液態、固態、高濃縮液態、乾固態與半固態等。從這種簡介到複雜類型操作的處理 , 將以簡略扼要的方式逐步介紹幾種基本的範疇。

1.2 熱力學用於食品加工

本節並不介紹所有熱力學的範圍，主要的目的是提供一些在食品加工範圍較重要的參數並說明它們的應用。最基本的參數之一是熱含量 (heat content) 或焓 (enthalpy)。在熱力學中，這個特別的參數，是用下列的方程式來定義：

$$H = E + pV \quad (1.1)$$

其中 E 為系統的內能， p 為絕對壓力， V 為系統的體積。在恒壓下，系統的熱含量變化，會導致焓的變化。因此，焓 (H) 隨着其他基本參數如內能 (E)、溫度 (T)、壓力 (p) 及體積 (V) 而改變。故被定義為狀態函數 (state function)。

另一個在食品加熱及冷卻時常用的熱力學基本參數為比熱 (specific heat)。此參數通常是指在恒壓下的比熱，以下列方程式定義之：

$$c_p = \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_p \quad (1.2)$$

式 (1-2)，表示在恒壓下的比熱為焓，或熱含量在恒壓下因溫度變化所產生的變化量。此參數因不同的產品而有不同的數值。其預測與實驗值分別列在附錄中。若此類熱力學參數。數值為已知，即可應用於某一參考點以上的焓或熱含量計算。

例題 1.1 試求蕃茄湯濃縮液在 75°F (全參考點 32°F 以上) 的熱含量：

解：由附錄 (表 A.1) 查出，蕃茄湯濃縮液的比熱為 $0.878 \text{ BTU/lb}_m \text{ } ^\circ\text{F}$ ，故其焓 (ΔH) 為：

$$\Delta H = c_p \Delta T = 0.878 (75-32) = 0.878 (43) = 37.74 \text{ BTU/lb}_m$$

另一個狀態函數為熵 (entropy)。熵的變化，可用下列方程式定義之

$$dS = \frac{dq}{T} \quad (1.3)$$

雖然對熵的數值很難給出物理的意義，但要注意，任何一個真實的加工，熵的變化總是正值。

若一個系統處於恒溫、恒壓下，如許多食品在貯藏情況下，可達到一個特殊類型的平衡狀態。由此平衡狀態導致定義一個新的熱力學函數，稱為自由能（free energy），可用下列方程式來描述：

$$G = H - TS \quad (1.4)$$

自由能（ G ）的變化，等於焓與溫度乘上熵的差值。任一反應自由能的變化常等於可逆程序中對系統所做的淨功。在某一等溫程序下，自由能變化，以下列方程式定義之。這些方程式的數值與用途，將在以後各章節中詳述之。

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S \quad (1.5)$$

食品工業常用到的加工，包括某一產品狀態的改變。熱力學，可用來描述或解釋存在的狀況。若變化在恒溫、恒壓下，如大多數相變化的情況，系統從高自由能狀態往低自由能狀態改變。這個自由能的變化，通常稱為熱力位能（thermodynamic potential），等於相變化前後兩相自由能的差值。

由熱力位能的定義可導致化學位能（chemical potential）的定義，如下列的方程式：

$$\eta_i = \left[\frac{\partial G}{\partial n_i} \right]_{T, p, n_j} \quad (1.6)$$

其中 n 表示存於系統中某成分 i 的莫耳（moles）數。化學位能，代表在恒溫、恒壓與所有其他成份 j 保持不變的情況下，系統內自由能隨着該成份 i 變化所產生的變化量。換言之，化學位能為一相的自由能如何追隨組成份變化的量度。在以後章節中，化學位能將可用來推導一些描述凝固點下降、沸點上升的敘述。

相變化所包含的因數，可從純物質相圖（phase diagram）的研究而得了解。圖 1-2 顯示水在溫度-壓力座標上的相圖。線 A-C 及 A-D 分別代表液體與蒸氣、固體與液體間的平衡狀況。曲線 A-B 代表可能發生昇華的狀況，A 點代表在相同溫度與壓力下固體、液體、氣