

55

食

792809

0067

食品化學乾燥裝置

國立臺灣大學化工系

廖 明 隆 編 譯

文源書局

食品化學乾燥裝置

國立臺灣大學化工系

廖 明 隆 編 譯

文源書局有限公司印

食品化學乾燥裝置

定價新台幣

編者：廖 明 隆

發行人：陳 錦 芳

發行者：台灣文源書局有限公司

台北市重慶南路一段七十八號
郵政劃撥儲金戶第一八〇五號

印刷者：遠 大 印 刷 廠

經銷處：全省各大書局

目 錄

頁碼

1.0 緒 論	1
1.0.1 化工原理單元操作中的乾燥操作單元	1
1.0.2 固體的乾燥	4
1.0.3 臨界含水率與減速率乾燥時期	6
1.0.4 多孔性材料固體的乾燥毛細管作用的水分移動 ..	10
1.0.5 乾燥時間的計算	12
1.0.6 傳統的乾燥裝置	18
1.0.7 熱風乾燥器	26
1.0.8 流動層(流體化系)乾燥器	27
1.0.9 Turbo - SHEIF dryers (尖端回轉乾燥器)...	29
1 乾燥裝置的選定	30
1.1 選定的基礎	30
1.2 裝置的選定	31
1.3 各種裝置的特性	34
1.4 乾燥器的能力概算表	41
2 乾燥裝置設計的基礎	47
2.1 乾燥的基礎	47
2.2 熱風乾燥裝置的設計	71
2.3 乾燥裝置的熱效率	96

噴霧乾燥裝置	100
3.1 概說	100
3.2 噴霧乾燥的理論與實際	112
3.3 噴霧乾燥法的理論	130
3.4 各種噴霧機	140
3.5 噴霧乾燥法的適用與運轉操作	158
流動層乾燥裝置	170
4.1 概說	170
4.2 流動層乾燥裝置的設計	179
4.3 流動層乾燥（冷卻）裝置例	222
4.4 流動層乾燥裝置的附帶設備	244
4.5 流動層乾燥裝置的經濟考察	252
冷凍乾燥裝置	255
5.1 緒論	255
5.2 理論	265
5.3 裝置各部份的設計法	277
5.4 冷凍乾燥裝置例與運轉操作	309
食品乾燥之實際	317
6.1 被乾燥的食品材料之調整	317
6.2 前處理	317
6.3 食品工業之發展（乾燥食品的製造為主）	322
6.4 泡沫乾燥法	322
6.5 食品乾燥方面有關技術上的問題要點	323

7. 乾燥裝置的最適設計	324
7.1 乾燥裝置的選定	324
7.2 乾燥裝置的最適設計	324
7.2.1 圖式解法	325
7.2.2 數式解法	326
8. 回轉乾燥器的工場操作例	345
8.1 直接加熱向流式回轉乾燥器	346
8.1-(1)表	346
8.1-(2)表	350
8.1-(3)表	353
8.2 直接加熱並流式回轉乾燥器	356
8.3 間接直接加熱式回轉乾燥器	358
8.3-(1)表	358
8.3-(2)表	359
8.4 特殊型式回轉乾燥器	363
8.5 蒸氣式間接加熱回轉乾燥器	366

緒 論

1.0.1 化工原理單元操作中的乾燥操作單元

通常任意一種材料的含水率都表示為該材料無水乾燥質量的百分比。如果將一種材料暴露於含有固定溫度與固定濕度的空氣之中時，該材料將失去或獲得水分—直到達到一種平衡的狀況為止。

而材料的平衡含水率隨空氣流的含水率與溫度而變化，由圖 1.0.1 可看出此種性質。以砂和礫土為例，均為非多孔性不溶於水的物質，它們的平衡含水率都趨近於 0，不論空氣流具有何種濕度與溫度。但是對於許多有機物質的材料，以木材、纖維、和皮革等在平衡含水率有較大範圍的變化。

通常含水率有兩種形式，可說明如下：

- a. 限界含水率：包含在材料中的水分所產生的蒸氣壓小於在同一溫度下一般自由水的蒸氣壓。此種水分通常包含在毛細管中，或吸附在材料的表面上，或則存留在溶液中與結晶壁內。
- b. 自由含水率：材料中的水分，其超出平衡含水率的水分量。

一般對於材料的乾燥處理，都以空氣或高熱的氣體通過材料層以脫除材料所含水分。而這些氣體帶走水分的能力就要根據它們自身的溫度與濕度始可加以決定。因此要設計出一種以空氣流實施乾燥的乾燥器，需要對空氣—水間的性質特性有充分的瞭解。像一般的（空氣—水）濕度表為不可缺少的必要工具。

濕度 H ：為單位質量的乾燥空氣中所含水分量

$$\text{因} \quad \frac{\text{水蒸氣摩爾數}}{\text{乾燥空氣摩爾數}} = \frac{P_w}{P - P_w}$$

$$\text{所以} \quad H = \frac{18 P_w}{29 (P - P_w)}$$

2 食品化學品乾燥加工裝置

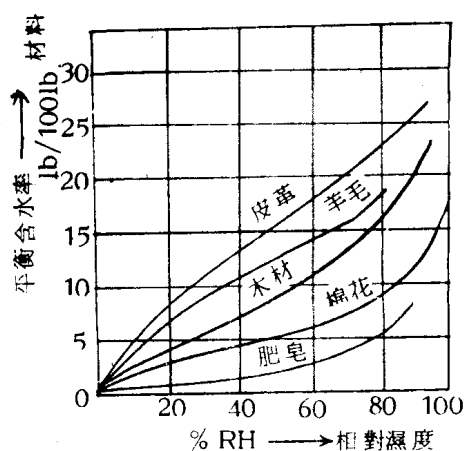


圖 1.0.1

P_w 代表水蒸氣的分壓，而 P 為系統總氣壓大小。

飽和空氣的濕度：與水蒸氣達到飽和時空氣的濕度，而該空氣流在給予的溫度和壓力下與水蒸氣達到平衡的狀況。

$$\begin{aligned} \text{百分比濕度} &= \frac{\text{空氣的濕度}}{\text{飽和空氣的濕度}} \times 100 \\ &= \frac{H \times 100}{H_s} \end{aligned}$$

$$\text{百分比相對濕度} = \frac{\text{在空氣流中水蒸氣的分壓}}{\text{同溫度下水的蒸氣壓}} \times 100$$

對於百分比濕度與百分比相對濕度的差別應加以注意。

濕體積 (Humid volume)：為乾燥空氣與組合水蒸氣在單位質量中所含之體積。

在大氣壓下，濕體積的數值可由下列二式表示：

$$\frac{359}{29} \cdot \frac{T}{273} + \frac{359H}{18} \cdot \frac{T}{273} \text{ ft}^3/\text{lb} \quad T^{\circ}\text{K} \quad \text{Kelvin 溫標}$$

或

$$\frac{359}{29} \cdot \frac{T}{492} + \frac{359H}{18} \cdot \frac{T}{492} \text{ ft}^3 / \text{lb} \quad T^{\circ}\text{R Rankine 溫標}$$

飽和體積：乾燥空氣與組合的飽和水蒸氣單位質量中所含之體積。

濕比熱 (Humid heat)：為在定壓下要升高單位質量的乾燥空氣與組合水蒸氣溫度 1 度所需加入的熱量。

$$\text{濕比熱} = 0.24 + 0.45 H$$

露點 (dew point)：當空氣流被冷卻時，開始凝結出水滴時的溫度。

濕球溫度：令一空氣流很快地通過一水面，假設水的溫度高於空氣流的露點，則開始水分的蒸發作用，由蒸發作用促使水的溫度降低，此時熱流又自空氣流傳入水中，如果這水面是充分地小而不會影響空氣流的狀況，而空氣流的速度又超出為 15 ft/sec，則在此種平衡狀況之下，水則達到了濕球溫度 θ_w 。

自氣體至液體的熱傳導速率

$$= hA(\theta - \theta_w) \quad (1-0-1)$$

水分蒸發的質量速率為：

$$\begin{aligned} &= \frac{h_D A M_w}{RT} (P_{w_0} - P_w) \\ &= \frac{h_D A M_A}{RT} (P - P_w)_{\text{max}} (H_w - H) \\ &= h_D A \rho_A (H_w - H) \quad (1-0-2) \end{aligned}$$

產生上面水分的蒸發所需熱傳導速率：

$$= h_D A \rho_A (H_w - H) \lambda \quad (1-0-3)$$

在空氣流與水達到平衡的狀況時，由 (1-0-1) 式與 (1-0-3) 式導出的熱傳導速率應相等：

$$H - H_w = -\frac{h}{h_D \rho_A \lambda} (\theta - \theta_w) \quad (1-0-4)$$

濕球溫度 θ_w 依賴用於乾燥處理的空氣流之溫度與濕度。

在上列方程式中，

h 為熱傳遞係數

h_D 為質量傳遞係數

A 為接觸面表面積

θ 為空氣流的溫度

θ_w 為濕球溫度

P_w 為在濕球溫度 θ_w 時水的蒸氣壓

M_A 為空氣分子量

M_w 為水的分子量

R 為氣體常數

T 為絕對溫度

H 為氣流的濕度

H_w 為飽和空氣在 θ_w 時的濕度值

ρ_A 為在平均分壓下，空氣流的密度

λ 為水的蒸發熱

1.0.2 固體的乾燥

由圖 1-0.2 非多孔性黏土薄片的乾燥速率曲線，可以看出每一乾燥速率曲線至少具有兩個階段，在一個預熱期間之後，材料的溫度可調整到適合於乾燥的條件，此時，每一曲線都有一水平的階段，它屬於主要的乾燥處理階段。

如果固體最初的含水率是小於某一最小值，則該時期可以被忽略，稱為等速率乾燥時期。在這種情況之下，乾燥速率與固體的含水率互不相關，固體表面非常濕潤，以致於有一連續薄層的水分覆蓋整個乾燥表面。固體如為非多孔性材料，在這時期所除去的水均為固體表面上附着的水分。若為多孔性材料，則在此等速率乾燥時期所除去的水大半源自固體內部。任一多孔性材料的蒸發作用與

濕球溫度計的乾燥機構完全相同，濕球溫度計的變化程序即為一種等速率乾燥作用。

若忽略經由熱輻射作用或與固體熱表面直接接觸所產生的熱傳導作用時，則固體在等速率乾燥時期的溫度即為空氣流的濕球溫度。

為計算等速率乾燥時期的乾燥速率，可以應用下列(1-0-2-1)式與(1-0-2-2)式的質量傳遞方程式與熱傳遞方程式。

$$m = M \cdot k_y (H_i - H) A \quad (1-0-2-1)$$

$$m = \frac{h_y (T - T_i) A}{\lambda_i} \quad (1-0-2-2)$$

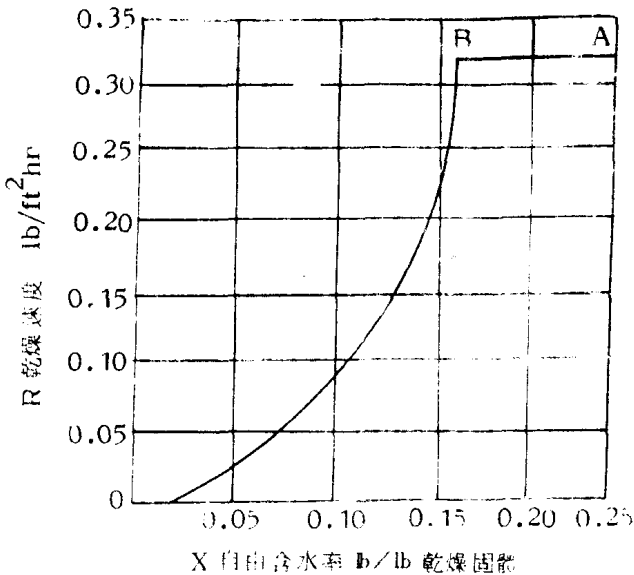


圖 1.0.2

以上一式中， m 為蒸發速率， lb/hr

A 為乾燥處理面積， ft^2

h_y 為熱傳遞係數， $\text{Btu}/(\text{ft})^2 (\text{hr})(^\circ\text{F})$

k_y 爲質量傳遞係數， $\text{lbmole}/(\text{ft})^2(\text{hr})$ (單位 mole 分量差)

H_i 爲在接觸面上的空氣流濕度， $\text{lb 水}/\text{lb 乾燥空氣}$

H 爲空氣流濕度， $\text{lb 水}/\text{lb 乾燥空氣}$

M_B 爲空氣的分子量， lb/lbmole

T 爲空氣溫度， $^{\circ}\text{F}$

T_i 爲接觸面溫度， $^{\circ}\text{F}$

λ_i 爲水在 T_i 時的蒸發熱， Btu/lb

當空氣流平行吹過固體材料的表面時熱傳遞係數可以由下列方程式表示出來：

$$h_y = 0.0128 G^{0.8} \quad (1-0-2-3)$$

設 G 爲質量速度 ($\text{lb}/\text{ft}^2 \text{hr}$)。

若空氣流爲垂直地吹到固體材料表面時，熱傳遞係數可由下列方程式表示出來：

$$h_y = 0.37 G^{0.7} \quad (1-0-2-4)$$

當源自高熱外界的熱輻射和與材料固體表面接觸產生的熱傳導爲不可忽略時，則接觸面的溫度要大於空氣流的濕球溫度，其乾燥速率可由 (1-0-2-2) 式加以計算出來

1.0.3 臨界含水率與減速率乾燥時期

乾燥處理過程中，一旦材料的含水率開始減少，則表示等速率乾燥時期已終止於一固定的含水率，開始減速率乾燥時期，等速率乾燥時期的終止點，由圖 1.0 2 所示 B 點即爲臨界點，這一點表示在固體表面的液體水已不足以維持一連續薄層覆於固體表面。

對於非多孔性材料來說，當固體材料表面的水分被蒸發時，臨界點才發生。而對於多孔性材料而言，當水分自材料內部移動至材

料表面的速率不再相等於表面水分的蒸發速率時，則到達臨界點此種變化稱為濕球溫度蒸發過程。

如果固體材料最初的含水率就低於臨界點的含水率，則乾燥過程中就不會有等速率乾燥時期存在。

非多孔性材料的乾燥與擴散理論：

由圖 1.0.2 所表示固體材料經由減速率乾燥時期的水分分佈由圖 1.0.3 表示出來，以各位置的含水率對該位置與固體表面的距離作圖。

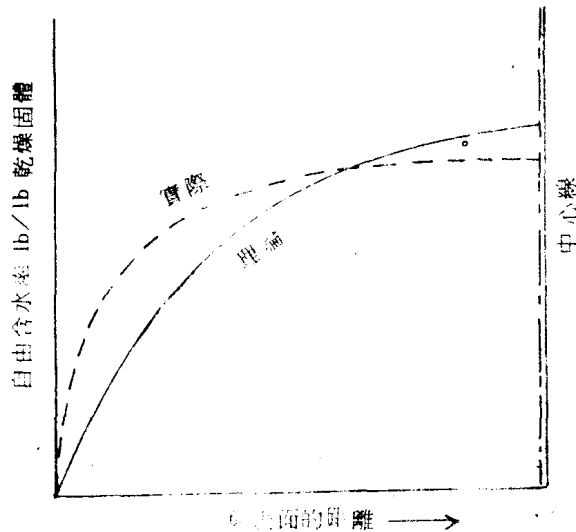


圖 1.0.3 經由兩面乾燥的薄片水分分佈水分移動經由擴散力。

由圖上可看出該曲線為凹下型的形態，對於非多孔性材料，如肥皂、膠、塑性黏土的乾燥過程，即可得此種曲線。

擴散是一種緩慢乾燥物料的特性，而由固體表面到空氣流的蒸氣質量傳遞，其所遭受的阻力，通常是可以忽略不計的。固體內部的水分擴散作用實則控制整個乾燥速率，而固體表面的內含水率

非常接近於平衡時的數值。有關平衡含水率方面，空氣流的濕度影響乾燥處理過程，空氣流的速度則幾乎無影響，因為擴散效應隨溫度的增高而增強，因此固體材料的乾燥速率也隨固體的溫度升高而增大。

擴散方程式：

對於固體材料的乾燥處理過程，可得下列擴散方程式：

$$\frac{X_T - X^*}{X_{T_1} - X^*} = \frac{X}{X_1} = \frac{8}{\pi^2} \left(e^{-a_1^2 \beta} + \frac{1}{9} e^{-9a_1^2 \beta} + \frac{1}{25} e^{-25a_1^2 \beta} + \dots \right) \quad (1-0-3-1)$$

$$\beta = D_v' t_T / S^2$$

$$a_1 = (\pi/2)^2$$

X_T = 為在 t_T hr 的平均總含水率，lb 水 / lb 乾燥固體

X = 為在時間 t_T hr 的平均自由含水率

X^* = 為平衡含水率

X_{T_1} = 在 $t=0$ 開始時的最初含水率

X_1 = 最初自由含水率

D_v' = 水分自固體內部擴散的擴散係數， ft^2/hr

S = 薄片的半厚度， ft

擴散理論的準確性，事實上受到實際的考驗，因擴散效應通常不為固定，而是伴同含水率的變化而改變的，在低含水率的狀況下， D_v' 的數值較小，也許小到幾乎近於乾燥表面上的擴散係數。

以固定擴散率的擴散理論所導出的水分分佈曲線可由圖 1-0-3 上實線曲線表示出來。實際上，實驗性的材料乾燥處理過程，通常採用 D_v' 的平均數值。

當 β 值約大於 0.1 時，(1-0-3-1) 式右邊才有意義於第一項 $e^{-a_1^2 \beta}$ ，其餘無窮級數項均可忽略。

由此可解出下列結果：

$$t_r = \frac{4S^2}{\pi^2 D_v'} \ln \frac{8X_1}{\pi^2 X} \quad (1-0-3-2)$$

由上式再對時間 t 微分，可得：

$$-\frac{dX}{dt} = \left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \frac{D_v'}{S^2} X \quad (1-0-3-3)$$

式 (1-0-3-3) 說明，當擴散作用控制整個乾燥處理過程時，固體材料的乾燥速率是與材料薄片的厚度平方值成反比。

由 (1-0-3-2) 式說明，以時間對自由含水率的對數值作圖可得一直線，其斜率可用來計算 D_v' 值。

〔例題〕 對 1 in 厚度的木板實施乾燥處理，使用空氣流（其濕度可忽略）自材料表面通過，要使材料自 25 % 的含水率降低到 5 % 的含水率，需要多長的時間？ $D_v' = 3.2 \times 10^{-5} \text{ ft}^2/\text{hr}$

〔解〕 因空氣流為乾燥空氣，平衡含水率可視為 0， $X_1 = 0.25$ ， $X = 0.05$ ，則 $X/X_1 = 0.05/0.25 = 0.20$ ，由圖 1.0-3-2，以 β 代替 N_{r0} ，以 X/X_1 代替 $(T_s - T_b)/(T_s - T_a)$ 應用於大平面薄板的乾燥處理。由縱坐標的 0.20 可讀出 β 值在橫坐標為 0.57。

因 $S = 0.5/12 \text{ ft}$

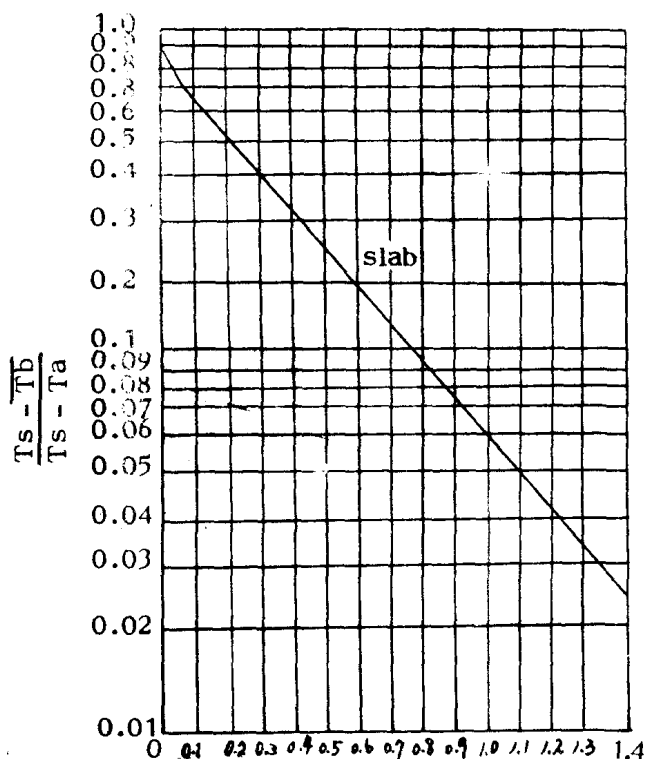
$$\frac{3.2 \times 10^{-5} t_r}{(0.5/12)^2} = 0.57$$

求得 $t_r = 31.0 \text{ hr}$

另一解法：由 (1-0-3-2) 式可得：

$$t_r = \frac{4(0.5/12)^2 2.303 \log_{10} \left(\frac{8 \times 0.25}{\pi^2 \times 0.05} \right)}{\pi^2 (3.2 \times 10^{-5})}$$

$$= 30.8 \text{ hr}$$



$$Nr = \frac{atr}{S^2} \text{ 或 } \frac{atr}{\gamma_m^2}$$

圖 1.0.3-2

1.0.4 多孔性材料固體的乾燥 毛細管作用的水分移動

對於粉粒體固體材料層或對於多孔性結構的材料，分子擴散理論不再適用。這些材料內水分或液體的移動源自水的靜液壓差，或表面張力的作用，而在一個有曲度的液面，由表面張力作用產生的壓力是不同於一水平液面所產生的壓力。

$$\text{對於一半徑爲 } r \text{ 的球， } -\Delta P = \frac{2\gamma}{r} \quad (1-0-4-1)$$

$-\Delta P$ = 由表面張力效應所產生的壓力降， lbf/in^2

γ = 液體和氣相接觸面間的表面張力， lbf/in

r = 球的曲率半徑， in

若是 r 代表一小氣泡被外圍液體所包圍者的半徑， r 為正值，
若 r 表示為一液滴被外圍氣體所包圍者， r 為負值。

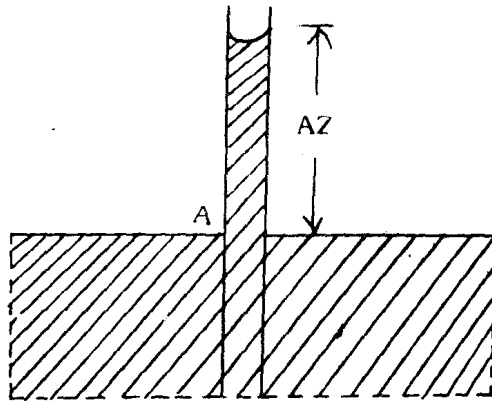


圖 1-0-4-1 毛細管效應

由圖 1-0-4-1 看出，以一小管插入液體中，液體在管中上昇的高度可由 A 點的力平衡關係算出。

只有當液體濕潤管的內壁非常完全，在管內壁的接觸角為 0 時，管中的液面才具有與小管半徑相同的曲率半徑。

由 A 點力平衡的關係，可得下式：

$$-\Delta P = \Delta Z g c (\rho_L - \rho_v) = \frac{2\gamma}{r}$$

$$\Delta Z = \frac{2\gamma}{r g c (\rho_L - \rho_v)} \quad (1-0-4-2)$$

上式中， r 可以小管內半徑計算。

在許多多孔性材料固體中，小孔的大小並不固定，液體濕潤的