

環流型浮動層乾燥機之設計及特性研究

The Study on the Design and Characteristics of a Circulating-type Fluidized Bed Dryer

國立中興大學農機系副教授

陳 俊 明

Jiunn-Ming Chen

摘 要

本文分析稻穀乾燥之基本特性，將影響乾燥之因素歸納，並設計一頗能滿足稻穀乾燥條件之環流型浮動層乾燥機。由實驗結果顯示，本機對稻穀乾燥速率每分鐘可達0.75~0.85%，為一般循環式稻穀乾燥機之40倍左右，且胴裂率在13%以下。同時本機對其他穀類之乾燥如玉米、瓜子、綠豆、紅豆或蔥片等效果亦甚佳。

Abstract

The purpose of present investigation is to study the basic characteristics of rough rice drying. All the affected factors are collected and analyzed. A circulating-type fluidized bed dryer is designed to satisfy the conditions of a rice drying. From the results of experiments, the drying rate of the present dryer can reach 0.75~0.85% per minute which is about forty times drying rate of the general circulating-type rough rice dryer. And the cracking rate is under 13%. Meanwhile, the present dryer is effective for other corns such as corn, seeds of melon, green bean, red bean and onions etc.

一、前 言

農產品為要加工製造或利於儲藏，常需加以乾燥。自古以來，人們就知道利用太陽輻射熱作為乾燥之用。一般農產品直接放置地上日晒，不需設備非常方便。但是這種方式需要較多的人工，大面積的晒場及較長的時間；此外，易受灰塵及其他外在環境因素所影響，而且品質不容易控制。由於自然

乾燥法具有上述種種缺點，因而有機械乾燥法之使用。亦即利用送風機強迫已加熱或未加熱之空氣通過穀層，吸收穀物中所含水分，以達成乾燥之作用。此法乃是克服自然乾燥法之缺點而開發出來的，雖然設備費較高，但却具有不受氣候因素支配、減少人工、不需廣大空間、縮短乾燥時間、可保持穀物品質等優點。

目前本省農民使用較多之乾燥機型式有二種，

其一為靜置式乾燥機，穀物放入此乾燥機後，靜置不動，令熱空氣經過，直至穀物含水量到達需要之標準為止。此機種之特點為結構簡單造價低廉，容量亦可隨需要任意更改，唯其缺點是乾燥較不均勻。其二為循環式乾燥機，一批穀物放入該機後，即在機內自動循環流動乾燥，直至穀物含水量達需要程度為止，一般容量大致在1.8~5.4立方公尺，平均乾燥速率每小時0.7~0.8%WB，其特點是乾燥較為均勻。此外，臺大農機系曾自日本引進一台浮動層乾燥機進行試驗，其原理係利用強烈熱空氣由下方吹起穀層，使穀粒懸浮於熱空氣中，以甚大之熱傳面積接受熱風之乾燥，熱傳效率高，且可獲得相當均勻的含水率，但含水率不易低於18%，僅適於搶救之用。成大機械系在國科會經費補助下亦曾進行有關浮動層乾燥機之改良研究，亦頗有成效。

本研究經由學理上之探討，發現浮動層乾燥機頗能配合稻穀之乾燥特性，即稻穀乾燥時，在相同溫差下，需要大的接觸面積、高速氣流，且乾燥時間要短，而浮動層乾燥機：

(1)熱傳係數甚高，達金屬銀之100倍，為其他型式乾燥機所不及。

(2)稻穀與熱風接觸面積特高，在浮動層中，一升稻穀與熱空氣之接觸面積，約為靜置層之200倍。

(3)造成浮動之速度足夠供應所需熱量，並帶走所蒸發之水分。

(4)流體般之特性，能夠輕易地從一容器流至另一容器，適合連續性操作，對於大量稻穀之處理，快速而方便。

(5)混合非常均勻，溫度亦非常均勻，不易有局部過熱現象。

(6)乾燥率可以非常高，故加熱時間可以非常短，胴裂率因此亦相當低。

故浮動層穀物乾燥機，在短時間內可處理大量稻穀，不但可用於搶救之用，平時亦具有其他型式乾燥機所不及之優點，即可用於其他農產物如蔥片、蒜片、玉米、瓜子、辣椒等乾燥之用，降低乾燥機之擱置成本，頗具發展潛力。

本研究旨在探討穀物之乾燥特性，並運用所建立之乾燥理論與浮動層理論相互配合，予以研製一台環流型浮動層穀物乾燥機。本機種係一新構想，主要在設計一新型之流動層，使穀粒能在流動層內自動作180度之轉彎循環乾燥，因而使機體能夠小

型化。此外，本研究亦對所設計研製之新型浮動層乾燥機進行乾燥特性研究，俾供以後改良設計、發展此類乾燥機之基本資料。

二、穀物乾燥理論

(一)熱風乾燥基本原理：

穀物是感濕性物質，當置於空氣中時，穀物與空氣之間會發生兩種交互作用，其一為熱量傳送，另一為質量傳送，此兩種作用同時發生逐漸趨於動力平衡，如圖1所示。當達平衡時，穀物中之含水量稱為平衡含水量(Equilibrium moisture content)。表一所列為各種穀物在不同空氣條件下之平衡含水量。

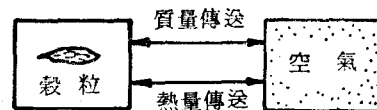


圖1 穀物乾燥模型

從表中吾人可知：

(1)溫度愈高，穀物之平衡含水量愈低。

(2)空氣之相對濕度愈高，穀物之平衡含水量愈高。

以經驗公式表之如下：

$$M_e = \left(\frac{\ln RH}{CT} \right)^{1/n} \dots\dots\dots (1)$$

式中： M_e ：為平衡含水量

RH ：為相對濕度

n, C ：為常數，隨穀物之種類而定

T ：為絕對溫度

若在某空氣條件之下，穀物之含水量高於平衡含水量，則穀物中之水分自然傳向空氣中。若再將溫度提高，則又可降低空氣中之相對濕度，由式(1)知 M_e 更形降低了。穀物含水量與平衡含水量之差更大，因此穀物與空氣間質熱傳送之作用加大，更能達到乾燥之效果，此即普通熱風乾燥之基本原理。當熱風乾燥開始時，熱量傳送進穀粒內，提高穀粒內之溫度，連帶地提高穀粒之蒸汽壓，同時降低平衡含水量及平衡蒸汽壓，並供給水分蒸發之熱量，根據參考資料⁽³⁾，質量傳送與 $(M-M_e)$ 及 (P_g-P_a) 成正比，故 $(M-M_e)$ ， (P_g-P_a) 增加，質量之傳送亦隨之加速，直至含水量降低， $(M-M_e)$ ， (P_g-P_a) 降低，水分傳送率才減緩下來。

表一 各種穀物之平衡水含量

| 穀物種類 | 溫度 | 濕度 | | | | | | | | | |
|------|-------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
| 燕麥 | 77°F | 4.1 | 6.6 | 8.1 | 9.1 | 10.3 | 11.8 | 13.0 | 14.9 | 18.5 | 24.1 |
| 稻穀 | 77°F | 5.9 | 8.0 | 9.5 | 10.9 | 12.2 | 13.3 | 14.1 | 15.2 | 19.1 | |
| | 100°F | 4.9 | 7.0 | 8.4 | 9.8 | 11.1 | 12.3 | 13.3 | 14.8 | 17.8 | |
| 糙米 | 80°F | | | | 9.2 | 10.4 | 11.7 | 13.2 | 15.0 | 17.1 | |
| | 111°F | | | | | | 10.3 | 12.3 | 14.3 | 16.5 | |
| 小麥 | 77°F | 5.8 | 7.6 | 9.1 | 10.7 | 11.6 | 13.0 | 14.5 | 16.8 | 20.6 | |
| | 122°F | 4.0 | 5.8 | 6.7 | 8.1 | 10.1 | 10.8 | 12.6 | 15.1 | 19.4 | |

(二) 稻穀乾燥過程中之質熱傳送：

1. 熱量傳送：

根據熱傳導方程式：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k_g}{\rho_g C_{pg}} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2)$$

經轉換成

$$\frac{\partial(rT)}{\partial t} = \frac{k_g}{\rho_g C_{pg}} \frac{\partial^2(rT)}{\partial r^2} \quad (3)$$

$$\text{令 } u = rT, \alpha_g = \frac{k_g}{\rho_g C_{pg}}$$

$$\text{則 } \frac{\partial u}{\partial t} = \alpha_g \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \quad (4)$$

邊界條件：

$$t = 0, r = r, u = rT_r \quad (5)$$

$$t = t, r = 0, u = 0 \quad (6)$$

$$t = t, r = R, u = RT_o \quad (7)$$

$$\text{解得 } u = 2T_r \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{R}{n\pi} e^{-\frac{(n\pi)^2 \alpha_g t}{R^2}} \sin \frac{n\pi r}{R} + T_o \left\{ r + \frac{2R}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(-1)^n}{n} \right. \right. \\ \left. \left. e^{-\frac{(n\pi)^2 \alpha_g t}{R^2}} \sin \frac{n\pi r}{R} \right] \right\} \quad (8)$$

$$\therefore \frac{T - T_o}{T_r - T_o} = \frac{2R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n} e^{-\frac{(n\pi)^2 \alpha_g t}{R^2}} \sin \frac{n\pi r}{R} \quad (9)$$

爲了明瞭穀粒內部溫度之變化情形，可令 $r = 0.1R$ ，而求 $r = 0.1R$ 處溫度隨時間變化之關係如圖 2 所示，可知當 $t = 20$ 秒時，內外之溫度已幾乎相等，故在穀粒內熱傳速率非常快速，比起質量傳送之情形，此項熱傳因素之影響較小，通常可忽略不計。

2. 質量傳送：

影響質量傳送之因素很多，探究之如下：

(1) 穀類之水含量：

根據 Hustrulid 之研究⁽⁸⁾，穀類（玉米）之擴散係數 D 爲水含量之函數。

$$D(M) = 1.5134 \exp \{ (0.00045T - 0.05485) M - \frac{2513}{T} \}, \quad T = ^\circ K,$$

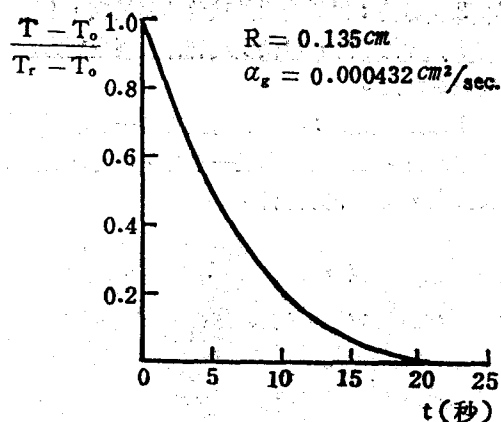


圖2 $r=0.1R$ 處溫度之變化情形

Hustrulid所研究之穀粒大小為 $1.04\text{cm} \times 0.4\text{cm} \times 0.78\text{cm}$ ，起初水含量大致在24%~36%之間。水含量高者其擴散係數較大，隨着乾燥之進行水含量逐次降低，其擴散係數亦隨之降低。又根據Becker之研究，小麥之水含量若在9.7%~5.2%之間，則

$$D = 0.023 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}, (112^\circ\text{F})$$

$$D = 0.254 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}, (176^\circ\text{F})$$

而水含量在10.3%以上時

$$D = 0.565 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}, (112^\circ\text{F})$$

$$D = 3.1 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{sec}, (176^\circ\text{F})$$

即在不同之水含量範圍，擴散係數相差甚大達10~25倍之劇。

(2)穀類開始乾燥時之水分分佈：

若開始乾燥時，水分分佈不均勻，則乾燥時，必增加擴散至均勻所耗費之時間，乾燥速率自然減低，一般從田間收穫下來之穀粒，可視為經長時間之擴散，而假設其水分係均勻分佈，若在乾燥過程中有和化之程序，則和化時間之長短，對於水分分佈之影響甚大，根據參考資料⁽¹⁴⁾，吾人可看出和化時間對稻穀內水分分佈之影響，如圖3所示。和化時間愈長，穀粒內水分之分佈愈平均，故再次乾燥時質量之傳送愈快。

(三)穀粒與熱空氣之接觸面積：

在靜置式熱風乾燥設備，甚至循環式乾燥設備中，穀粒無法與熱風密切接觸，因此質熱傳送之效果亦差，乾燥速率當然不高，且因為有局部乾燥之處，容易過熱或胴裂，故乾燥品質亦不佳。在浮動層乾燥設備中，質量傳送之面積為所有穀粒表面積

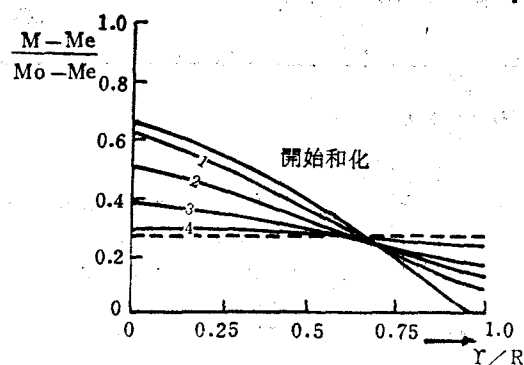


圖3 和化時間對穀粒內水分分佈之影響

之總和，接觸面積最大而且均勻，乾燥效果當然較佳，乾燥速率亦大為提高。

(四)熱風之溫度與濕度：

前面曾提及熱風溫度之提高，對於稻穀內蒸汽壓之增加及平衡蒸汽壓之減低有甚大之作用，根據參考資料⁽²⁾：

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\text{蒸汽壓之驅動力}}{\text{乾燥之阻力}} = \frac{P_s - P_a}{1/k_s' a_m} = k_s' a_m (P_s - P_a)$$

可知熱風溫度之提高，對乾燥速率有甚大之效果。

Hall 曾探討熱風溫度及濕度對乾燥速率之影響⁽²⁾，發現濕度增加3~4倍，相當於溫度降低50°F之效果。又根據參考資料⁽¹⁴⁾，在40°C時， $D = 0.035 \text{ cm}^2/\text{hr}$ ；60°C時， $D = 0.14 \text{ cm}^2/\text{hr}$ ；80°C時， $D = 0.50 \text{ cm}^2/\text{hr}$ ；即溫度每提高20°C，其擴散速率即提高3~4倍，可知溫度為乾燥穀物非常重要之因素。但溫度亦不宜過高，因為稻穀溫度若超過45°C，會損害其發芽率，且溫度太高，會提高胴裂率，增加碎米量，降低稻穀品質。熱風之溫度與濕度對質量傳送之影響如圖4、5所示。

(五)熱風速度：

稻穀乾燥所需之熱量由熱風供給，稻穀內部傳

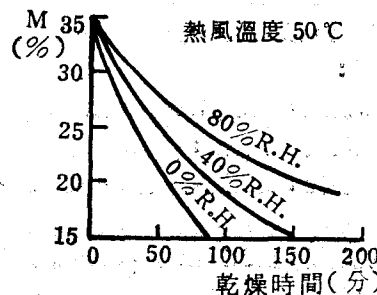


圖4 熱風濕度對質量傳送之影響

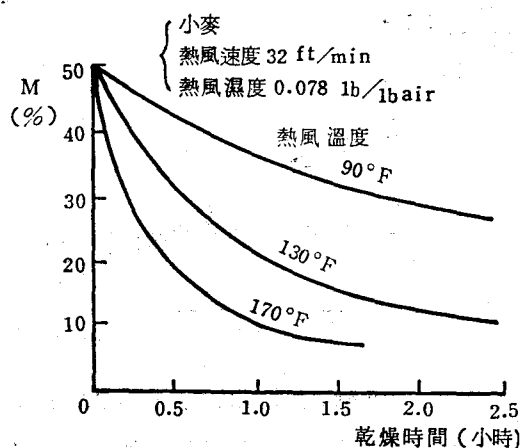


圖 5 熱風溫度對質量傳送之影響

出之水分亦藉熱風帶走，如果熱量不夠或傳出之水分在表面累積，造成一層厚的汽膜，必妨礙乾燥之進行。在靜置式或循環式乾燥機中，因熱風之速度不大，無法給每粒稻穀以充分之熱量，表面之汽膜亦較厚，故乾燥速率較低。而乾燥速率係隨熱風速度之增加而增加。在浮動層乾燥機中，造成浮動之速度通常已足夠大，熱量之供給足夠且表面之汽膜亦極薄，故在進入減率乾燥期後，速度對乾燥速率之影響可以忽略。

根據以上討論，則在同樣含水量之下，吾人可以經由改善乾燥時穀類水分分佈，穀粒與熱空氣接觸面積，提高熱風溫度及熱風速度，而提高質量傳送率。欲改善乾燥時水分分佈，必須在乾燥過程中，加上和化之程序，至於穀粒與熱空氣之接觸面積，如使用浮動層乾燥機當較其他靜置式及循環式乾燥機大很多倍，此點已無庸置疑。若要提高熱風溫度，則不得不對胴裂之問題加以探討。

三、浮動層乾燥機之基本實驗

爲了探究浮動層乾燥機之質量傳送情形，先不管胴裂之問題，以分批型浮動層乾燥機實驗如下：

(一)實驗裝置：

如圖 6 所示，總高約 1.58m，乾燥筒直徑 300 mm，主要構成部分包括：

1. 熱風裝置：由瓦斯爐、送風機及風量調整閥所構成。

2. 多孔網板：爲 2.3mm 厚，310mm 直徑之不銹鋼板，每隔 16mm 鑽直徑 6mm 之圓孔，共約 224 孔。

3. 乾燥筒：以透明耐熱玻璃圓筒製成，上下各鑽有 7mm 之圓孔，以供皮氏管伸入測量壓力及供溫度測量之用。

4. 進出料裝置：在乾燥筒上方有一活動門，可由此處進料。另以角鐵焊製一平台，可將乾燥筒平托於其上，而由下方排料。

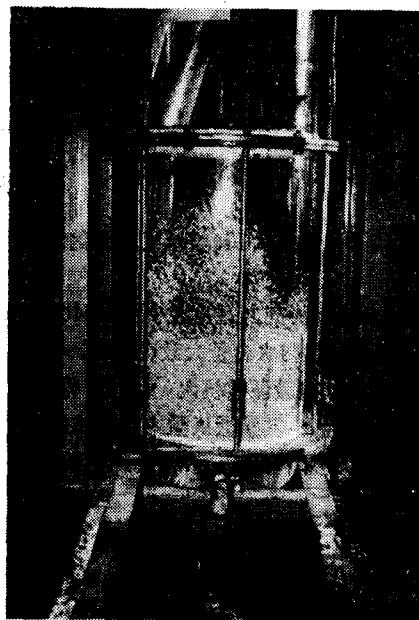


圖 6 分批型浮動層乾燥機之實驗裝置

(二)實驗步驟：

1. 測量濕穀之起初含水量，然後將濕穀置入乾燥筒中約 12cm。

2. 起動熱風裝置，以 80°C 熱風乾燥 15 分鐘，每隔 2.5 分鐘，取出樣品測其含水量。

(三)實驗結果：

總 壓：115mmAq.

靜 壓：112mmAq.

起初含水量：23.7%

靜置高度：12cm

熱風入口溫度：80°C

熱風出口溫度：30°C~70°C

風 速：0.74m/sec

浮動高度：27cm

將實驗所得含水量與乾燥時間之關係以圖形表之如圖 7 所示。在此乾燥曲線中，吾人可發現其特性，即在前 5 分鐘內，其乾燥速率幾乎保持一定，故在圖形上爲近似直線之關係，而其出口溫度則保

持 43°C 以下。

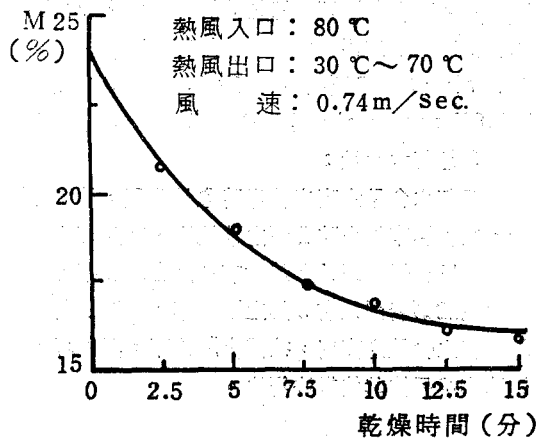


圖 7 浮動層乾燥機之乾燥曲線

現從熱量平衡，來導出浮動層乾燥機乾燥速率之關係式，由圖 8 中假設熱量損失不計，即：

(熱風所供給之熱量) = (稻穀所吸收之熱量) + (水分蒸發所吸收之熱量)

$$\begin{aligned} A_t \rho_a u_o C_{pa} (T_{a1} - T_o) dt \\ = A_t \rho_g (1 - \epsilon_m) L_r C_{pg} dT_g \\ + A_t \rho_g L_r (1 - \epsilon_m) L_o dM \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

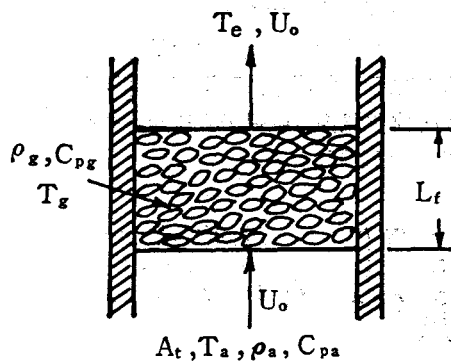


圖 8 浮動層乾燥機之熱量平衡

因為稻穀中水分之蒸發潛熱甚大，根據參考資料⁽²⁾，約為純水蒸發潛熱之 1.1 倍，即

$$L_o = 576 \times 1.1 = 633 \text{ cal/g}$$

故可將稻穀提高溫度所吸收之熱量略去不計，得

$$\begin{aligned} A_t \rho_a u_o C_{pa} (T_{a1} - T_o) dt \\ = A_t \rho_g L_r (1 - \epsilon_m) L_o dM \\ \therefore \frac{dM}{dt} = \frac{\rho_a C_{pa} (T_{a1} - T_o)}{\rho_g L_o (1 - \epsilon_m)} \frac{u_o}{L_r} \dots\dots\dots (11) \end{aligned}$$

其中 ρ_a , ρ_g , C_{pa} , L_o , $(1 - \epsilon_m)$, $\frac{u_o}{L_r}$ ，若為定值，則乾燥速率為 $(T_{a1} - T_o)$ 之函數，即 $(T_{a1} - T_o)$ 愈大，則乾燥速率亦愈大。若設 $\rho_a = 1.1 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, $\rho_g = 1.33 \text{ g/cm}^3$, $C_{pa} = 0.245 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $L_o = 633 \text{ cal/g}$, $(1 - \epsilon_m) = 0.49$, $\frac{u_o}{L_r} = 4.93 \text{ sec}^{-1}$, $(T_{a1} - T_o) = 40^\circ\text{C}$ ，則 $\frac{dM}{dt} = 0.77\%$ /分。通常水含量高之稻穀，可以忍受較高之熱風溫度，乃因為水分之快速蒸發，可以使稻穀維持在較低之溫度，此時之乾燥速率亦較快，隨着水含量之降低，乾燥速率亦減少，此時因為水分蒸發之冷卻效果較小，出口之稻穀溫度亦因之提高，當然 $(T_{a1} - T_o)$ 就減少了。在浮動層乾燥機中吾人即據此基本實驗來瞭解乾燥速率之變化情形，亦引為控制乾燥速率快慢及環流型浮動層乾燥機特性及設計之依據。

四、解決稻穀胴裂問題之方法

在稻穀之乾燥中，無論用何種方法進行乾燥，均對稻穀之品質有所影響。在這些影響中，最重要的是胴裂率之控制。尤其是利用熱風乾燥時，乾燥溫度通常很高，乾燥速率甚快，其所產生之胴裂問題更形嚴重，故必須對此問題進行探究，從而找出一套最佳的解決辦法。唯有能解決此問題，才能談對稻穀之乾燥，亦才能對稻穀之乾燥作適當的控制，進而提供一項快速、經濟，而影響品質最少之乾燥方法。

(一) 胴裂之原因：

發生胴裂之原因係因為米粒內含多量之澱粉質，其凝聚性差，若遇急速乾燥，則內部之水分分佈不均，因此形成內應力，使得凝聚力失去平衡，致分崩離析，外層因為乾燥，收縮比內層厲害，故表面發生裂痕。已乾燥之稻穀，偶吸濕氣，亦會龜裂。如在田中已乾燥之稻穀，受雨水或空中濕氣弄濕，亦會有胴裂現象發生。

(二) 影響胴裂率之因素：

1. 熱風溫度：

前曾提及溫度對乾燥速率之提高有甚大之作用，但亦不能一味提高溫度，而忽略了其所產生之高胴裂率，為了明瞭熱風溫度對胴裂率之影響，茲以不同之熱風溫度測之如下：

(1) 實驗裝置：同前，如圖 6 所示。

(2)實驗步驟：

- 測量濕穀之起初水含量。
- 將濕穀置於乾燥筒中以 80°C 熱風連續乾燥至13%止。
- 測其胴裂率。
- 重複以上步驟，以 40°C 、 60°C 熱風各測試一次。

(3)實驗結果：

如圖 9 所示，若以 60°C 熱風連續乾燥時，其胴裂率在40%以上。若以 80°C 熱風連續乾燥，則胴裂率升至60%以上。

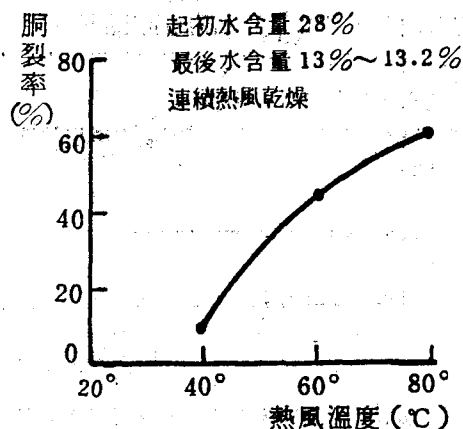


圖 9 熱風溫度對胴裂率之影響

2.熱風濕度：

熱風濕度愈小，則平衡水含量愈低，可以加速乾燥之進行，但由此增加之內部不平衡亦為胴裂率

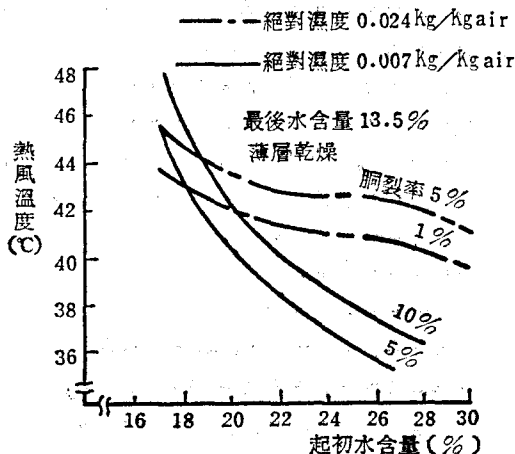


圖 10 熱風濕度對胴裂率之影響

增高之原因。由圖10中可看出，空氣濕度對胴裂率之影響。在熱風溫度 42°C 之情況下，將稻穀從20%水含量乾燥至13.5%水含量，則若濕度為 0.024kg/kg air ，其胴裂率不超過1%。若空氣濕度降低至 0.007kg/kg air ，則胴裂率激升至10%以上。

3.起初水含量：

起初水含量愈高者乾燥時愈易胴裂。據實驗顯示，在乾燥率每小時2%之情況下，若起初水含量24%，則乾燥至13.5%時會有10%之胴裂率，起初水含量22%者則只有5%之胴裂率，如圖11所示。故起初水含量愈高者，欲減少胴裂率，必須降低乾燥速率或另找其他辦法解決。

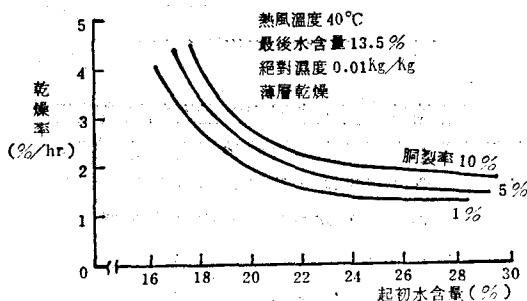


圖 11 起初水含量對胴裂率之影響

4.乾燥後水含量：

乾燥後水含量與起初水含量愈接近，則稻穀內所形成之不平衡現象愈不顯著，即胴裂率愈小。茲以 80°C 之熱風測試乾燥後水含量對胴裂率之影響，其結果如圖12所示。

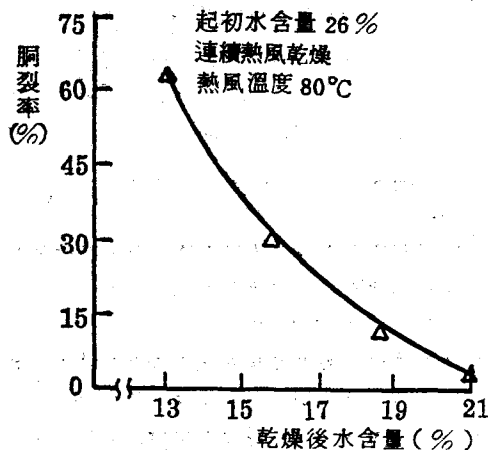


圖 12 乾燥後水含量對胴裂率之影響

5. 乾燥時間：

熱風所輸入之熱量，一面供應水分蒸發之熱量，一面將稻穀溫度提高，但並非一開始加熱就發生胴裂，而是隨時間之增加而益形嚴重。圖13為在各種熱風溫度下，加熱至胴裂率1%之時間，若熱風溫度為40℃，則可以加熱78~120分鐘，起初水含量高者，乾燥時間可以長些，若在70℃熱風條件之下，則乾燥時間只能3~8分鐘。

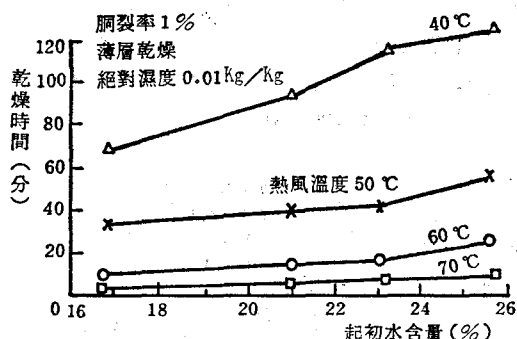


圖13 乾燥時間對胴裂率之影響

(三) 解決方法：

綜合以上之實驗結果，可知熱風溫度愈高，濕度愈低，起初水含量愈高，乾燥後水含量愈低，乾燥時間愈長，則胴裂率愈高，因為乾燥後水含量隨熱風溫度 T ，濕度 H ，起初水含量 M_0 ，以及乾燥時間 t 而定，故胴裂率 C_r 僅為 T, H, M_0, t 之函數，即

$$C_r = f(T, H, M_0, t) \dots \dots \dots (12)$$

故若要得到一項快速而胴裂率小的乾燥方法，必須尋求 T, H, M_0, t 間之最佳配合。

在實際應用中，熱風濕度端賴乾燥當時大氣之濕度而定，起初水含量亦視收穫時之稻穀水含量而定，故必須尋求在各種 H, M_0 之情況下， C_r 隨 T, t 變化之情形。

茲以 $M_0=28\%$ 及 24% 兩種濕度之稻穀，予以實驗乾燥溫度與乾燥時間之關係，其結果如圖14所示。其胴裂率為3~5%，室溫為26℃，相對濕度為80%。

由此可知，雖然乾燥溫度愈高，會產生愈高之胴裂率，但吾人可以在其尚未產生嚴重胴裂率時，暫時停止乾燥，待其內部產生胴裂之趨向消失後，再進行第二次乾燥，如此既可以提高熱風溫度以加快乾燥速率，又不致產生太大之胴裂率。

將此原理應用於浮動層乾燥機之控制上，吾人可以將乾燥溫度提高，然後根據圖14之控制曲線，在 t 分鐘後，暫時停止乾燥，進行和化之工作，和化之時間，根據參考資料⁽¹⁴⁾大致為2小時。

在環流型浮動層乾燥機之應用上，吾人可以在設計時，設定其滯留時間（即乾燥時間），然後維持胴裂率在3~5%以下，取定溫度，從事乾燥工作。本文即依據上列所作合理推論，設計環流型浮動層乾燥機。

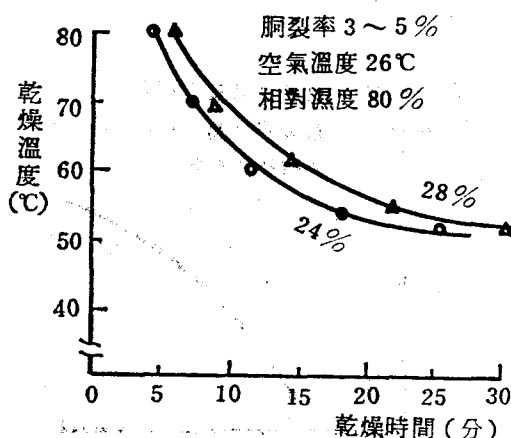


圖14 維持胴裂率3~5%下乾燥時間與乾燥溫度之控制

五、環流型浮動層乾燥機之特性及設計理論

(一) 設計條件：

稻穀之滯留時間： $t_d = 5 \text{ min}$

每小時稻穀處理量： $W = 250 \text{ kg/hr}$

穀層靜置高度： $L_r = 15 \text{ cm}$

稻穀視比重：0.65（實測平均值）

稻穀實比重：1.33（實測平均值）

孔隙比： $\epsilon_m = 0.51$

每粒稻穀實體積 V ：

$$1.92 \times 10^{-3} \text{ cm}^3 \text{ (實測平均值)}$$

每粒稻穀實表面積 S ：

$$0.426 \text{ cm}^2 \text{ (實測平均值)}$$

稻穀比熱： $0.476 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ （實測平均值）

熱傳計算使用之稻穀等值半徑：

$$R = \frac{3V}{S} = 0.135 \text{ cm}$$

稻穀之熱傳係數：

$$k_s = 0.00027 \text{ cal/sec} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$$

熱風溫度：60°C

熱風密度： $\rho_a = 1.11 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$

熱風黏度： $\mu = 1.98 \times 10^{-4} \text{ gm/sec} \cdot \text{cm}$

熱風之熱傳係數：

$k_a = 6.82 \times 10^{-6} \text{ cal/cm} \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}$

(二)設計步驟：

1. 稻穀之直徑 d_g = (假設相同體積球體之直徑)

$$\frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_g}{2} \right)^3 = 1.92 \times 10^{-2}$$

$$\therefore d_g = 0.33 \text{ cm}$$

2. 球狀度 ϕ_g (sphericity)

$$\phi_g = \left(\frac{\text{球之表面積}}{\text{稻穀之表面積}} \right) \text{ 相同體積} = \frac{0.342}{0.426} = 0.803$$

3. 起始浮動條件

浮層開始浮動之條件為

(熱風往上昇力) = (稻穀之重量)

即 (熱風經浮動層之壓力降) (浮動層截面積) = (浮動層中稻穀體積) (稻穀密度)

$$\Delta P_b \cdot A_t = A_t \cdot L_r \cdot \rho_g$$

$$\therefore \Delta P_b = L_r \cdot \rho_g = 15 \times 0.65 = 9.75 \text{ cm Aq}$$

4. 起始浮動速度 u_{mf}

設 $20 < R_{og, mf} < 1,000$ ，則根據參考資料⁽¹⁾

$$\frac{1.75}{\phi_g \epsilon_{mf}^3} \left(\frac{d_g u_{mf} \rho_a}{\mu} \right)^2 + \left[\frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_g^2 \epsilon_{mf}^3} \right] \left[\frac{d_g u_{mf} \rho_a}{\mu} \right] = \frac{d_g^3 \rho_a (\rho_g - \rho_a) g}{\mu^2}$$

$$\therefore u_{mf}^2 + 28.28 u_{mf} - 2.36 \times 10^4 = 0$$

$$\text{得 } u_{mf} = 1.40 \text{ m/sec}$$

故若取熱風速度 2 m/sec，已足以造成浮動。

檢驗 $R_{og, mf}$ ：

$$R_{og, mf} = \frac{d_g u_{mf} \rho_a}{\mu} = 370$$

5. 終端速度 u_t

為防止稻穀被熱風帶走，浮動層之速度不可超過終端速度。令 $R_{og, t} = \frac{d_g \rho_a u_t}{\mu}$ ，而 $500 <$

$R_{og, t} < 200,000$ 之情形下，則 $u_t = \left[\frac{3.1 g (\rho_g - \rho_a) d_g}{\rho_a} \right]^{1/2} = 10.96 \text{ m/sec}$ ，即熱風速度若在

10.96 m/sec 以下，則穀粒只是在浮動層中循環浮動，而不為熱風帶走。檢驗 $R_{og, t} =$

$$\frac{d_g \rho_a u_t}{\mu} = 2027$$

6. 浮動情況之判定

根據 Rice & Wilhelm, Romero & Johanson

$$F_{r, mf} = \frac{u_{mf}^2}{d_g \cdot g} = 123.7$$

$$R_{og, mf} = \frac{d_g u_{mf} \rho_a}{\mu} = 370$$

$$\frac{\rho_g - \rho_a}{\rho_a} = 1.2 \times 10^3$$

$$\frac{L_{mf}}{d_g} = 0.297$$

$$\eta = 0.5$$

$$\therefore \text{HP} = \frac{166.7 \times 24}{4500 \times 0.5} = 1.8 \text{HP}$$

為符合廠家馬達出品規格，故取 2 HP 之馬達足夠有餘。

11. 所需熱量 q

a 將稻穀加熱至 40°C 所需熱量 q_1 kcal/hr

$$\begin{aligned} q_1 &= C_{p_g} \cdot W \cdot (T_g - T_r) \\ &= 0.476 \times 250 \times (40 - 25) \\ &= 1785 \text{ Kcal/hr} \end{aligned}$$

b 將水分蒸發所需熱量 q_2

$$q_2 = L_v (M_o - M_r) W$$

設水含量從 26% 降至 20%

$$\text{則 } q_2 = 633 \times 0.06 \times 250 = 9,495 \text{ kcal/hr}$$

c 總熱量 $q = q_1 + q_2 = 11,280 \text{ kcal/hr}$

12. 浮動層內溫度之變化如圖 15 中，取一小元素 $d\ell$ ，則由熱量之平衡：

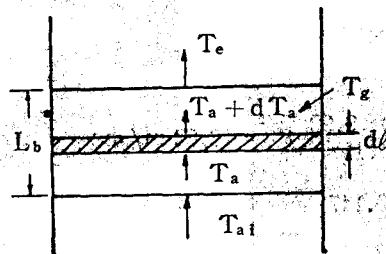


圖 15 浮動層內溫度之變化

(進氣所含熱量) - (出氣所含熱量) = (傳至稻穀之熱量)

$$A_i u_o \rho_a C_{p_a} T_a - A_i u_o \rho_a C_{p_a} (T_a + dT_a) = A_i \cdot d\ell \cdot a \cdot h_g (T_a - T_g)$$

$$\therefore \frac{dT_a}{d\ell} = - \frac{a \cdot h_g \cdot (T_a - T_g)}{u_o \rho_a C_{p_a}} \quad (13)$$

$$\text{其中 } a = \frac{6(1 - \epsilon_m)}{\phi_g d_g}$$

$$h_g = \frac{k_a}{d_g} (2 + 0.6 P_r^{1/3} R_{e_g}^{1/2})$$

$$\text{邊界條件 } \ell = 0, T_a = T_{a1} \quad (14)$$

$$\ell = L_b, T_a = T_e \quad (15)$$

設稻穀在浮動層中之溫度均勻一致，則由 (13)，(14) 二式得：

$$\frac{T_a - T_g}{T_{a1} - T_g} = \exp \left[- \frac{h_g}{\rho_a u_o C_{p_a}} \cdot a \cdot \ell \right] = \exp \left[- \frac{N_{u_g}}{P_r \cdot R_{e_g}} \cdot \frac{6(1 - \epsilon_m)}{\phi_g} \cdot \frac{\ell}{d_g} \right] \quad (16)$$

以實際稻穀數據代入式 (16) 得：

$$P_r = \frac{C_{p_a} \cdot \mu}{K_a} = 0.71$$

$$R_{e_g} = \frac{d_g \cdot u_o \cdot \rho_a}{\mu} = 370$$

$$N_{u_g} = 2 + 0.6(P_r)^{1/3} R_{e_g}^{1/2} = 13.34$$

$$\therefore \frac{T_a - T_g}{T_{a1} - T_g} = \exp[-0.563\ell] \quad (17)$$

由(15)式之邊界條件得：

$$\frac{T_s - T_g}{T_{s1} - T_g} = \exp[-0.563L_b] \dots\dots\dots (18)$$

從(17)式，當熱空氣溫度與稻穀溫度相近，若以95%平衡度計算，即：

$$\frac{T_s - T_g}{T_{s1} - T_g} = 0.05 \text{ 時}$$

$$l = 5.3 \text{ cm}$$

故在5.3cm浮動層高度以上，熱空氣溫度即接近稻穀之溫度，且接近之程度在5%以內。

由(18)式，設浮動時高度為 $L_b = 30.5 \text{ cm}$

則 $\frac{T_s - T_g}{T_{s1} - T_g} = 3.5 \times 10^{-8}$ ，即 $T_s \approx T_g$

六、實驗裝置與步驟

(一)實驗裝置：

1.環流型浮動層乾燥裝置：

其構造如圖16所示。其詳細設計圖參見附錄。

熱空氣係藉燃燒液化石油氣獲得。



圖16-1 環流型浮動層乾燥裝置外觀

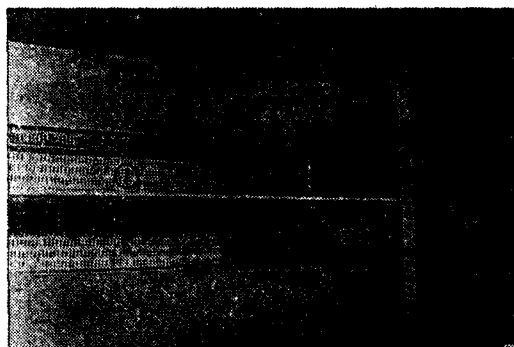
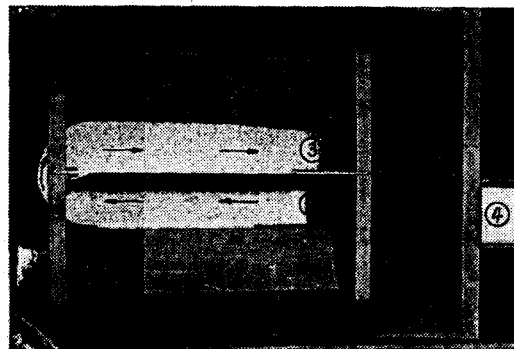


圖16-2 環流型浮動層乾燥裝置內部構造之一

①為多孔網板

②為進料口，有門板可調節開口大小

③為排料口。



【圖16-3 環流型浮動層乾燥裝置內部構造之二

④為倒料處，②為進料口，③為排料口
箭頭方向即為穀粒沿環流道流動方向。



圖16-4 穀粒沿環流道懸浮流動，
自動由出口處排料情形。

2.數字顯示熱電偶溫度計：本身有五個頻道配上一台擁有十二個頻道的切換機，總共可以量測十六點的溫度。

3.測量壓力之水柱差壓計。

4.F-2型 kett 紅外線水分測定儀。

5.P-4型 kett 電阻式水分測定儀。

6.其他如乾濕球溫度計、馬錶、磅秤、放大鏡

及照相設備等。

(二)實驗步驟：

1.乾燥能力測定：

- (1)測量濕穀之起初水含量、室溫及濕度。
- (2)將濕穀置入環流型浮動層乾燥機中，使穀層厚約15~17公分（即20~25公斤）。
- (3)開動熱風設備，以60℃熱風加熱20分鐘，每隔5分鐘，測其水含量，其間隨時記錄浮層之溫度、壓力及浮層高度。
- (4)測其胴裂率。
- (5)以室溫空氣吹浮5分鐘後，測其水含量。
- (6)將乾燥過後稻穀浸濕，以觀察其發芽情形。
- (7)重複以上步驟，以80℃進口熱風溫度各實驗一次。

2.根據乾燥控制曲線作乾燥能力測定：

- (1)測量濕穀之起初水含量、室溫及濕度。
- (2)將濕穀置入環流型浮動層乾燥機中，使穀層厚約15~17公分（即20~25公斤）。
- (3)開動熱風設備，維持熱風速度不變，以80℃熱風開始乾燥，維持出口溫度在45℃以下乾燥5分鐘。
- (4)取樣品測其水含量。
- (5)和化2小時後，取樣品測其水含量。
- (6)再送風乾燥並維持熱風出口溫度為45℃以下，連續乾燥3分鐘。
- (7)記錄所耗燃料。
- (8)將乾燥過後稻穀浸濕，觀察其發芽情形。

3.多孔網板測定：

以各型多孔網板作實驗，觀察其浮動情形。

4.出料能力測定。

七、實驗結果與討論

(一)環流型浮動層乾燥機之特性：

1.環流浮動情況觀察：

開始時空氣速度不高，風壓亦低，故空氣只從幾個固定位置噴出，此時隨空氣浮起之穀粒很少，且有一部份浮起，一部份靜止，極不均勻。隨着空氣速度之增加，空氣之通路愈多，且其位置亦隨時變動，穀粒與空氣之接觸機會亦愈多。若將速度提

高至2.2m/sec，則穀層為空氣激烈攪拌，穀粒完全浮起，且沿設計之環流道懸浮流動，穀粒於盡端並能自行作180度之轉彎，繼續於另一環流道中懸浮流動，最後由穀粒出口自動排料。其浮動情況如圖17所示。

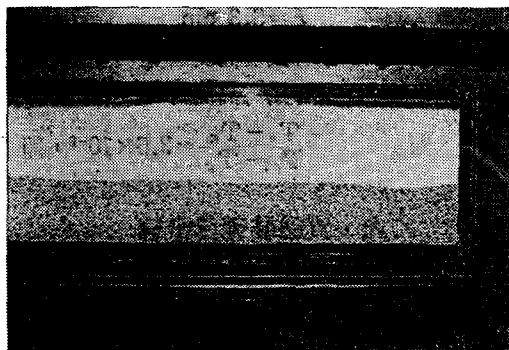


圖17-1 穀粒沿環流道懸浮流動情形
 $V=0$ ，即穀層靜置時。



圖17-2 穀粒沿環流道懸浮流動情形
 $V=0.5\text{m/sec}$ 時。



圖17-3 穀粒沿環流道懸浮流動情形
 $V=1.0\text{m/sec}$ 時。

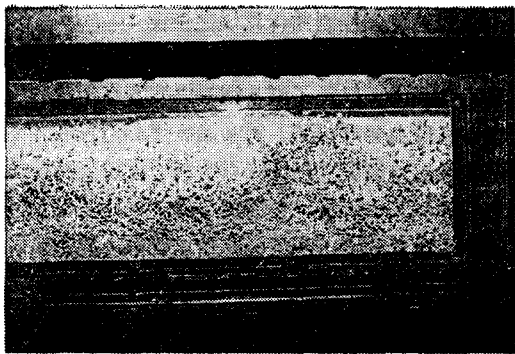


圖17-4 穀粒沿環流道懸浮流動情形
 $V=1.5\text{m/sec}$ 時。

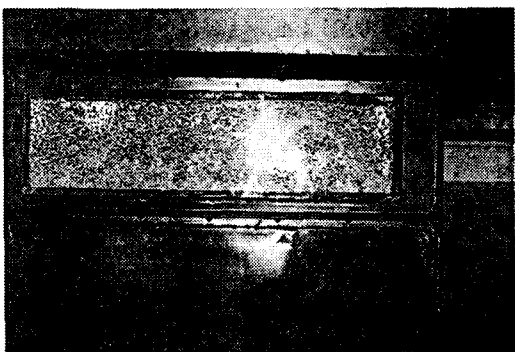


圖17-5 穀粒沿環流道懸浮流動情形
 $V=2.2\text{m/sec}$ 時。

2. 浮動層中之壓力分佈：

如圖18所示，在浮動層內壓力隨浮層高度而變，近乎一條直線，由此可見浮動之情況相當均勻。

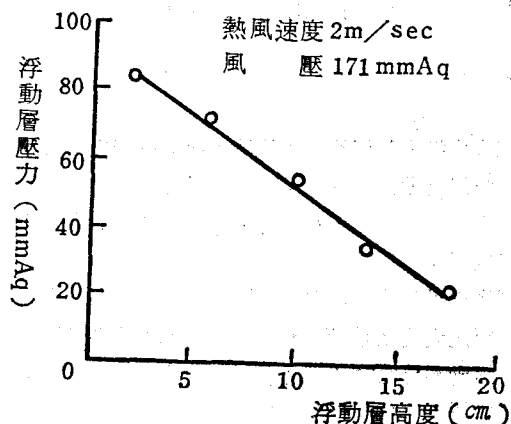


圖18 浮動層壓力分佈

3. 浮動層中之溫度分佈：

如圖19所示，在5.5cm以下時溫度較低，而且變動相當厲害，此乃因此處稻穀密度較大，溫度壓差計之觸點 (Sensor) 時而接觸穀粒，時而接觸熱空氣所致，從此圖亦可看出在 9 cm 以上，溫度分佈相當均勻，且隨時間之增加而增加。測試位置離進料口 50cm 處。

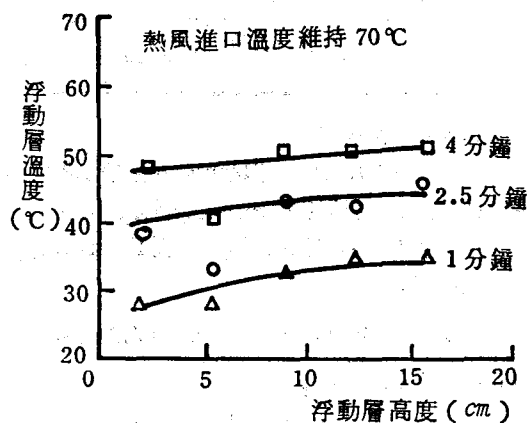


圖19 浮動層溫度分佈

4. 靜置和化時，稻穀溫度變化之情形：將受熱風乾燥後之稻穀靜置於多孔網板上和化，如圖20所示稻穀溫度逐次降低，中心部份降低較慢。當稻穀中熱量往外傳時，會有少部分水汽隨之蒸發出來，若用室溫空氣吹浮冷卻，則溫度降低均勻。

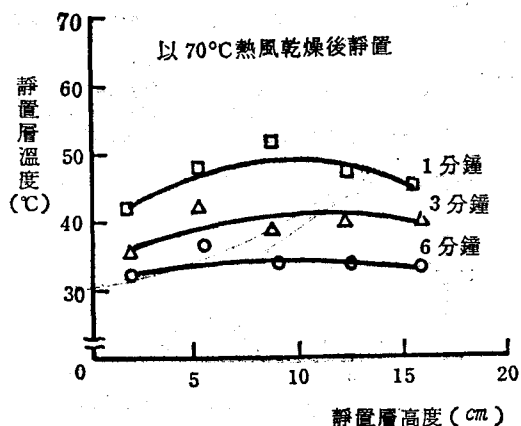


圖20 靜置和化時之溫度變化情形

5. 多孔網板特性測定結果：

多孔網板之選用，經實驗觀察其浮動情況，選取 15mm×2.5mm 孔板。

6. 出料率：全開時，最大出料率為 2500kg/

hr。

| 板 之 形 式 | 結 果 |
|-----------------------------------|-----|
| 錯 孔徑 4mm ϕ 列 方 式 | 可 |
| 錯 孔徑 6mm ϕ 列 方 式 | 良 好 |
| 長形孔15mm \times 2.5mm 錯 列 方 式 | 甚 佳 |

7.靜置時高度15cm:

浮動高度 30.5cm, 即浮動時為近乎二倍之高度, 此可作為浮動層乾燥機高度設計之參考。

8.風壓: 靜壓168mmA_q, 總壓171mmA_q。

9.風速:

$$V = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{\rho_a}} = \sqrt{\frac{2 \times 9.8 \times 3}{1.11}} = 7.2 \text{ m/sec}$$

(二)乾燥特性實驗結果:

1.乾燥過程中未加以和化之情況:

如圖 21 所示, 當 $M_0=24\%$, 熱風溫度維持 60°C, 熱風速度為 1.8m/sec時, 經20分鐘後, 含水量降至13.3%, 其平均乾燥率為0.54%/分, 但胴裂率則高達38%。當熱風溫度提高至80°C時, 胴裂率更高, 在實際應用上不足採用。

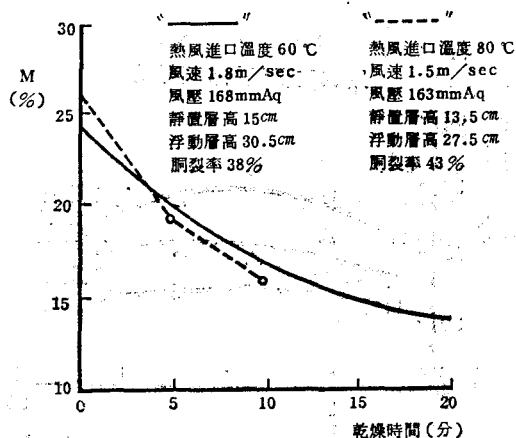


圖21 乾燥過程中未加以控制之乾燥曲線

從稻穀乾燥後發芽之情況觀之, 以60°C熱風連續乾燥, 雖有少數發芽之穀子, 但已可見其發芽困難之情形 (須平常穀子之二、三倍浸水時間), 若以80°C熱風連續乾燥, 則嚴重地損害其發芽率。

2.根據乾燥控制曲線乾燥之情況:

如圖22所示, $M_0=26.4\%$, 起始熱風溫度採取80°C之高溫, 但為了顧及稻穀之發芽率, 故需維持出口溫度在45°C以下, 即當溫度達45°C左右, 即適當降低出口溫度。根據以上所論持續乾燥5分鐘, 令其和化2小時後, 再繼續乾燥, 但此時乾燥時間則縮短為3分鐘, 和化後再加以乾燥, 詳細情況見圖22, 直至含水量達13.2%為止。若不計和化之時間, 則其平均乾燥率為0.88%/分, 胴裂率為13%而已, 又因稻穀溫度未超過45°C, 故其發芽情況相當良好。

因所消耗燃料 0.52 kg, 故其乾燥熱效率 η_d 為:

$$\eta_d = \frac{(13.7 \times 0.65 \times 4) \times (26.4 - 13.2) \% \times 633}{0.52 \times 11070} = 51.7\%$$

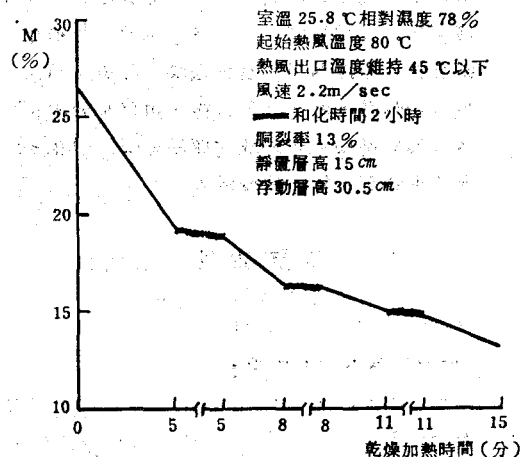


圖22 根據乾燥控制理論乾燥之乾燥曲線

八、結 論

(一)本文探究穀類乾燥之特性, 從而研究出一套控制乾燥之準則, 據此準則, 可以擬定適當之乾燥溫度, 乾燥時間, 和化時間, 而維持胴裂在其水平以下。

(二)本文以穀物乾燥理論與浮動層理論互相配合所研製之環流型浮動層穀物乾燥機, 由於稻穀性質與浮動層特性之密切配合, 故其性能極佳, 其優點如下:

1.乾燥速率高: 由乾燥實驗結果, 可看出開始5分鐘之乾燥速率高達1.44%/分, 以後雖然乾

燥速率大幅下降，但仍為其他機種所不及⁽¹⁸⁾

2. 乾燥時間短：若不計和化之時間，吾人可以在總加熱時間 15 分鐘內將 26.4% 之稻穀乾燥至 13.2%，若用於搶救而控制稻穀在乾燥機中之滯留時間為 5 分鐘，則經一次乾燥 (one pass)，可將水含量 28.3% 之濕穀降至 18.6% 之水含量。

3. 胴裂率低：由於(1)浮動層中溫度均勻，(2)保持稻穀溫度 45°C 以下，(3)加熱時間短，(4)經適當和化程序，(5)浮動情況極佳。故胴裂率低，約 13% 左右。

4. 連續操作：由於在浮動層中稻穀具流動之特性，故其進出料甚為容易，吾人可以適當設計環流道之長度，使稻穀滯留時間恰當，而一面進料一面出料，操作起來甚為便捷。亦可將其與傳統循環式乾燥機組合運用，而成兩段式乾燥機使用。亦即先將高水含量之濕穀，先經由本研究之「環流型浮動層乾燥機」乾燥，將水含量於短時間內降至 18% 以後，再將稻穀直接排放至傳統循環式乾燥機內繼續乾燥，以縮短乾燥所需時間，降低乾燥成本。

符號說明

$A_{o,r}$: 熱風分配板上小孔之面積 (cm^2)
 A_t : 浮動層乾燥機之總面積 (m^2)
 a_m : 質傳之有效面積 (cm^2)
 C_d : 熱風分配板之孔係數
 $C_{p,a}$: 熱風之濕潤比熱 ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)
 $C_{p,g}$: 稻穀之比熱 ($\text{cal/g}^\circ\text{C}$)
 C : 穀類之常數
 D : 穀類之擴散係數 (cm^2/sec)
 d_t : 浮動層之等值直徑 (cm)
 $F_{r,mf}$: 起始浮動時之 Froude $\text{No} = \frac{u_{mf}^3}{d_t \cdot g}$
 H : 空氣濕度 (kg/kg air, \%)
 IP : 所需馬力 (IP)
 h_g : 熱風與穀類間之熱傳係數 ($\text{cal/sec} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)
 K_g' : 熱風與穀粒之質傳係數 ($\text{g/sec} \cdot \text{cm}^2$)
 K_g : 穀粒內之熱傳係數 ($\text{cal/sec} \cdot \text{cm} \cdot ^\circ\text{C}$)
 L_b : 浮動時高度 (cm)
 L_r : 浮動層靜置高度 (cm)
 L_{mf} : 起始浮動高度 (cm)

L : 水分之蒸發潛熱 (kcal/kg)
 a : 浮動層單位體積之穀粒表面積 ($1/\text{cm}$)
 M : 穀類之水含量 (%)
 $M_{a,v}$: 穀類平均水含量 (%)
 M_b : 穀類平衡水含量 (%)
 M_r : 最後水含量 (%)
 M_o : 起始水含量 (%)
 $N_{o,r}$: 熱風分配板上每單位面積之孔數 ($1/\text{cm}^2$)

$N_{u,g} = \frac{d_g \cdot h_g}{k_a}$, Nusselt No.

n : 穀類常數

P_a : 熱風之蒸汽壓

P_g : 穀粒內之蒸汽壓

ΔP_b : 熱風經浮動層之壓力降

ΔP_d : 經熱風分配板之壓力降

Q_a : 所需熱風量 (m^3/min)

q : 所需熱量 (kcal/hr)

q_1 : 稻穀溫度增高所需熱量 (kcal/hr)

q_2 : 稻穀中水分蒸發所需熱量 (kcal/hr)

R : 穀粒之等值半徑 (cm)

r : 穀粒在半徑方向之距離 (cm)

$R_{o,g} = \frac{d_g \rho_a u_o}{\mu}$, Reynolds No.

$R_{o,g,mf} = \frac{d_g \rho_a u_{mf}}{\mu}$, Reynolds No.

d_g : 穀粒之直徑 (cm)

$R_{o,g,t} = \frac{d_g \rho_a u_t}{\mu}$, Reynolds No.

S : 穀粒之表面積 (cm^2)

T : 溫度 ($^\circ\text{C}$)

T_a : 熱風溫度 ($^\circ\text{C}$)

$T_{a,i}$: 熱風進口溫度 ($^\circ\text{C}$)

T_o : 熱風出口溫度 ($^\circ\text{C}$)

T_g : 稻穀內之溫度 ($^\circ\text{C}$)

T_o : 稻穀外表溫度 ($^\circ\text{C}$)

T_r : 室溫 ($^\circ\text{C}$)

t : 時間 (sec)

u_{mf} : 起始浮動速度 (m/sec)

u_o : 浮動層乾燥機操作時之熱風速度 (m/sec)

$u_{o,r}$: 經熱風分配板小孔之風速 (m/sec)

u_t : 終端速度 (m/sec)

W : 單位時間稻穀處理量 (kg/hr)

α_g : 稻穀之熱擴散係數 (cm^2/sec)

ρ_g : 穀類之密度 (g/cm^3)

ρ_a :熱風之密度 (g/cm^3)

ϵ_m :靜置時之孔隙比

ϵ_{mf} :起始浮動時之孔隙

ϕ_s :穀粒之球狀度

η :送風機之效率 (%)

η_d :乾燥之熱效率 (%)

誌 謝

本研究承行政院國家科學委員會經費補助，成大機械研究所陳朝光教授提供寶貴之資料與斧正，本研究始能順利完成，謹致由衷之謝忱。

參考文獻

1. Daizo Kuni & Octave Levenspiel "Fluidization Engineering" October 1968.
2. Carl. W. Hall "Dry Farm Crops", 1971.
3. Frederick A ZENZ and Donald F. OTHMER "Fluidization and Fluid-particle systems" Reinhold Chemical Engineering series, 1960.
4. J. F. Davidson & D. Harrison. "Fluidized Particles" 1963.
5. Clyde ORR, JR. "Particulate Technology" 1966.
6. Harry W. Loseecke "Drying and Dehydration of Foods" 1955.
7. Aurand Woods, "Food Chemistry" 1973.
8. Shu-Tang Chu and Andrew Hustrulid "Numerical Solution of Diffusion Equations" Trans. of the ASAE (1968) pp. 705-708.
9. A. Husain; C. S. Chen. J. T. Clayton "Simultaneous Heat and Mass Diffusion in Biological Materials" J. Agric. Eng. Res. (DEC. 1973) Vol. 18, No. 4, pp. 343-354.
10. James H. Young "Simultaneous Heat and Mass Transfer in a Porous Hygroscopic Solid" Trans. of the ASAE (1969) pp.720-725.
11. F. T. Wratten, W. D. Poole, J. L. Chesness, S. Bal and V. Ramarao "physical and thermal properties of Rough Rio" 1969, Trans. of the ASAE. pp. 801-803.
12. S. S. Zabrodsky "Hydrodynamical & Heat Transfer in Fluidized Bed" The M. I. T. Press, 1966.
13. J. F. Davidson; R. Clift; D. Harrison "Fluidization" Academic Press Inc. (London) Ltd. 1985.
14. 梁繼新，稻穀乾燥擴散係數之研究，1976. 1.
15. 陳貽倫，稻穀乾燥之研究，1974. 9.
16. 鄔清標，水稻間歇通風乾燥法之研究。
17. 陳朝光，穀類乾燥機之特性及設計改良研究，1975. 11.
18. 六十四年度農機具試驗，研究彙報，1975，臺灣省政府農林廳編印。
19. 汪呈因，稻作學與米，1974. 8.
20. 庄司英信等著，農產機械學，朝倉書店。
21. 川下研介著，熱傳導論，オーム社。
22. 村上敏雄，乾燥，化學工場第19卷第11號。
23. 移動式浮動層乾燥機試驗報告書，臺大農業機械研究中心，1974. 12.
24. 陳貽倫、孔濟，溫差對糙米胴裂之影響，中國農業工程學報第25卷第3期，民國68年9月。
25. 張漢聖、顏欽崇，圓筒式太陽乾燥機之研究，中國農業工程學報第27卷第2期，民國70年6月。
26. 陳貽倫，稻穀之吸濕、胴裂與碎米，中國農業工程學報第29卷第2期，民國72年6月。
27. 馮丁樹，小型稻穀乾燥機之改善及太陽能源之利用研究，中國農業工程學報第29卷第4期，民國72年11月。
28. 李廣武，水稻乾燥與碾米率及稻米品質之關係，中國農業工程學報第30卷第2期，民國73年6月。
29. 方煒、馮丁樹，靜置式厚層玉米粒乾燥過程中最適風量率及最佳操作條件之探討，中國農業工程學報第31卷第4期，民國74年12月。
30. 蕭介宗、李世宗，乾燥溫度與輸送設備對省產玉米破碎率之關係，中國農業工程學報第32卷第3期，民國75年9月。
31. 陳俊明、張世豐、陳朝光，氣流式乾燥裝置之特性研究，中國農業工程學報第32卷第3期，民國75年9月。

