

# 主要果蔬預冷設備之研製和應用 (IV)

臺灣五種球形水果之物理性質和最佳預冷風速之預測

## Design and Application of Precooling Systems for Major Fruits and Vegetables (IV)

### Physical Properties and Predicted Air Velocities of Optimum Precooling Five Spherical Fruits in Taiwan

前臺大農工研究所研究生

臺大農機系教授兼主任

周 文 金

蕭 介 宗

Wern-Jim Jow

Jai-Tsung Shaw

#### 摘 要

本文以通風試驗槽探討臺灣五種近似球形水果即葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之強風預冷曲線，利用電腦預測上列五種水果之最佳預冷風速，並建立上列五種水果之熱性質資料包括熱擴散係數，熱傳導係數，比熱及密度做為臺灣球形水果強風預冷設計之參考。

預冷之風速 ( $V$ , m/s) 增加則冷卻速率增加，但有一極限值，超過此值則冷卻速率增加極微，五種水果在不同風速下半冷時間 ( $t$ , min) 之幕次迴歸方程式如下：

$$\text{葡 萄 } t = 10.3171 V^{-0.4023}$$

$$\text{荔 枝 } t = 15.237 V^{-0.3446}$$

$$\text{草 莓 } t = 21.2474 V^{-0.3099}$$

$$\text{蘋 果 } t = 45.0139 V^{-0.3015}$$

$$\text{哈 蜜 瓜 } t = 94.5483 V^{-0.3061}$$

預測葡萄、荔枝、草莓、蘋果和哈密瓜之最佳預冷風速各自為 0.8~1.0, 0.9~1.2, 1.1~1.4, 2.0~2.4 和 3.5~4.3 m/s。

測定葡萄、荔枝、草莓、蘋果和哈密瓜之密度各自為 1.06, 1.1, 0.89, 0.79 和 1.02 g/cm<sup>3</sup>。

測定葡萄、荔枝、草莓、蘋果和哈密瓜之比熱各自為 3.66, 3.77, 4.02, 3.77 和 3.64 J/g·°C。

預估葡萄、荔枝、草莓、蘋果和哈密瓜之熱傳導係數各為 0.57, 0.44, 0.40, 0.55 和 0.6 w/m·°C。

預估葡萄、荔枝、草莓、蘋果和哈密瓜之熱擴散係數各為  $0.529 \times 10^{-4}$ ,  $3.82 \times 10^{-4}$ ,  $4.02 \times 10^{-4}$ ,  $6.61 \times 10^{-4}$  和  $5.86 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/hr。

## ABSTRACT

For basic information of designing a forced-air precooling system of spherical fruits, the paper is to study the forced-air cooling curve of the five apparent spherical fruits in Taiwan, namely grape, litchi, strawberry, apple and cantaloupe through an experimental ventilation chamber, to figure out the optimum air velocities for precooling the above mentioned five kinds of fruits, and to establish their physical properties including thermal diffusivity, thermal conductivity, specific heat and density.

As the air velocity of forced-air precooling is increased, the cooling speed is also increased, however, there is a high limit. Beyond this high limit, the cooling speed will only increase very slowly.

The power regression equations of the half cooling time ( $t$ , min) of these five kinds of fruits under different air velocity ( $V$ , m/s) are as follows:

$$\text{Grape} \quad t = 10.3171 V^{-0.4028}$$

$$\text{Litchi} \quad t = 15.2370 V^{-0.3446}$$

$$\text{Strawberry} \quad t = 21.2474 V^{-0.3099}$$

$$\text{Apple} \quad t = 45.0139 V^{-0.3015}$$

$$\text{Cantaloupe} \quad t = 94.5483 V^{-0.3061}$$

The predicted air velocities of optimum precooling for grape, litchi, strawberry, apple and cantaloupe are respectively 0.8 to 1.0 m/s, 0.9 to 1.2 m/s, 1.1 to 1.4 m/s, 2.0 to 2.4 m/s and 3.5 to 4.3 m/s.

The measured densities of grape, litchi, strawberry, apple and cantaloupe are respectively 1.06, 1.1, 0.89, 0.79 and 1.02 g/cm<sup>3</sup>.

The measured specific heat of grape, litchi, strawberry, apple and cantaloupe are respectively 3.66, 3.77, 4.02, 3.77 and 3.64 J/g-°C.

The predicted apparent thermal conductivity of grape, litchi, strawberry, apple and cantaloupe are respectively 0.57, 0.44, 0.40, 0.55 and 0.6 w/m-°C.

The predicted apparent thermal diffusivity of grape, strawberry, litchi, apple and cantaloupe are respectively  $0.529 \times 10^{-4}$ ,  $3.82 \times 10^{-4}$ ,  $4.02 \times 10^{-4}$ ,  $6.61 \times 10^{-4}$  and  $5.68 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/hr.

### 一、前 言

果蔬預冷之功能乃在最短時間內，移除果蔬之田間餘熱 (Field Heat)，以抑制其呼吸及敗壞，維持果蔬原有之鮮度和品味。因此，預冷應在數小時甚至數分鐘之內完成。常用預冷方法為水冷、風冷、真空冷卻及加冰接觸冷卻四種，各種方法均有其適用範圍，目前水果最常用的預冷方式是水冷；

風冷則適用在一些接觸水容易造成腐爛或水傷之水果。

果蔬強風預冷設備之設計與風速，水果之密度，比熱，熱傳導係數，對流熱傳導係數等有關，故本文之目的在探討葡萄、荔枝、草莓、蘋果和哈密瓜等 5 種高價格之球形水果之物理性質和最佳預冷風速，作為設計農用強風預冷設備之參考。本文主要目的如下：

1.測定葡萄、荔枝、草莓、蘋果、哈密瓜等5種水果之強風預冷曲線。

2.預估上列5種水果之最佳預冷風速。

3.測定上列5種水果之密度和比熱。

4.利用解析法與數值法預估上列5種水果之熱傳係數和熱擴散係數。

## 二、文獻探討及公式之推演

### 2.1 有關球形農產品熱傳公式

根據陳(1984)，楊(1984)，和郭(1986)的研究論文，呼吸熱對果蔬在熱傳分析上雖有影響但影響不顯著。根據郭和蕭(1987)，青蔥呼吸熱僅佔預冷負荷之0.9~2.2%。為便利球形水果之熱傳分析，下列基本假設是必要的：

- (1)不考慮呼吸熱即水果本身無熱源產生。
- (2)球形水果視為均質球體。
- (3)球形水果的熱性質不隨溫度而變。
- (4)外界溫度維持固定。

基於上述之假設，應用數學解析法來預測水果內部溫度的變化。

#### 2.1.1 球形水果熱傳之解析法公式

現考慮球形水果之熱傳僅為半徑(r)的函數

$$\frac{T(r, t) - T_0}{T_1 - T_0} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \left( \frac{\sin \beta_n - \beta_n \cos \beta_n}{\beta_n - \sin \beta_n \cos \beta_n} \right) \left( e^{-\frac{(\beta_n^2)(\alpha)(t)}{R^2}} \right) \left( \frac{\sin \left( \beta_n \frac{r}{R} \right)}{\beta_n \frac{r}{R}} \right) \right] \dots\dots\dots(2)$$

式中  $\beta_n$  由一含倍夏數 (Biot Number) 超越函數之分離係數所定義。根據堀部和中村(1977)，式(2)之近似式為  $n = 1$  時，可用下式 (2a) 代表之：

$$\frac{T(r, t) - T_0}{T_1 - T_0} = 2 \left( \frac{\sin \beta_1 - \beta_1 \cos \beta_1}{\beta_1 - \sin \beta_1 \cos \beta_1} \right) \left( \frac{\sin \left( \beta_1 \frac{r}{R} \right)}{\beta_1 \frac{r}{R}} \right) \left( e^{-\frac{(\beta_1^2)(\alpha)(t)}{R^2}} \right) \dots\dots\dots(2a)$$

#### 2.1.2 球形水果數值分析法公式

Baird 和 Gaffney (1976) 應用有限差分法解均質球體以計算散裝果蔬之熱傳現象。如圖 1 沿此球體半徑，自中心至表層取  $N$  個等距離  $\Delta r$  之節點 (node)，節點 1 為球體之中心而節點 1 與節點  $N$  之球體厚僅及其他球體之半或  $0.5\Delta r$ ，其餘為中間節點之厚為  $\Delta r$ 。表面節點即表層，此層與外界預冷空氣為對流熱傳關係與相鄰內層則為熱傳導。中心節點也只有一个，即含節點 1 之中心層，其熱傳屬單向熱傳，即熱傳只發生於含有節點 2 之球體間。中間節點之熱傳為雙向傳導方式，例如含節點 3 之球體與含節點 2 和 4 之球體均有熱傳發生。

而與角度無關故以球體之熱傳導溫度 (T) 方程式與時間 (t) 表達如下：

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \dots\dots\dots(1)$$

最初條件  $T(r, 0) = T_1$

邊界條件  $T(0, t) = \text{有限值}$

$$-\left( K \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=R} = h(T_s - T_0)$$

式中 t : 時間 (hr)

r = 離球體中心距離 (m)

R : 球體半徑 (m)

T : 水果溫度 (°C)

$T_1$  : 最初水果溫度 (°C)

$T_s$  : 水果表面溫度 (°C)

$T_0$  : 預冷空氣溫度 (°C)

K : 水果之熱傳導係數 (Thermal conductivity, w/m-°C)

h : 水果表面之對流熱傳係數 (Convection heat transfer coefficient, w/m<sup>2</sup>-°C)

根據周(1986)，經由解析法運算求出下列級數形式：

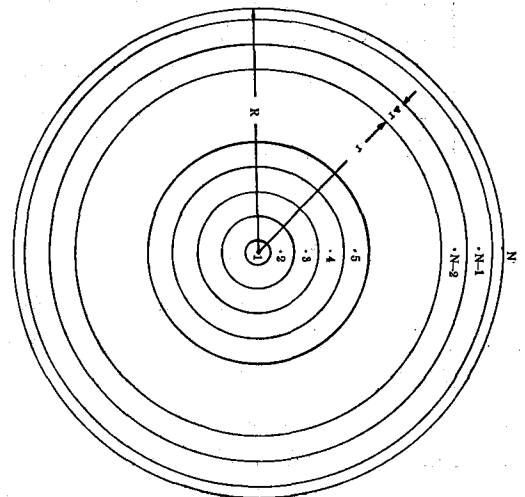


圖 1 球形水果冷卻模擬之微分球體

由上述 4 項基本假設，球形水果熱傳來自果實之外的流體和各節點之溫差，故熱傳計算應由最外層開始，根據能量平衡 (energy balance)，表面節點 (n) 薄壳球體之熱傳公式如下：

$$Q_n(4\pi R^2) + Q_{n-1}[4\pi(R - \frac{\Delta r}{2})^2] = (\rho)(C_p)(\frac{4}{3}\pi)[R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3] (\frac{T_n^{m+1} - T_n^m}{\Delta t}) \dots\dots\dots(3)$$

$$Q_n = h(T_n^m - T_n^m) \dots\dots\dots(3a)$$

$$Q_{n-1} = K(\frac{T_{n-1}^m - T_n^m}{\Delta r}) \dots\dots\dots(3b)$$

h, K, R 之定義同前面所述。

式中， $Q_n$ ：預冷空氣傳給最外層球體水果之單位面積對流熱傳導量 (w/m<sup>2</sup>)

$$T_n^{m+1} = \frac{(3\alpha)(\Delta t)(R - \frac{\Delta r}{2})^2}{(\Delta r)[R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3]} (T_{n-1}^m) + \frac{(3R^2)(h)(\alpha)(\Delta t)}{K[R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3]} (T_n^m) + \{1 - \frac{(3\alpha)(\Delta t)}{[R^3 - (R - \frac{\Delta r}{2})^3]} \times [\frac{(R - \frac{\Delta r}{2})^2}{\Delta r} + \frac{(R^2)(h)}{K}]\} (T_n^m) \dots\dots\dots(4)$$

式中  $\alpha$ ：果實之熱擴散係數 (=K/( $\rho$ )(C))

應用能量平衡得，中心節點 1 薄壳球體之熱傳公式如下：

$$Q_2[4\pi(\frac{\Delta r}{2})^2] = (\rho)(C_p)(\frac{4}{3}\pi)(\frac{\Delta r}{2})^3 \frac{(T_1^{m+1}) - (T_1^m)}{\Delta t} \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_2 = K \frac{T_2^m - T_1^m}{\Delta r} \dots\dots\dots(5a)$$

將式(5a)代入式(5)得：

$$T_1^{m+1} = \frac{(6\alpha)(\Delta t)}{(\Delta r)^2} (T_2^m) + \{1 - \frac{(6\alpha)(\Delta t)}{(\Delta r)^2}\} (T_1^m) \dots\dots\dots(6)$$

應用能量平衡得，中間節點 (i) 薄壳球體之熱傳公式如下：

$$Q_{i-1}[4\pi(r - \frac{\Delta r}{2})^2] + Q_{i+1}[4\pi(r + \frac{\Delta r}{2})^2] = (\rho)(C_p)(\frac{4}{3}\pi)[(r + \frac{\Delta r}{2})^3 - (r - \frac{\Delta r}{2})^3] \frac{(T_i^{m+1}) - (T_i^m)}{\Delta t} \dots\dots\dots(7)$$

$$Q_{i-1} = K \frac{(T_{i-1}^m) - (T_i^m)}{\Delta r} \dots\dots\dots(7a)$$

$$Q_{i+1} = K \frac{(T_{i+1}^m) - (T_i^m)}{\Delta r} \dots\dots\dots(7b)$$

$Q_{n-1}$ ：含 n-1 節點球體傳給含 n 節點球體之單位面積熱傳導量 (w/m<sup>2</sup>)

$\Delta r$ ：節點半徑厚度 (m)

$\rho$ ：水果密度 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_p$ ：水果比熱 (kJ/kg-°C)

$T_n^m$ ：含 n 節點之薄壳球體在 m 時階之品溫 (°C)

$T_n^m$ ：預冷空氣在 m 時階時之溫度 (°C)

$\Delta t$ ：時階間隔 (s)

$T_n^{m+1}$ ：含 n 節點之薄壳球體在 m +  $\Delta t$  時階之品溫 (°C)

$T_{n-1}^m$ ：含 n-1 節點之薄壳球體在 m 時階之品溫 (°C)

式中 (3a)，(3b) 代入式(3)得：

式中  $i$  為節點序數， $1 < i < N$ ，將式(7a)，(7b) 代入式(7)中得：

$$T_i^{m+1} = \left\{ 1 - \frac{(3\alpha)(\Delta t) \left[ \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2 + \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2 \right]}{(\Delta r^2) \left( 3r^2 + \frac{\Delta r^2}{4} \right)} \right\} (T_i^m) \\ + \frac{(3\alpha)(\Delta t) \left( r - \frac{\Delta r}{2} \right)^2}{(\Delta r^2) \left( 3r^2 + \frac{\Delta r^2}{4} \right)} (T_{i-1}^m) + \frac{(3\alpha)(\Delta t) \left( r + \frac{\Delta r}{2} \right)^2}{(\Delta r^2) \left( 3r^2 + \frac{\Delta r^2}{4} \right)} (T_{i+1}^m) \dots \dots \dots (8)$$

式中  $r = (i - 1)(\Delta r)$

上述式(4)，(6)，(8)三式為計算球形水果冷卻時果實內溫度變化之有限差分式子，寫成電腦程式計算之，可解得果實溫度 (T) 為半徑 (r) 和時間 (t) 的函數。

### 2.2 品溫半冷時間之估算

農產品冷卻速率可用品溫半冷時間表示，即農產品與冷卻媒體間之溫差為最初溫差之半時所需的時間。利用牛頓冷卻定律 (Newton's Law of Cooling) 推導球形農產品溫度與時間關係時，須假設球形農產品在預冷時內部溫度梯度可忽略，即在任何時間視中心溫度與表面溫度相等。

根據牛頓冷卻定律知農產品的冷卻速率與冷卻媒體間的溫度差成正比，即農產品熱量傳給冷卻媒體的傳熱速率與農產品和冷卻媒體間的溫度差成正比，即：

$$\frac{dQ}{dt} = C(T - T_0) \dots \dots \dots (9)$$

式中，Q：球形農產品被預冷空氣帶走的熱量(kJ)

t：時間 (小時)

C：冷卻係數 (cooling coefficient)

T：球形農產品之品溫 (°C)

T<sub>0</sub>：預冷空氣之溫度 (°C)

將(9)式積分可得下式：

$$2.303 \log \frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = C \cdot t \dots \dots \dots (10)$$

T<sub>1</sub> = 農產品之初溫 (°C)

當 (T - T<sub>0</sub>) 為 (T<sub>1</sub> - T<sub>0</sub>) 的一半時，即球形農產品與冷卻媒體間之溫差降為最初溫差的一半時所需之時間，以 Z 表示，將 t = Z 代入式(10)得：

$$2.303 \log \frac{1}{2} = C(Z)$$

$$C = \frac{2.303 \log \frac{1}{2}}{Z} = \frac{0.693}{Z} \dots \dots \dots (11)$$

應用式(11)求冷卻常數 (C) 時需知道農產品之品溫半冷時間，再利用式(10)可估算任意時間下農產品的溫度。

### 2.3 農產品的熱性質

為進行農產品預冷理論分析，某些農產品熱性質需先知道。國外農產品之熱性質可參考 Mohsenin (1980), ASAE Standard (1987), 和 ASHRAE Fundamentals (1981)，熱性質常受溫度和含水率的影響。

#### 2.3.1 農產品的熱擴散係數 (α)

引用 Smith 等 (1968) 處理暫態熱傳的方法，其基本方程式如下：

$$U = j e^{-\frac{2.303}{f} t} \dots \dots \dots (12)$$

where U：溫度比 (Temperature ratio)

j：直線在 t = 0 之截距，如圖 2 所示 j = 2.0

f：斜率之倒數

t：時間

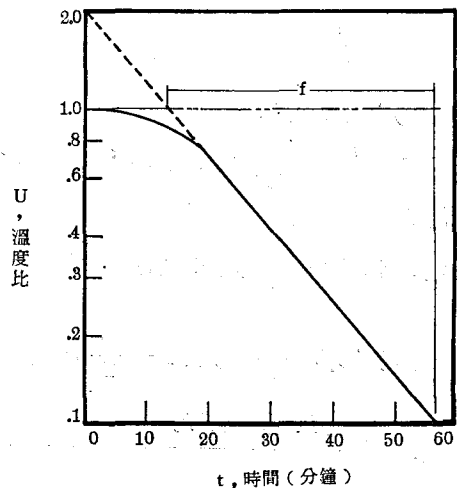


圖 2 暫態熱傳圖 (Smith, 1968)

根據式(2)之一次根 (n = 1) 解析解及式(12)，根據周 (1986) 推演得式(13)及式(14)：

$$\log \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{f} (t_2 - t_1) \dots\dots\dots(13)$$

$$\frac{2.303}{f} = \frac{(\beta_1)^2(\alpha)}{R^2} \dots\dots\dots(14)$$

式(14)中 f 可由式(13)決定之，故可決定熱擴散係數 (α)。

### 2.3.2 農產品的比熱

農產品的比熱，可利用比熱儀來測得，或利用經驗公式求得。ASHRAE (1981) 引用 Siebels (1892)，可由下列式子估算果蔬在凍結點之上和凍結點之下之比熱：

$$C_p = 0.0335M + 0.84 \text{ (在凍結點之上)}$$

$$C_p = 0.0126M + 0.84 \text{ (在凍結點之下)}$$

where  $C_p$ ：比熱值，(kJ/kg-°C)；  
M：含水率，(％，濕基)；  
0.84：為測試樣本為固體狀態下的基數。

又根據 Charm 氏 (1977)，提供之實驗公式估計農產品的比熱值如下：

$$C_p = 0.5X_F + 0.3X_S + 1.0X_M$$

where  $X_F$ ：農產品所含脂肪量比；  
 $X_S$ ：農產品所含固體物比；  
 $X_M$ ：農產品所含之含水率。

農產品之比熱可用比熱儀測定之，測定時先將農產品搗碎，裝入不銹鋼容器內，加熱至70°C，然後將此容器投入定量、定溫之水槽內，此水槽周圍空氣之外層有定溫之水流通以維持固定之環境條件，在一定時間過後，測定水槽溫升，來計算出農產品之比熱值，即利用農產品與水槽達到熱平衡時，假設沒有熱損失，則農產品所放出的熱等於水槽所吸收的熱，應用熱平衡公式如下：

$$(W_o \times C_o + W_s \times C_s) \times (T_h - T_f) = J \times (T_f - T_i) \dots\dots\dots(15)$$

where  $W_o$ ：不銹鋼容器重，(g)；  
 $W_s$ ：農產品樣本重，(g)；  
 $C_o$ ：不銹鋼容器之比熱，(J/g-°C)；  
 $C_s$ ：農產品樣品之比熱，(J/g-°C)；  
J：水之熱當量，(J/°C)；  
 $T_h$ ：農產品裝入不銹鋼容器內加熱後的溫度，(°C)；  
 $T_i$ ：水槽內水之初溫，(°C)；  
 $T_f$ ：水槽內水之末溫，(°C)。

上式除  $C_s$  外，其他變數均為已知或可直接測得，代入式(15)中可求得農產品之比熱值 ( $C_s$ )。

### 2.3.3 農產品的對流熱傳係數 (h) 之估算

Mohsenin (1980) 引用 McAdams (1954)，球體在空氣中時 Nu (Nusselt number) 與 Re (Reynolds number) 之關係如下式：

$$Nu = \frac{hD}{K_r} = 0.37 (Re)^{0.6}$$

當  $17 < Re < 70,000$ ，對流熱傳係數 (h)，可由上式整理之得式(16)來估算之。

$$h = 0.37 \frac{K_r}{D} (Re)^{0.6}$$

$$\text{或 } h = 0.37 \frac{K_r}{D} \left( \frac{\rho VD}{\mu} \right)^{0.6} \dots\dots\dots(16)$$

where h：對流熱傳係數 (w/m<sup>2</sup>-°C)  
D：球體直徑 (m)  
 $K_r$ ：空氣熱傳係數 (w/m-°C)  
 $\rho$ ：空氣密度 (kg/m<sup>3</sup>)  
V：空氣流速 (m/s)  
 $\mu$ ：空氣黏性係數 (kg/m-s)

從 Mohsenin (1980)，空氣之  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $K_r$  值受溫度的影響如表一。將表一之資料利用二次多項式 (Second degree polynomial) 迴歸方法求得下式 (16a)，(16b) 和 (16c)：

表一 空氣之密度、熱傳導係數和黏性係數在不同溫度下之值 (Mohsenin, 1980)

溫度 (°C)	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	熱傳導係數 (w/m-°C)	黏性係數 (kg/m-s)
-123.33	1.7684	0.0137	1.0376 × 10 <sup>-5</sup>
-23.33	1.4128	0.0223	1.6109 × 10 <sup>-5</sup>
26.67	1.1774	0.0263	1.8587 × 10 <sup>-5</sup>
126.67	0.8826	0.0336	2.2718 × 10 <sup>-5</sup>

密度 ( $\rho$ ) 與溫度 (T) 之關係：

$$\rho = 1.2998 - 3.5948 \times 10^{-3}T + 2.0267 \times 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots(16a)$$

熱傳導係數 ( $K_r$ ) 與溫度 (T) 之關係：

$$K_r = 0.024194 + 7.976 \times 10^{-5}T - 4.3333 \times 10^{-6}T^2 \dots\dots\dots(16b)$$

黏性係數 ( $\mu$ ) 與溫度 (T) 之關係：

$$\mu = 1.7299 + 4.9752 \times 10^{-3} T - 5.5067 \times 10^{-6} T^2 \dots\dots\dots(16c)$$

$\mu$ 之單位為  $10^{-5}$  kg/m-s; T為°C;  $\rho$  和  $K_r$  如前所述之單位。

將式 (16a), (16b), (16c) 之空氣密度 ( $\rho$ ), 熱傳導係數 ( $K_r$ ) 和黏性係數 ( $\mu$ ) 的估算值與空氣之流速 ( $V$ ) 和球體之直徑 ( $D$ ) 代入式(16)中, 即可預估在任意溫度 ( $T$ ) 和任意空氣流速 ( $V$ ) 下之對流熱傳導係數 ( $h$ )。

### 2.3.4 農產品的熱傳導係數 (K)

萬與蕭 (1984), 利用圓柱體中心線熱源法 (Line heat source method) 測定台農 7 號稻穀、洋蔥、胡蘿蔔和甘藍的熱傳導係數。

本文所估算之葡萄、草莓、荔枝、蘋果與哈密瓜是利用測定之密度 ( $\rho$ ), 和比熱 ( $C_p$ ) 及估算之熱擴散 ( $\alpha$ ), 可由熱傳導係數 ( $K = (\alpha)(\rho)(C)$ ) 計算之或利用式(4), (6)和(8)求出熱傳導係數 ( $K$ ), 再利用  $\alpha = \frac{K}{\rho C}$  求得熱擴散係數 ( $\alpha$ )。因為上述 5 個水果顆粒大, 利用萬與蕭 (1984) 之熱傳導係數測定方法, 顆粒間之空隙大, 容易造成量測上之誤差。

## 三、實驗方法與步驟

### 3.1 實驗用之水果之來源

產地在苗栗卓蘭的葡萄 (巨峰品種) 和產地在高雄旗山的荔枝 (黑葉品種), 在菓園採收後, 立即當日運回實驗室進行實驗。

試驗用之草莓、蘋果 (五爪品種)、哈密瓜則來自採收後第二天之三重龍門水果批發商。

### 3.2 預冷實驗方法與儀器設備

本實驗係以球形水果置於風速 1.0 m/s 恆溫冷藏庫內的通風試驗槽內, 以冷藏庫設定的溫度為冷卻終極溫度, 及水果之起始溫度, 來測得各種水果內部的溫度變化, 以求得各種水果的冷卻曲線, 熱傳導係數和熱擴散係數。比熱則利用比熱儀測定, 本實驗所使用的主要儀器設備有:

- (1) 通風試驗槽, 如圖 3 所示。
- (2) 比熱儀 (Record Calorimeter) 如圖 4 所示。
- (3) 自動資料記錄器 (AUTO DATA TEN/5) 如圖 5 所示。

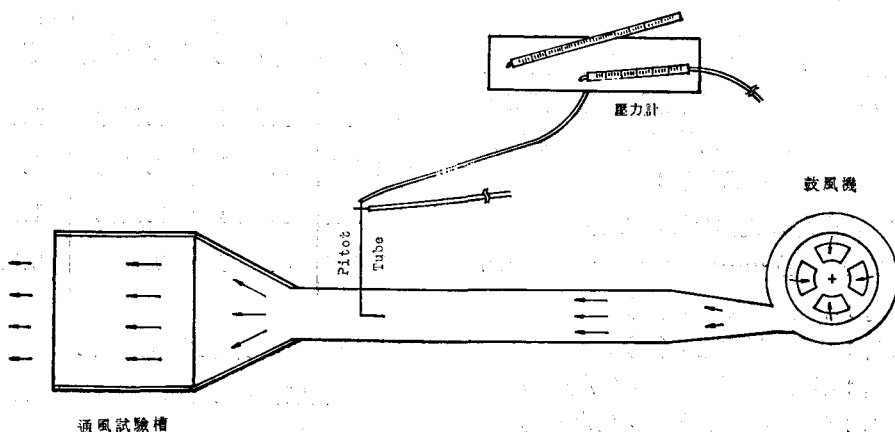


圖 3 通風試驗裝置示意圖

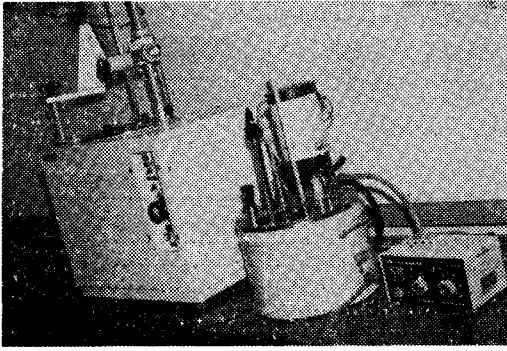


圖4 比熱儀

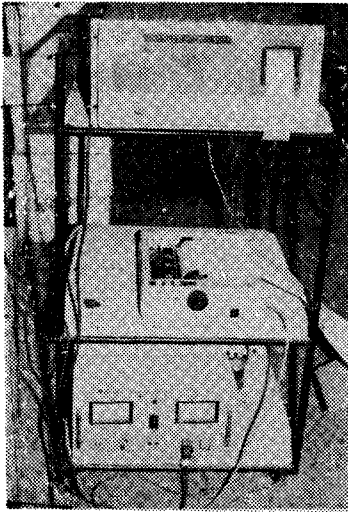


圖5 自動資料記錄器

### 3.3 物理性質之測定和估算

#### 3.3.1 含水率之測定

根據美國農業工程師之標準 (ASAES 358.1, 1987) 高含水率之農產品其含水率之測定，為在設定65°C之烤箱內烤72小時。用電子秤秤烤前與烤後的重量再應用濕基公式算出農產品之含水率(%, 濕基)。

#### 3.3.2 比熱之測定

用比熱儀測之，測定時先將待測試物搗碎，裝入不銹鋼容器內，加熱至70°C，然後將此不銹鋼容器投入定量、定溫之水槽內，經過一定時間後水槽的水與不銹鋼容器（包括容器內之待測物）達熱平衡，即溫度達一定值，此時讀取水槽的溫升，再應用式(15)計算出待測物之比熱值。不銹鋼容器重量 ( $W_c$ )，不銹鋼容器之比熱 ( $C_c$ ) 和水槽內水之熱當量 ( $J$ ) 為定值，待測物之重量 ( $W_s$ ) 可用電子秤測得，裝了待測物之不銹鋼容器加熱後的溫度 ( $T_s$ )

與水槽內水之初溫 ( $T_1$ ) 可用溫度計測得，至於水槽內水之末溫 ( $T_2$ ) 為水槽內水之初溫 ( $T_1$ ) 加上水槽內水的溫升。因此式(15)中僅剩待測物之比熱 ( $C_s$ ) 未知，將已知值代入式(15)，即可求出待測物之比熱 ( $C_s$ )。

#### 3.3.3 密度之測定

應用阿基米德原理，求測試物排開同體積水的體積，以電子秤測其重量，除以體積，即可求出測試物之密度。

#### 3.3.4 相等球半徑之測定

水果之尺寸並非完整的球形，以其  $x, y, z$  軸尺寸大小，以幾何平均相等徑 ( $=\sqrt[3]{(x \times y \times z)}$ ) 來表示其相等球半徑。

#### 3.3.5 熱傳導係數之估算

利用測得之水果之密度，相等球半徑，比熱和對流熱傳係數與假設之  $K$  值，代入式(4)，(6)，(8)中，可得不同  $K$  值時預測冷却曲線，再分別與實測預冷曲線比較，決定最吻合之熱傳導係數作為估算水果之近似熱傳導係數 ( $K$ )。

另一方法為利用 3.3.6 節所述，先求出熱擴散係數 ( $\alpha$ )，再利用  $K = (\alpha)(\rho)(C)$  之關係式，代入已知之  $\alpha$  和測定之密度 ( $\rho$ ) 和比熱 ( $C$ )，計算近似熱傳導係數 ( $K$ )。

#### 3.3.6 熱擴散係數 ( $\alpha$ ) 之估算

根據堀部與中川 (1977)，式(2)取  $n = 1$ ，則溫度比與時間之關係為：

$$\frac{T - T_s}{T_1 - T_s} = U = je^{-\beta_1^2 t} \dots \dots \dots (17)$$

將式(17)的冷却曲線繪於半對數紙上如圖2，現以式(12)來表示式(17)的冷却曲線。即將實測預冷曲線繪於半對數紙上如圖17，利用式(13)可求得  $f$  值。 $\beta_1$  值 (Biot Number) 由測得兩點的溫度 (如中心  $r = 0$  和中間點  $r = \frac{R}{2}$ ) 代入式(2)，簡化如下式

可求得  $\beta_1$ ：

$$\frac{\left(\frac{T - T_s}{T_1 - T_s}\right)_{r = \frac{R}{2}}}{\left(\frac{T - T_s}{T_1 - T_s}\right)_{r = 0}} = \frac{\sin(0.5 \beta_1)}{0.5 \beta_1} \dots \dots \dots (18)$$

將  $f, \beta_1$  值代入式(14)求值熱擴散係數值 ( $\alpha$ )

## 四、結果與討論

圖6是葡萄在初溫 18°C 置於 0°C 和預冷風速



1 m/s下，中心點溫度與預冷時間變化的情形。由圖可知半冷溫度為  $9^{\circ}\text{C}$  ( $=\frac{18-0}{2}$ )時，對應之預冷時間為10分。即半冷時間 ( $Z = \frac{10}{60}$ 時) 代入式(11)

，可求冷却常數 (C) 為 4.158 如表二之結果。

圖 7 是荔枝在初溫  $28^{\circ}\text{C}$  置於  $3.8^{\circ}\text{C}$  和預冷風速 2 m/s 下中心點溫度與預冷時間變化的情形，同上之運算過程，荔枝之冷却常數為 3.616 如表二所示。

圖 8 是草莓在初溫  $20^{\circ}\text{C}$  置於  $0^{\circ}\text{C}$  和 1 m/s 條件下，中心點溫度與預冷時間變化之情形，其冷却常數為 2.10 如表二所示。

圖 9 是蘋果在初溫  $18^{\circ}\text{C}$ ，置於  $0^{\circ}\text{C}$  和 1 m/s 預冷條件下，其中中心點，中間點和表面溫度隨預冷時間之變化情形。其中心點溫度之冷却常數如表二所示為 0.945。

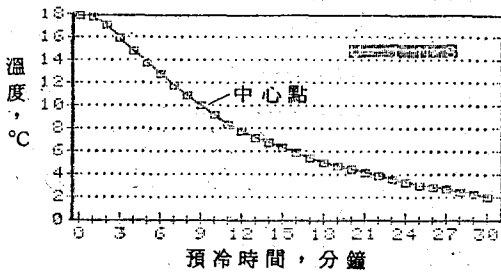


圖 6 葡萄中心點風冷之冷却曲線

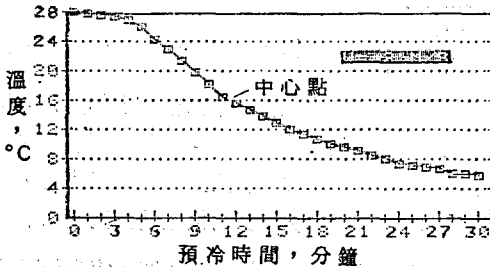


圖 7 荔枝中心點風冷之冷却曲線

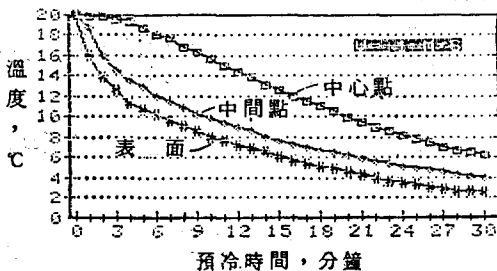


圖 8 草莓風冷之冷却曲線

圖 10 是哈密瓜在初溫  $21^{\circ}\text{C}$ ，置於  $0^{\circ}\text{C}$  和 1 m/s 預冷條件下，其中中心點，中間點與表面溫度隨着預冷時間變化之情形。其中心點溫度之冷却常數如表二所示為 0.462。

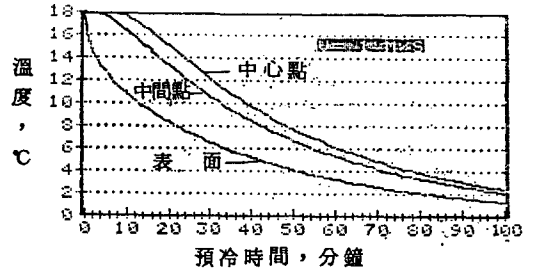


圖 9 蘋果風冷之冷却曲線

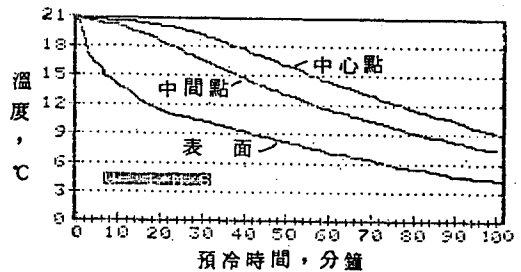


圖 10 哈密瓜風冷之冷却曲線

由圖 6 至圖 10 可知半冷時間  $Z$  代入式(11)可求出如表二所示葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜中心點在不同風速下之冷却常數 (C) 介於 0.462 與 4.158 之間。半徑愈大之水果，其半冷時間愈長或冷却常數愈小。

表二 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜在不同風速下之中心點之半冷時間及冷却常數

		風速 (公尺/秒)	中心點溫度 半冷時間 (Z, 分鐘)	冷却常數 (C)
葡	萄	1	10.0	4.158
荔	枝	2	11.5	3.616
草	莓	1	19.8	2.100
蘋	果	1	44.0	0.945
哈	蜜瓜	1	90.0	0.462

表三是葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜 5 次測定之平均密度，介於  $0.79\sim 1.1\text{ g/cm}^3$  之間。

表三 為葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之平均密度

	葡萄	荔枝	草莓	蘋果	哈密瓜
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	1.06	1.10	0.89	0.79	1.02

表四為葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜含水率之測定結果介於 77% 與 91.8% 之間。Mohsenin (1980) 資料所示葡萄、荔枝、草莓、和蘋果之含水率分別為 81.7%, 90%, 87.2% 與 84.1%。可能因為品種, 生產環境和成熟度等條件造成之差異。

表四 為葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之平均含水率 (濕基, %)

	葡萄	荔枝	草莓	蘋果	哈密瓜
含水率 (濕基, %)	80	77	91.8	84.1	88.5

表五為葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜利用比熱儀測定的結果, 與 Mohsenin (1980) 之資料, 葡萄、草莓、和蘋果之比熱分別為 3.60, 3.85, 和 3.60 J/g-°C 略有差異, 可能由於實驗設備, 水果之含水率, 水果之成份不同等原因所造成之綜合影響。

表五 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之比熱值 (C<sub>p</sub>)

	葡萄	荔枝	草莓	蘋果	哈密瓜
比熱 (J/g-°C)	3.66	3.77	4.02	3.77	3.64

表六為葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜用幾何平均徑法所得之相等徑介於 2.8 到 11 公分之間。

表六 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之幾何平均相等徑

	葡萄	荔枝	草莓	蘋果	哈密瓜
幾何平均徑 (公分)	2.8	3.2	4.06	7.9	11.0

表七為應用式 (16a), (16b), (16c) 所求

得在 0°C 時冷空氣之密度 ( $\rho$ ) 熱傳係數 ( $K_f$ ), 黏性係數 ( $\mu$ ) 代入式(16)而求得葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜在風速從 0.2 到 5.0 m/s 風速下之對流熱傳係數計算值從 6.94 到 82.7 w/m<sup>2</sup>-°C。

表七 葡萄、荔枝、草莓、蘋果、哈密瓜在 0°C 時各風速下之對流熱傳係數計算值

V (m/s)	(w/m <sup>2</sup> -°C)	葡萄	荔枝	草莓	蘋果	哈密瓜
	D =	D =	D =	D =	D =	D =
	-°C)	0.028 m	0.032 m	0.0406 m	0.079 m	0.11m
0.2		11.99	11.36	10.23	7.92	6.94
0.4		18.17	17.23	15.51	12.00	10.51
0.6		23.18	21.97	19.78	15.30	13.41
0.8		27.54	26.11	23.51	18.19	15.93
1.0		31.49	29.85	26.88	20.79	18.22
2.0		47.73	45.24	40.74	31.52	27.61
3.0		60.87	57.70	51.96	40.20	35.21
4.0		72.34	68.58	61.74	47.77	41.85
5.0		82.70	78.40	70.59	54.62	47.84

將上述 5 種水果所得之比熱、密度、相等球半徑與對流熱傳係數代入式(4), (6), (8)求得預測冷卻曲線後與實測之預冷曲線比較再以最小平方差方法決定水果之熱傳導係數。現以蘋果為例, 在不同的熱傳導係數下及風速 1 m/s 下之預測冷卻曲線如圖 11 至圖 13。在風速 1 m/s 下, 對蘋果之不同熱傳導係數所得之中心預測冷卻曲線與實測中心預冷曲線之比較如圖 14 至圖 16。熱傳導係數值 (K) 之決定; 視所取之 K 值所預測出之中心冷卻曲線與實測中心預冷曲線間何者較吻合來決定。然有些預測冷卻曲線與實測預冷曲線很接近無法由圖上決定何者較吻合時, 可利用最小平方差原理 (Principle of least square) 來決定最佳之 K 值, 如表八所示, 葡萄在 K=0.57 w/m-°C, 最小平方差 (S) 最小是 1.4, 估算之熱傳係數為 0.57。

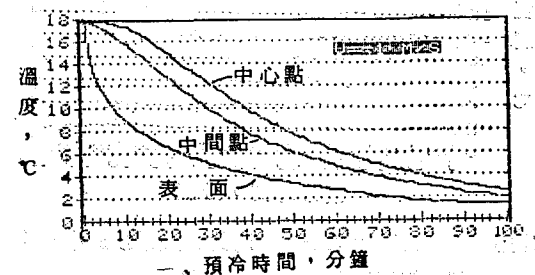


圖 11 K=0.42 w/m-°C 時蘋果之預測冷卻曲線

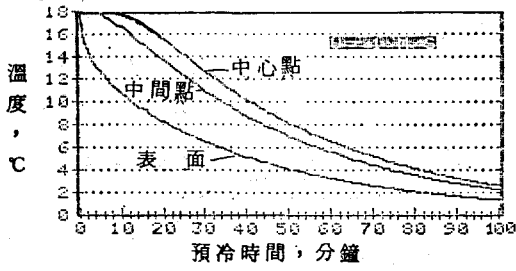


圖12 K=0.5 w/m-°C時蘋果之預測冷却曲線

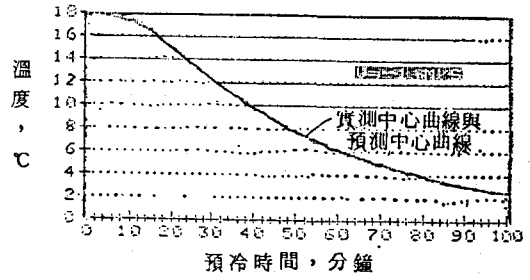


圖16 K=0.55 w/m-°C 時比較蘋果預測中心冷却曲線與實測中心預冷曲線

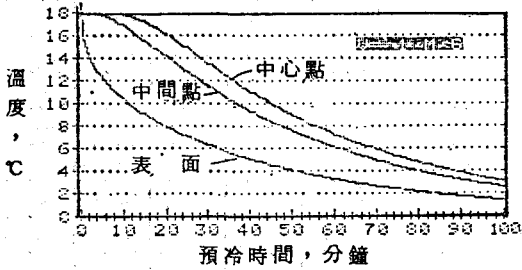


圖13 K=0.55 w/m-°C 時蘋果之預測冷却曲線

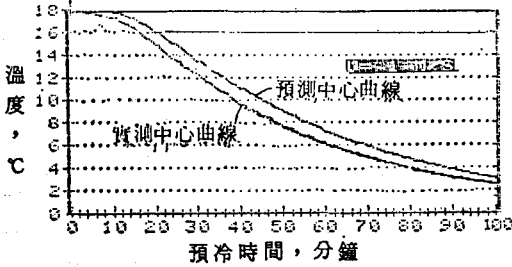


圖14 K=0.42 w/m-°C 時比較蘋果預測中心冷却曲線與實測中心預冷曲線

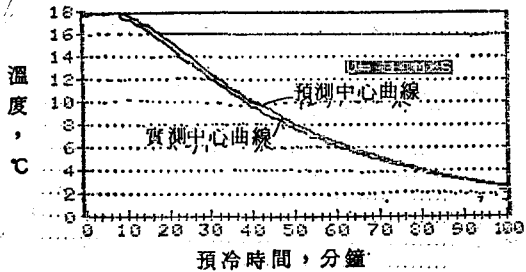


圖15 K=0.5 w/m-°C 時比較蘋果預測中心冷却曲線與實測中心預冷曲線

表八 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜在不同K值下，中心預測冷却溫度與實測中心溫度在不同時間之最小平方差

		S* = $\sum(Y_1 - Y)^2$		
葡 萄	K	0.500	0.570	0.650
	S	2.094	1.400	1.901
荔 枝	K	0.390	0.420	0.440
	S	3.218	2.913	2.861
草 莓	K	0.400	0.500	0.680
	S	1.859	4.586	9.073
蘋 果	K	0.420	0.500	0.550
	S	10.139	3.447	1.228
哈 蜜 瓜	K	0.500	0.600	0.700
	S	10.596	2.940	5.290

\* S : 最小平方差

$Y_1$  : 預測溫度

Y : 測定溫度

如3.3.6節所述將預冷曲線繪於半對數紙上如圖17，利用式(13)，f為圖17直線部份斜率之倒數可求得f。 $\beta_1$ 可由測定兩點的溫度(如中心 $r=0$ ；中間點 $r=\frac{R}{2}$ )代入式(18)求得。將f,  $\beta_1$ 值代入式(14)求得熱擴散係數( $\alpha$ )。對流熱傳係數(h)則由式(16)求得。

表九為應用數學解析法所得葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之熱性質。

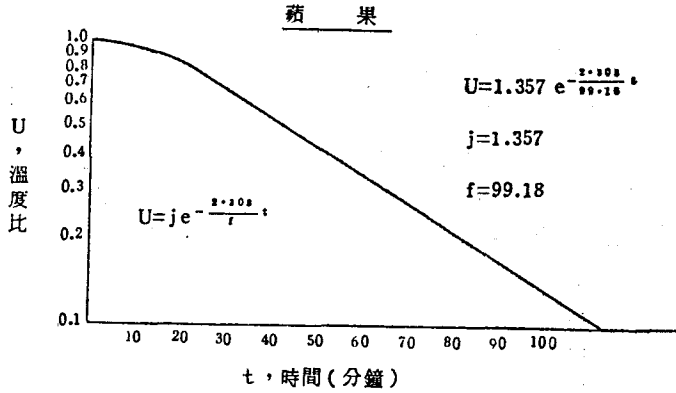


圖17 蘋果中心預冷曲線的溫度比與時間之關係

表九 應用數學解析法所得葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之熱性質

	K (w/m <sup>2</sup> ·°C)	$\alpha \times 10^{-4}$ (m <sup>2</sup> /hr)	h (w/m <sup>2</sup> ·°C)	f	$\beta_1$
葡 萄	0.568	5.279	27.04	0.488	1.324
荔 枝	0.463	4.022	46.59	0.413	1.884
草 莓	0.410	4.110	26.03	0.767	1.736
蘋 果	0.580	6.970	19.81	1.653	1.766
哈 蜜 瓜	0.552	5.382	16.38	3.612	1.813

表十 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜熱性質之數值解與解析解與已發表資料之比較

	K (w/m <sup>2</sup> ·°C)			$\alpha \times 10^{-4}$ (m <sup>2</sup> /hr)		
	數值解	解析解	文獻值	數值解	解析解	文獻值
葡 萄	0.57	0.568	0.567*	5.291	5.279	
荔 枝	0.44	0.463		3.820	4.022	
草 莓	0.40	0.410	0.462**	4.023	4.110	4.93*
蘋 果	0.55	0.580	0.513**	6.609	6.970	5.39**
哈 蜜 瓜	0.60	0.552	0.571**	5.856	6.382	

註：\* ASHRAE, (1981)  
\*\* Mohsenin, (1980)

表十為數值分析法與數學解析法所得結果與已發表之熱傳導係數與熱擴散係數之比較。利用數值法與解析法求得之熱傳導係數與熱擴散係數很相近。因此，此兩種方法可用來解決利用圓柱體中心線熱源法量測大顆粒農用品之困難。至於與文獻上發表值之差異，可能由於不同品種，含水率、溫度、和量測模式不同等所造成的綜合影響。

根據周 (1986)，現將上述所得之物理及熱性質代入電腦程式，計算葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜在各種風速下之半冷時間 (half cooling time) 如表十一介於5.3 和 177分之間。例如小球體如葡萄在風速每秒0.2公尺下，半冷時間為 20.8 分；大球體如哈密瓜在風速每秒 0.2 公尺時，其半冷時間增為 177 分。提高風速如葡萄每分為 5 公尺，其半冷時間亦減為5.3分。

表十一 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜在不同風速下之預測半冷時間 (分)

水果種類	風速(m/s)									
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	
葡 萄	20.8	14.8	12.4	10.9	10.0	7.7	6.8	6.2	5.3	
荔 枝	28.5	20.9	17.7	15.8	14.6	11.7	10.4	9.7	9.2	
草 莓	37.7	28.2	24.2	21.8	20.3	16.6	15.1	14.2	13.6	
蘋 果	78.8	59.2	51.0	46.2	43.0	35.5	32.3	30.4	29.1	
哈 蜜 瓜	177	120.6	104.6	95.4	89.1	74.2	67.9	64.2	61.7	

將表十一半冷時間與預冷風速變化之情形繪成圖18以葡萄為例，預冷風速高於每秒1公尺時，半冷時間與風速變化之斜率趨於緩慢，增加風速對於縮短葡萄之半冷時間無顯著之效果，以此推論，風冷葡萄之最佳風速範圍在每秒0.8至1.0公尺，其斜率分別為-5.67及-4.15，以此類推可估算其他球形水果之最佳預冷風速範圍如表十二。

表十二 葡萄、荔枝、草莓蘋果與哈密瓜之最佳預冷風速

	葡萄	荔枝	草莓	蘋果	哈密瓜
風速 (公尺/秒)	0.8~1.0	0.9~1.2	1.1~1.4	2.0~2.4	3.5~4.3

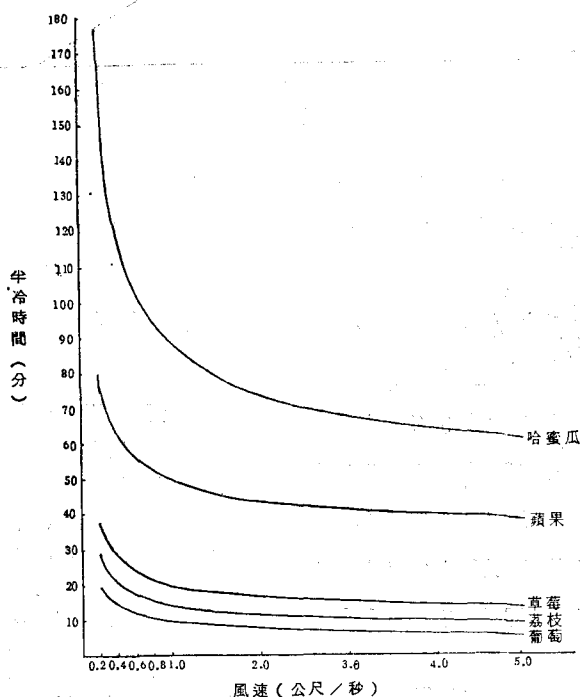


圖18 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之半冷時間與不同風速之關係

根據圖18以幕次迴歸方程式 (power regression equation) 表示上列5種水果之半冷時間 (t) 與風速 (V) 之關係時，其相關係數 (r) (correlation coefficient) 高，所以決定以幕次迴歸方程式代表之，其結果如表十三。由表十三所列之5種水果之迴歸方程式可預估當溫降至7%冷期時所需時間。現以葡萄為例，當風速為每秒1公

尺時所需之半冷時間為10.3分鐘，根據 Mohsenin (1980)，7%冷期所需之時間為半冷時間之三倍 (1980)，所以當葡萄以風速每秒1公尺預冷達7%冷期所需之時間為30.9分鐘 (10.3×3)，而實測值由圖6知7%冷期時溫度降至2.25°C 所需時間約29.5分鐘。預測時間與實測時間相差約1.4分鐘，其他依此類推。

表十三 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜以幕次迴歸方程式表示風速與半冷時間之關係

	A*	B*	相關係數	** 迴歸方程式 $t = (A)(V)^B$
葡萄	10.3171	-0.4023	-0.997	$t = 10.3173 V^{-0.4023}$
荔枝	15.2370	-0.3446	-0.994	$t = 15.2370 V^{-0.3446}$
草莓	21.2474	-0.3099	-0.992	$t = 21.2474 V^{-0.3099}$
蘋果	45.0139	-0.3015	-0.992	$t = 45.0139 V^{-0.3015}$
哈密瓜	94.5483	-0.3061	-0.981	$t = 94.5483 V^{-0.3061}$

\* A, B: 常數    \*\* t: 半冷時間, 分    V: 風速, 公尺/秒

## 五、結 論

由強風預冷裝置進行葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜等球形水果之冷卻實驗其結果如下：

1. 由預冷曲線葡萄、草莓、蘋果與哈密瓜等在初溫 $18\sim 21^{\circ}\text{C}$ 和風速每秒1公尺，置於 $0^{\circ}\text{C}$ 預冷空氣下其中心點溫度半冷時間分別為10分、19.8分、49.5分、44分和90分；而荔枝在初溫 $28^{\circ}\text{C}$ 和風速每秒2公尺下置於 $3.8^{\circ}\text{C}$ 預冷空氣，半冷時間為11.5分。

上列五種水果風冷時，中心溫度半冷時間（t，分）與風速（V，公尺/秒）之關係式為：

	相關係數	幕次迴歸方程式
葡 萄	-0.997	$t = 10.3173 V^{-0.4023}$
荔 枝	-0.994	$t = 15.2370 V^{-0.3446}$
草 莓	-0.992	$t = 21.2474 V^{-0.3099}$
蘋 果	-0.992	$t = 45.0139 V^{-0.3015}$
哈密瓜	-0.981	$t = 94.5483 V^{-0.3061}$

根據上表之關係式可得葡萄、草莓、蘋果與哈密瓜等在風速每秒1公尺下其預測之中心點溫度半冷時間分別為10.3分、21.2分、45分與94.5分；而荔枝在風速每秒2公尺下之預測半冷時間為12分，預測值與實驗值相差不大。

2. 葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜的密度（ $\rho$ ）和比熱（ $C_p$ ）經測定結果如下表：

	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/g- $^{\circ}\text{C}$ )
葡 萄	1.06	3.66
荔 枝	1.10	3.77
草 莓	0.89	4.02
蘋 果	0.79	3.77
哈 蜜 瓜	1.02	3.64

3. 利用解析法與數值法預估葡萄、荔枝、草莓、蘋果與哈密瓜之平均熱傳導係數（K）與熱擴散係數（ $\alpha$ ），其結果如下表：

	K (w/m- $^{\circ}\text{C}$ )	$A \times 10^{-4}$ (m <sup>2</sup> /hr)
葡 萄	0.569	5.285
荔 枝	0.452	3.921
草 莓	0.405	4.067
蘋 果	0.565	6.790
哈 蜜 瓜	0.576	6.119

4. 以降至半冷時間之快慢為設計標準，預估最佳之預冷風速葡萄介於0.8和1.0 m/s之間，荔枝介於0.9與1.2 m/s之間，草莓介於1.1和1.4 m/s之間，蘋果介於2.0和2.4 m/s之間，哈密瓜介於3.5與4.3 m/s之間。

## 參 考 文 獻

- 周文金，1986，臺灣球形水果強風預冷之研究，國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文（93頁），臺大農機系。
- 陳貽倫，1984，荔枝果實之預冷與有關物性，中國農業工程學報第30卷第4期，74~83頁。
- 楊進添，1984，個體甘藍之預冷，國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文（81頁），臺大農機系。
- 郭景儀，1986，真空預冷系統之初步設計與應用，國立臺灣大學農業工程學研究所碩士論文（138頁），臺大農機系。
- 郭景儀、蕭介宗，1987，主要果蔬預冷設備之研製和應用（II）——青蔥呼吸熱之測定及應用，中國農業工程學報33卷第1期，24頁。
- 萬一怒、蕭介宗，1984，熱傳導係數測定器之研製及應用於農產品之測定，中國農業工程學報30卷第4期，114~124頁。
- 堀部和雄、中川健治，1977，球形農產物の熱擴散係數について，三重大學技術報告，第55號，P. 179。
- , 1981, Handbook & Product Directory, Fundamentals, ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc. Atlanta, GA 30329, U. S. A.
- , 1987, ASAE Standard, American Society of Agricultural Engineers, St.

- Joseph MI 49085-9659, U. S. A.
10. Baird, C. D., J. J. Gaffney, 1976, A numerical procedure for calculating heat transfer in bulk loads of fruits or vegetables, ASHRAE, p. 525-540.
11. Charm S. 1971. A method for calculating the temperatre distribution and mass average temperature in conduction-heated canned food during water cooling. Contribution No. 338. Dept. of Food Technology, MIT, Cambridge, Mass. U. S. A.
12. McAdams, W. H. 1954. Heat transmission. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, U. S. A.
13. Mohsenin, N. N. 1980. Thermal properties of foods and agricultural materials. Department of Agricultural Engineering, the Pennsylvania State University, State College, Pennsylvania, U. S. A.
14. Siebel, J. E., 1892. Specific heat of various products, ice and refrigeration.
15. Smith, R. E. and A. H. Bennett, 1965. Mass average temperature of fruit and vegetables during transient cooling, Trans. of the ASAE: p. 249-255.
16. Smith, R. E., G. L. Nelson and R. L. Henrickson, 1968. Application of geometry analysis of anomalous shapes to problems in transient heat transfer. Trans. of the ASAE p. 292-302.

專營土木、水利、建築等工程

## 川永營造工程有限公司

負責人：王童知

地址：雲林縣林內鄉烏塗村50號 電話：(055)892367

專營土木、水利、建築等工程

## 恆勝土木包工業

負責人：吳阿圳

地址：礁溪鄉吳沙村北門巷49號 電話：(039)326081

專營土木、水利、建築等工程

## 永裕土木包工業

負責人：謝阿圳

地址：三星鄉大隱村143號 電話：(039)890605

專營土木、水利、建築等工程

## 國政土木包工業

負責人：游振南

地址：員山鄉尚德村圳頭路29~5號 電話：(039)222236