

# 散裝貯藏洋葱冷却速率受到空氣分佈之影響

## The Cooling Rate of Onions Stored in Bulk Affected by Air Distribution

美國加州大學研究生

國立臺灣大學農機系教授

周 端 仁

蕭 介 宗

J. J. Chou

Jai-tsung Shaw

### 摘 要

本實驗係把冷藏實驗槽，置於恒溫恒濕室（6.5m<sup>2</sup>）內。以設定在 1°C，70~75% RH 的空氣吹入冷藏實驗槽，就風速大小，排氣風扇與均勻分佈空氣導管裝置與否，觀察各種改進措施對於散裝洋葱冷却速率的影響。試驗結果可以做為改良目前商用冷藏庫缺點之參考。

當個體洋葱在風速 1 m/s，溫度由 20.7°C 降為 3.2°C 的情況下，質量平均溫度與時間的關係，可以  $T=e^{(3.22-0.504*t)}$  表示。此式符合牛頓冷却原理。

當風速由 1.6m/s 增加為 1.85m/s 或是由 2.3m/s 增加為 2.65m/s，其冷却速率平均增加 7.3%。而裝置排氣風扇，冷却速率平均增加 50.3%。當安裝均勻分佈的穿孔導管，冷却速率平均增加 21.2%。因為增大風速，使得上層與底層洋葱外圍的溫度差異減小外，並且增加洋葱外圍與質量平均溫度的差異。

### Abstract

The experiment was carried out in a cooling test chamber which was placed in a 6.5 square meter constant temperature & humidity controlled room. The effect of the air velocity, the suction fan, and the perforated pipe on the cooling rate of onions stored in bulk was observed by blowing the air at 1°C and 70-75% RH into the test chamber. These experimental results could be used for references to improve the present commercial refrigerated warehouses.

As an onion with initial temperature 20.7°C and with air velocity 1 m/s in the test chamber was dropped to 3.2°C, the relationship of mass average temperature (T) of the single onion with time (t) could be expressed as  $T=\exp (3.22-0.504*t)$  which follows the Newton's cooling law.

When the air velocity increased from 1.6 m/s to 1.85 m/s, or from 2.3 m/s to 2.65 m/s, the average cooling rate of onions stored in bulk was increased 7.3%. If the suction fan was operated, the average cooling rate was increased 50.3%. When the perforated air distribution pipe was set up, the average cooling rate was increased 21.3%. For increasing the air velocity, not only the temperature difference between the the bottom and top of the load was smaller, but also the temperature difference between the surface and the mass average temperature of an onion at a given location was greater.

## 一、前言

本省夏季蔬菜缺乏，而冬季生產過剩，如何以低溫貯藏來延長冬季蔬菜供應期，以紓解夏季蔬菜之不足，為消費者、生產者和政府產銷單位關心的課題。

根據蕭氏等<sup>(1)</sup>的調查研究，如何針對現有的冷藏設備，探討改進冷藏庫風速，使溫度分佈均勻，減少冷藏蔬菜的損失，對於地處東南亞颱風帶的臺灣經常面臨夏季果菜供需無法平衡的狀態，相當重要。惟一般冷藏庫一個單位的冷藏空間，貯量甚大，動輒數十公噸，進行改良實驗，花費太多，擬以實驗室 6.5m<sup>2</sup> 大的冷藏庫進行小規模的實驗，就風速大小，排氣風扇及引導氣流均勻分佈的穿孔管路三種因素對於冷却速率的影響，分別進行探討。根據這些實驗的結果，使我們能夠針對現有商用冷藏庫的缺點，尋求適當的改進方法，減少冷藏蔬菜的損失，維護生產者與消費者的權益。

## 二、文獻探討

2.1 牛頓冷却原理 (Newton's Cooling Law)，說明物體在冷却過程當中，溫度與時間的關係<sup>(3,6)</sup>

$$\frac{T - T_0}{T_1 - T_0} = j e^{-ct} \quad (1)$$

t 為時間，T 與 T<sub>0</sub> 分別為時間 t 時物體的溫度和冷却空氣的溫度，T<sub>1</sub> 為物體的起始溫度，c 為冷却常數，j 為遲滯因子，該因子可以將實驗數值畫在半對數座標圖上而求得。

2.2 質量平均溫度 (Mass Average Temperature)

洋蔥個體內部有溫度梯度存在，如何找一個代表性的溫度，以便計算其熱能含量，作為設計冷藏負荷或比較各個洋蔥冷藏狀況之差異，甚為重要。根據內部溫度或線性分佈的假計，算出其質量平均溫度恰好與位於距洋蔥中心點 0.75R 處的測點值相同<sup>(2,5)</sup>。

2.3 空氣的流動阻力

當空氣被迫流經洋蔥時，即產生氣流阻力，此阻力亦即所謂的壓力降。該項阻力係因摩擦與亂流存在，發生能量損失所致，克服這項阻力，可以設法於散裝洋蔥堆層的進口端加壓，產生正壓力；或於出口端形成真空，以產生吸力。空氣流經洋蔥堆層所產生的壓力降與氣流的速率，洋蔥的表面與形

狀特性、空隙的數量、大小及形狀、個體大小之變異以及堆層之深度等因素有關。貝爾和蓋佛尼<sup>(3)</sup>研究得出結果顯示，空氣通過胡椒時產生的壓力降 ( $\Delta p$ ) 與速度 (V) 的 1.81 次方成正比， $\Delta p = \ell (V)^{1.81}$ ， $\ell$  為比例常數，取決於果菜的幾何特徵及擺置方式。

2.4 均勻分佈空氣的穿孔導管

如果雷諾數小於 2100，則管流化歸層流範圍，此時摩擦因子與雷諾數成反比， $f = 16\nu/Du$ ，則欲使流體沿着垂直管路的方向，水力半徑比與長度比的關係必需符合下式<sup>(2,7)</sup>：

$$m = m_0 \left(\frac{y}{L}\right)^{1/2 - \beta} \quad (2)$$

圖 1 顯示數種  $Q_0/\nu L$  下的水力半徑比與長度比的關係曲線，在一般冷藏系統當中， $Q_0/\nu L$  都遠大於 30，因此常用曲線 5 的管路型態。

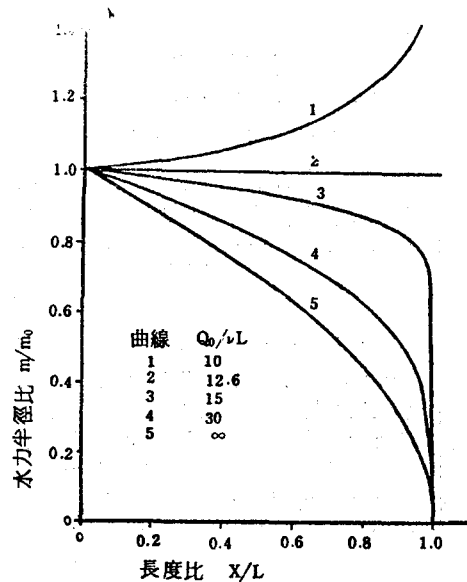


圖 1 層流時，水力半徑與長度比關係圖

在亂流範圍內，摩擦因子經實驗結果可以  $f = b/(N_{RE})^n$  的型態表之，而當雷諾數介於 3,000~100,000 的平滑管內時， $f = 0.3164/4(N_{RE})^{1/4}$ 。據此可以導出，為使流體沿垂直管路均勻流出，其各個位置水力半徑必需符合下式<sup>(2,7)</sup>：

$$\left(\frac{4m}{L}\right)^{1-n} = \left[\left(\frac{4m_0}{L}\right)^{1-n} + 2r\right] \left(\frac{y}{L}\right)^{\frac{1-n}{2}} - 2r \left(\frac{y}{L}\right)^{1-n} \quad (3)$$

如圖 2，顯示數種  $Q_0/\nu L$  及  $L/4m_0$  下的

水力半徑比與長度比的關係曲線。

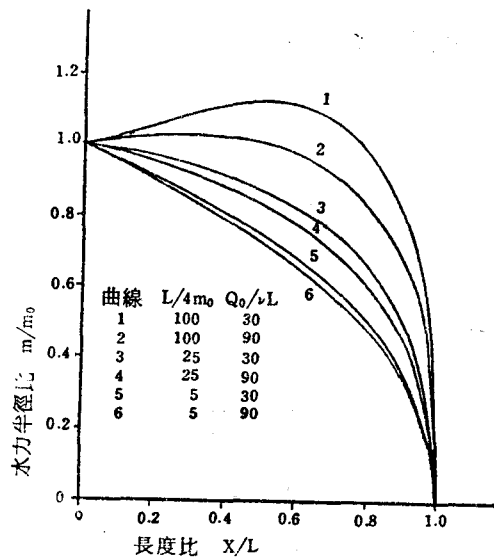


圖 2 亂流時，水力半徑與長度比關係圖

### 三、實驗方法

#### 3.1 實驗設備組合系統

圖 3 所示，本實驗係把冷藏實驗槽置於恒溫恒濕室(6.5m<sup>2</sup>)內，而把恒溫恒濕室已設定的溫度與一定相對濕度的空氣吹入冷藏實驗槽中，冷藏實驗槽如圖 5 所示，為一個高 150cm，長 75cm，寬 75cm 的絕熱長方體，其主體結構由角鋼及 1.1cm 厚的三合板組合而成，外面披覆兩層各 2cm 厚的保麗龍板，以樹脂黏合於上，接合處填入玻璃纖維棉以矽膠密封。在不同的通風量與通風方式下，比較其槽內各點溫度分佈狀況和冷却速率，以評定各種條件下的冷藏效果。實驗使用 PW 型洋蔥，該型洋蔥近似球體，形狀規則而均勻，分析時視為均質球體。

#### 3.2 洋蔥的擺置與溫度的測定位置

實驗前先將洋蔥一層一層的擺入冷藏實驗槽內，熱偶線按照預定的測點位置伴隨洋蔥入槽的順序

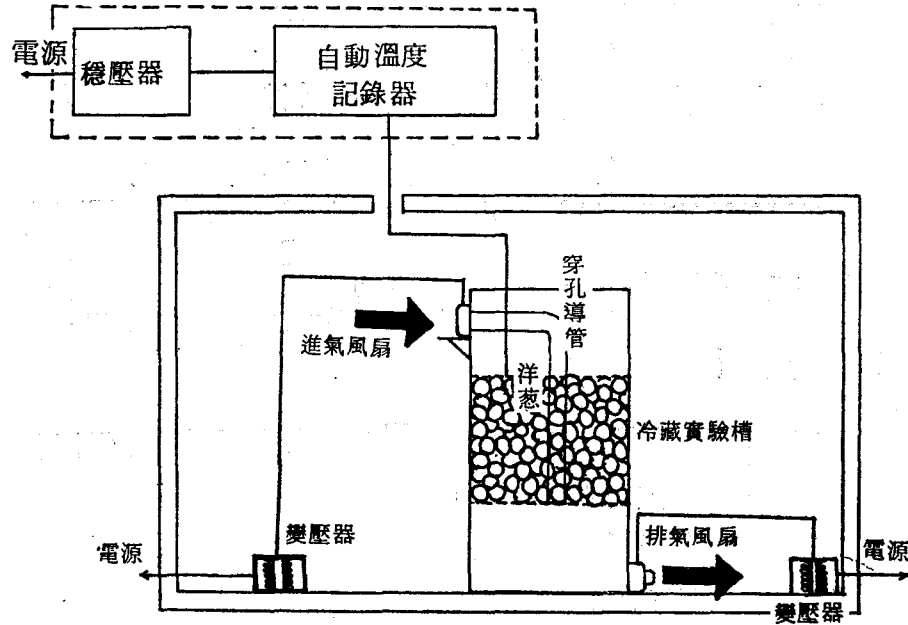


圖 3 實驗設備組合系統

裝置妥當。PW 型洋蔥近似球體，實驗時在洋蔥內部安插兩個測點，即中心溫度和線性模式質量平均溫度，位置分別在中心點及 0.75R 處，另外洋蔥外圍也擺置一個測點，以便觀察，內外溫差對於洋蔥冷却速率變化的關係。如圖 6，測定的洋蔥個體位置分別在槽內的上層、中層和底層，其高度由冷

藏實驗槽底部算起，分別在 37cm, 60cm, 83cm 處。如圖 4 所示，同一層的測點的位置分佈，(2)區在槽的長、寬對角線中點上，(1)區和(3)區則分居兩個對角。

#### 3.3 洋蔥溫度的測定

測量洋蔥溫度的方法係以消毒過的尖棒穿孔至

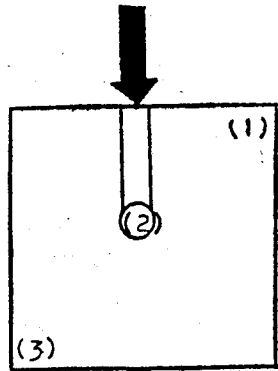


圖 4 冷藏實驗槽上視圖

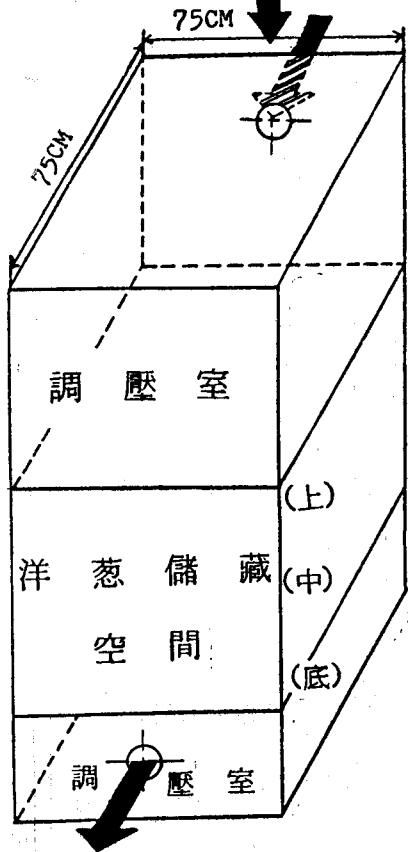


圖 5 冷藏實驗槽立體圖

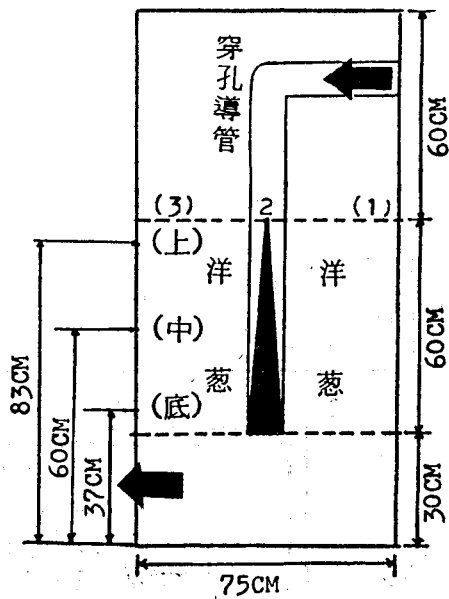


圖 6 冷藏實驗槽側視圖

欲測位置，然後拔出，將熱偶線插入洋葱，外面以石蠟密封，隔離空氣熱對流的影響。圖 7 所示， $6.5\text{m}^2$  大的恒溫恒濕室設有加溫裝置，可使洋葱回溫至初始溫度，如此一批洋葱可以重覆實驗，不但可以維持相同的擺置，而且熱偶線的位置，能够保持在同一個洋葱的相同位置上，不致因形狀、大小、相關位置、產物品種或成熟度的不同而影響到實

驗的精密度。回溫時，速度都儘可能緩慢，避免影響洋葱的物理性質。圖 8 所示，洋葱的溫度變化經由 T/CT 型熱偶線傳回自動溫度記錄器，記錄溫度變化，自動溫度記錄器同時掃描 36 個測點，在螢幕顯示，並以電子式紙帶機或一般報表機列印數據。

### 3.4 風速的測定

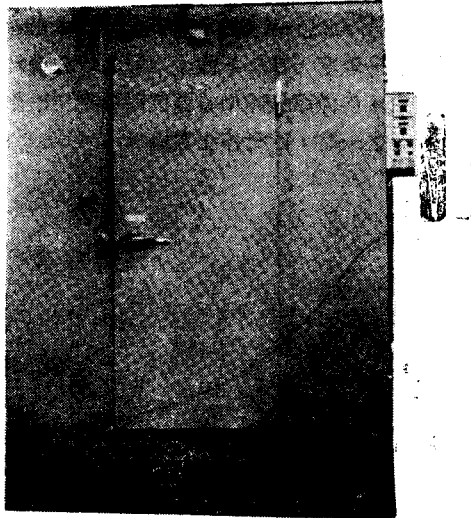


圖 7 6.5m<sup>2</sup>恒溫恒濕室的外貌

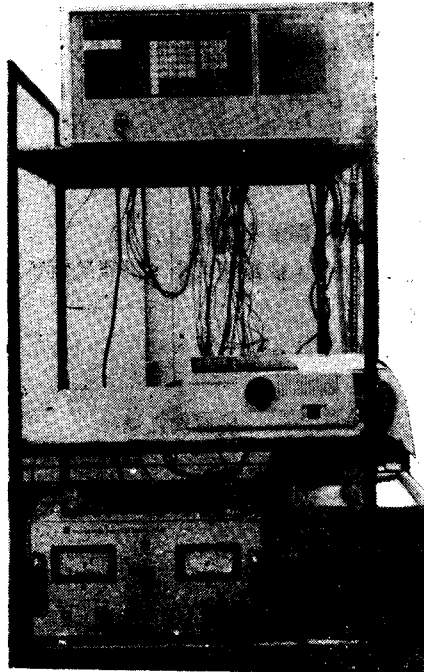


圖 8 自動溫度記錄器、穩壓器及印表機

圖 9 所示，吹氣風扇裝置在冷藏實驗槽上方，離開實驗槽底部 130 cm，排氣風扇則裝置在實驗槽底部，圖 6 所示，箭頭代表風扇位置和氣流方向。採用的兩部風扇均為串激馬達帶動之離心式送風機，風量大小可由變壓器或風扇上的入口風門直接控制。

實驗採用熱式風速計測定風速，如圖 10 所示。風速測點係於下方調壓室選取四個位置，風速計的

探針從實驗槽外方插入而測得，四個值平均之。本實驗的風速有兩種：一為速度低的情況 1.6m/s；

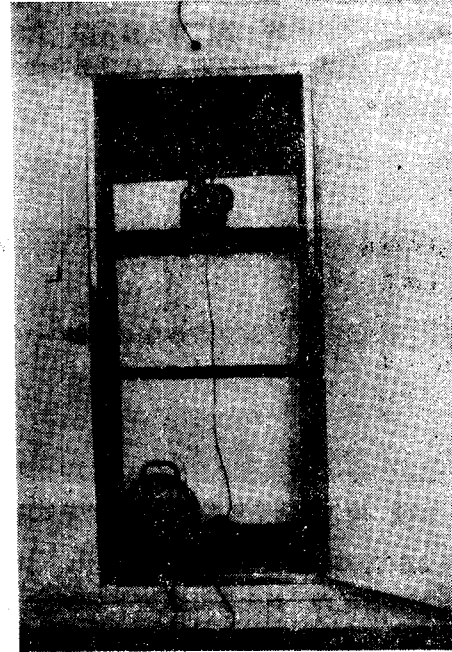


圖 9 冷藏實驗槽置於恒溫恒濕室內

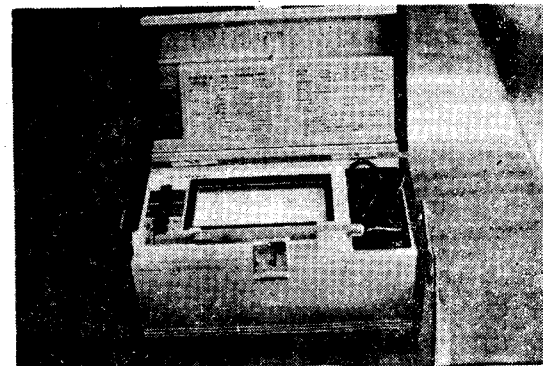


圖 10 熱式風速計

一為速度高的情況 1.85m/s。惟若加裝排氣風扇，則低速情況，風速將從 1.6m/s，增加為 2.3m/s；高速情況下，風速將從 1.85m/s，增加為 2.65m/s，此風速與商用冷藏庫所用的風速 1~2.3m/s<sup>(4)</sup>，仍然非常接近。

### 3.5 均勻分佈空氣的穿孔導管之裝置

圖 3 及圖 6 所示，穿孔導管由吹氣風扇的出風口引領氣流導向洋蔥堆層，從風速、空氣動力黏滯係數及管徑求得，上述幾種風速下的雷諾數均落在 3,000~100,000 的範圍內，即亂流的領域，因此可

以應用公式(3)計算管徑，不過因為變化管徑，對於設計及製造困難較多。圖11所示，為實驗以平直水管內插柱狀圓錐，改變管流截面積，同樣可以達到空氣均勻分佈的目的。裝置穿孔導管時，對於原有的排列，以變動最少為原則，緩緩將導管插入洋蔥堆層裡面。

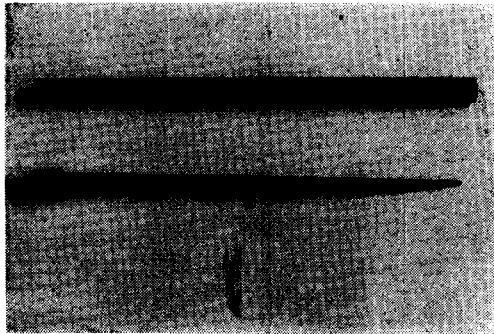


圖11 均勻分佈空氣導管與內插的柱狀圓錐

### 3.6 冷却時間與冷却速率的計算

實驗開始時，將大型恒溫恒濕室設定在  $1^{\circ}\text{C}$ ，70~75%相對濕度情況，而將此溫度及濕度的空氣吹入冷藏實驗槽內，進行各種條件下的實驗，空氣經過風機溫度平均上升  $3.3^{\circ}\text{C}\sim 3.5^{\circ}\text{C}$ ，即入風口溫度在  $4.3^{\circ}\text{C}\sim 4.4^{\circ}\text{C}$  左右，圖12所示，因為溫度曲線

逐漸逼近  $4.3^{\circ}\text{C}\sim 4.4^{\circ}\text{C}$ ，為了正確計算它的冷却時間，統一取至  $5.5^{\circ}\text{C}$ ，即十六分之十五冷却時間，換言之，俟洋蔥個體中心溫度降為剩下原來溫差的十六分之一時，即行停止實驗。

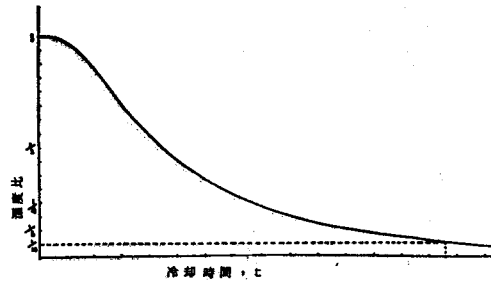


圖12 十六分之十五冷却時間

為了比較各組實驗的冷藏效果，以洋蔥的初始溫度  $22^{\circ}\text{C}$  與  $5.5^{\circ}\text{C}$  的差值，即  $16.5^{\circ}\text{C}$  及十六分之十五冷却時間來定義冷却速率 (CR)

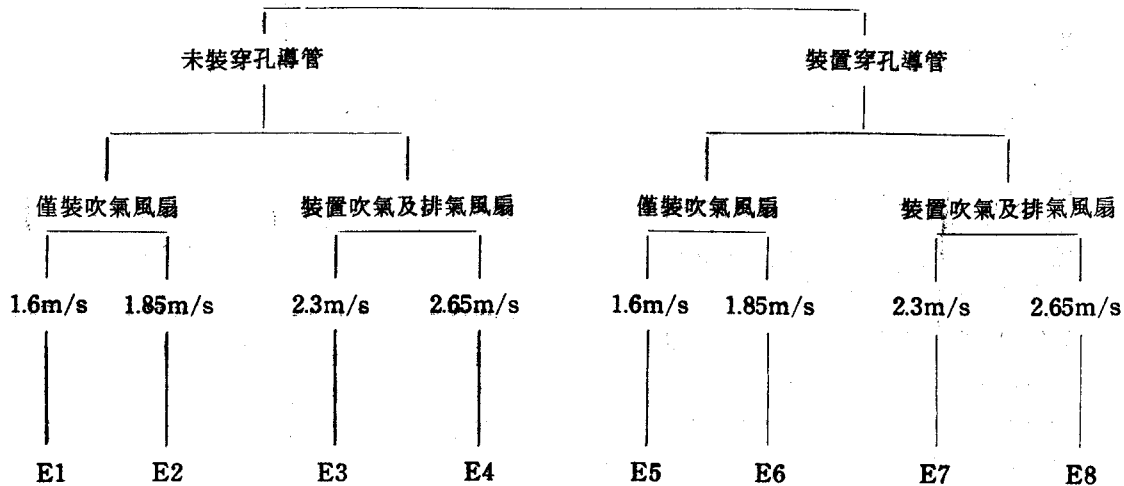
$$CR = \frac{\Delta T}{t_{15/16}} \quad (4)$$

公式(4)中， $\Delta T$  為  $16.5^{\circ}\text{C}$ ， $t_{15/16}$  為十六分之十五冷却時間。

### 3.7 實驗編組及代號

表 1 所示，依風速大小，排氣風扇及均勻分佈

表 1 實驗編組及代號



空氣的穿孔導管裝置與否，組合而成八種不同的實驗條件，依序完成實驗。為了討論及說明方便起見，茲將各組實驗以代號表示。E1 組實驗代表在無排氣風扇，無穿孔導管，風速在  $1.6\text{m/s}$  情況下；

E2 組實驗代表在無排氣風扇，無穿孔導管，風速在  $1.85\text{m/s}$  情況下；E3 組實驗代表在裝有排氣風扇，無穿孔導管，風速在  $2.3\text{m/s}$  情況下；E4 組實驗代表在裝有排氣風扇，無穿孔導管，風速在

表2 八組實驗各個測點十六分之十五冷却時間

			十六分之十五冷却時間 (小時)							
實驗組別			E 1	E 2	E 3	E 4	E 5	E 6	E 7	E 8
(1)	上層	中心	14.00	12.60	9.20	8.57	14.35	14.00	10.62	10.60
		MA	13.40	12.20	8.40	7.92	13.25	12.73	10.42	10.00
		外圍	6.80	5.20	3.60	2.82	6.97	6.40	5.22	4.40
	中層	中心	16.00	15.58	9.60	8.42	15.88	14.65	10.02	9.27
		MA	—	—	—	—	—	—	—	—
		外圍	9.60	8.40	5.60	5.22	10.42	10.93	8.82	6.00
	底層	中心	19.18	18.40	10.00	8.80	18.00	16.58	10.18	9.67
		MA	18.10	17.40	9.20	8.00	16.77	15.58	9.22	8.87
		外圍	15.20	10.40	8.24	7.22	13.90	12.27	8.42	8.00
(2)	上層	中心	16.00	13.60	8.40	7.92	7.95	7.80	6.43	6.01
		MA	16.00	12.80	7.40	7.04	7.60	7.45	6.18	5.86
		外圍	15.20	12.80	6.80	5.36	6.10	5.65	4.82	4.40
	中層	中心	24.02	21.60	13.33	12.42	7.60	7.22	7.62	7.45
		MA	21.58	19.20	13.20	—	6.37	6.10	7.22	7.02
		外圍	19.18	18.40	10.40	9.02	4.40	4.28	4.82	4.52
	底層	中心	24.00	21.60	14.40	12.12	12.37	11.67	11.22	10.60
		MA	22.38	20.80	13.60	11.82	10.62	10.12	11.22	10.00
		外圍	17.77	15.78	9.60	9.20	10.00	9.55	8.42	8.27
(3)	上層	中心	10.40	8.80	5.80	5.60	9.18	8.80	8.42	8.12
		MA	10.60	8.40	4.90	4.75	9.18	8.80	7.62	7.42
		外圍	8.00	5.10	3.60	3.20	7.90	7.15	5.62	5.22
	中層	中心	11.20	10.00	6.80	6.42	11.93	11.67	10.42	10.27
		MA	10.40	9.60	6.00	5.60	11.63	11.50	10.02	9.87
		外圍	8.00	5.60	3.20	2.82	7.48	7.23	6.82	6.42
	底層	中心	11.77	11.60	7.60	7.27	13.42	12.85	11.62	10.80
		MA	11.20	11.20	7.30	6.82	13.13	12.55	11.22	10.68
		外圍	8.80	5.20	4.24	4.02	10.32	8.05	6.42	6.82

2.65m/s 情況下；E5 組實驗代表在無排氣風扇，而裝有穿孔導管，風速在 1.6m/s 情況下；E6 組實驗代表在無排氣風扇，而裝有穿孔導管風速在 1.85m/s 情況下；E7 組實驗代表在裝有排氣風扇及穿孔導管，風速在 2.3m/s 情況下；E8 組實驗代表在裝有排氣風扇及穿孔導管，風速在 2.65m/s 情況下。

#### 四、結果與討論

本實驗先就個體洋蔥降溫的情況，討論洋蔥冷却的一般趨勢，然後再從風速的變化，排氣風扇與穿孔導管的裝設三項因素不同的組合，得出各種因素對於散裝貯藏洋蔥冷却速率的影響，分別討論如下：

##### 4.1 個體洋蔥冷却曲線

圖13 所示，為將初始溫度 20.7°C 的個體洋蔥置於 3.2°C，風速 1m/s 的實驗槽中，其中心點溫度和質量平均溫度與時間的關係。整個冷却過程最大的溫度差僅 0.7°C，表示洋蔥內部溫度分佈的差異不大，因此實驗時僅在洋蔥內部取兩個測點，即中心點和 0.75R 處。其中心點降至 4.3°C 所需時間，即十六分之十五冷却時間，為 3 小時 40 分鐘。由測定的質量平均溫度，利用指數關係迴歸而得的方程式，以  $T = e^{(3.22 - 0.504t)}$ ，T 為預測的質量平均溫度，t 為冷却時間，此式與式(1)型態相同。由迴歸方程式計算而得的估計值與測定值的差異，除了冷却開始 20 分鐘內差異較大，在 0.9~2.2°C 之間，其餘的時段，與迴歸方程式的估計值差異在 0~0.7°C 之間。因此洋蔥的冷却現象，可以牛頓冷却原理加以解釋，即洋蔥冷却速率的快慢決定於

內外溫差，和冷却常數的大小，而冷却常數隨外圍風速增大而加大。

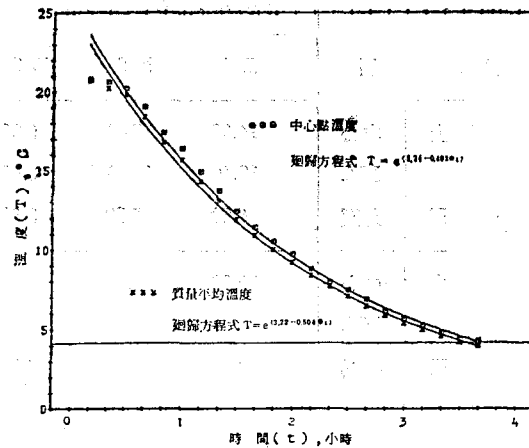


圖13 個體洋蔥冷却溫度與時間關係

表 2 為從民國72年11月開始至民國73年1月底為止，兩次實驗，每次實驗分別得到八組數據，其各個測點十六分之十五冷却時間。根據公式(4)及表中的數值，可以算得個別測點的冷却速率 CR。

##### 4.2 散裝洋蔥冷却速率受到風速變化，排氣風扇與穿孔導管裝設之影響

本實驗採用的風速有兩種：一為速度低的情況，1.6m/s；一為速度高的情況1.85m/s，惟若加裝排氣風扇，則低速情況風速將從 1.6m/s，增加為 2.3m/s，高速情況下，風速將從 1.85m/s 增加為 2.65m/s。表 3 所示，指出風速變化，裝置排氣風扇與裝置均勻分佈空氣導管的改進其冷却速率平均增加率分別為7.3%、50.3%及21.2%。

表 3 各種改進措施下冷却速率增加率

	各組冷却速率之比較				平均
	E1 & E2	E3 & E4	E5 & E6	E7 & E8	
風速變化之改進	10.2	8.9	4.7	5.2	7.3
裝置排氣風扇之改進	E1 & E3 75.6	E2 & E4 73.3	E5 & E7 26.1	E6 & E8 26.0	50.3
裝置均勻分佈空氣導管之改進	E1 & E5 48.3	E2 & E6 39.8	E3 & E7 0.2	E4 & E8 -3.7	21.2



表4 E1 與 E8 兩組實驗冷却速率之比較

		冷却速率增加率(%)			
		(1) 區	(2) 區	(3) 區	平 均
上層	中心	32.1	166.2	23.1	79.4
	MA	34.0	173.0	42.9	
中層	中心	72.6	222.4	9.1	98.3
	MA	72.6	207.4	5.4	
底層	中心	98.3	116.4	9.0	76.1
	MA	104.1	123.8	4.9	
平 均		69.0	168.2	16.6	84.6

各種改進措施，對於散裝洋蔥冷却速率的影響，詳細的討論參見參考文獻2。本文僅就 E1、E8 兩組實驗的結果如表4所示，經過三種方法同時改進過後的系統 (E8 組實驗) 與原有系統 (E1 組實驗) 比較，效果提高甚多。圖14所示，其降溫最慢的洋蔥個體冷却時間由24小時減為10小時48分鐘。這兩組實驗降溫最慢的洋蔥，其溫度與時間的

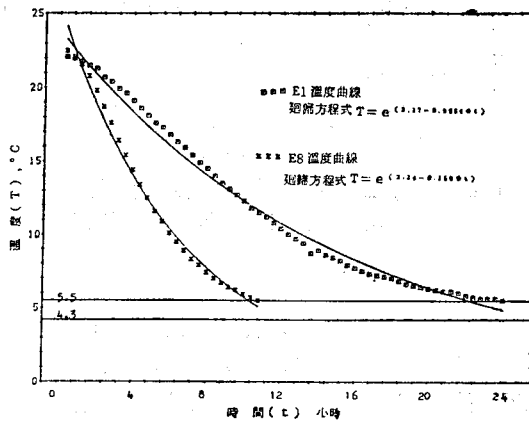


圖14 E1, E8 兩組實驗，降溫最慢的洋蔥個體之溫度曲線

關係，利用指數關係迴歸而得的兩個方程式分別為  $T = e^{(3.17-0.0664t^2)}$  及  $T = e^{(3.24-0.150t^2)}$ 。迴歸的方程式有一個共同的趨勢，即冷却開始時段估計值與測定值的誤差較大，而且都具有一個反曲點，即對時間二次微分為零的時刻，反曲點之前的過程冷却速率較快，過了反曲點之後冷却速率漸趨緩慢，此

為指數函數的共同特性。個體洋蔥的迴歸方程式之估計值與測定值的差異很小，而在散裝貯藏的洋蔥差值較大，因為在散裝貯藏的冷却過程當中洋蔥外圍溫度隨時間而變化。

一般散裝貯藏洋蔥的溫度可以約略以迴歸的方程式來預測，t 變數前面的係數可視為等效冷却常數，E1及E8 兩式的等效冷却常數分別為0.0664及0.150，冷却常數的大小決定冷却速率的快慢，愈大的，冷却所需時間愈少；愈小的，冷却所需時間愈長。

風速增大，縮小上層與底層的溫度差距。以 E3、E4 兩組實驗為例做為說明，圖15、圖16及圖17分別代表(1)區、(2)區及(3)區上層與底層洋蔥外圍

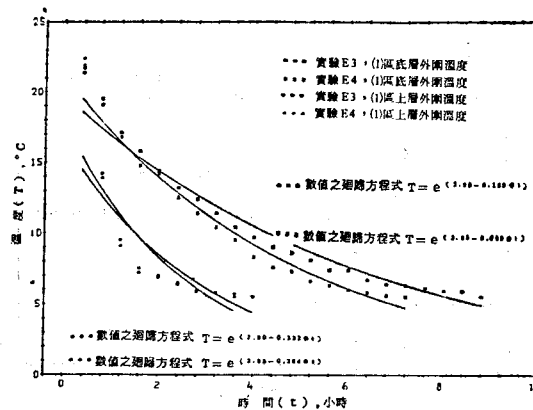


圖15 E3, E4 兩組實驗，(1)區上層與底層洋蔥外圍溫度差異之比較

溫度差異的比較。(1)區上層與底層溫差平均縮小0.8°C，(2)區縮小約0.3°C，(3)區約0.4°C，但洋葱外圍與質量平均溫度的差異却因為風速的增加而加大

。圖18、圖19及圖20分別表示(1)、(2)、(3)區底層外圍與質量平均的溫度曲線，低速與高速的情況同繪一圖，以爲比較。

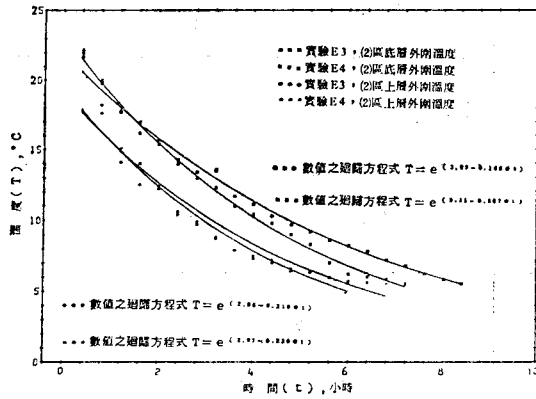


圖16 E3, E4 兩組實驗，(2)區上層與底層洋葱外圍溫度差異之比較

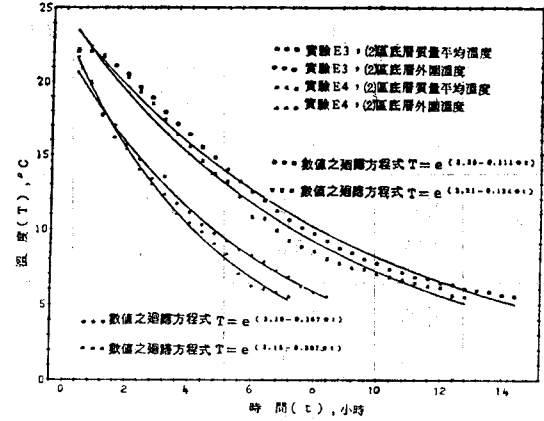


圖19 E3, E4 兩組實驗，(2)區底層洋葱質量平均溫度與外圍溫度差異之比較

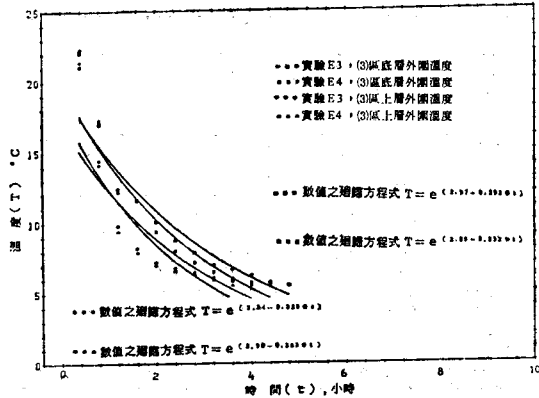


圖17 E3, E4 兩組實驗，(3)區上層與底層洋葱外圍溫度差異之比較

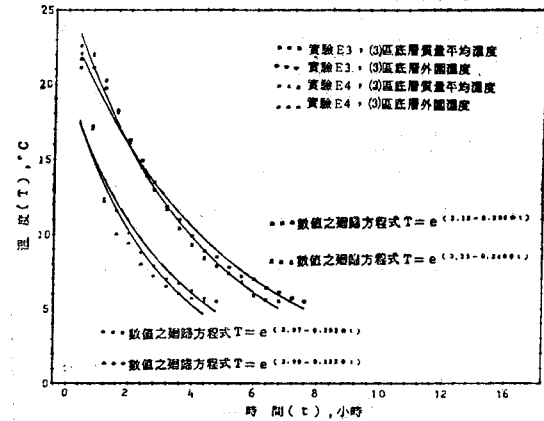


圖20 E3, E4 兩組實驗，(3)區底層洋葱質量平均溫度與外圍溫度差異之比較

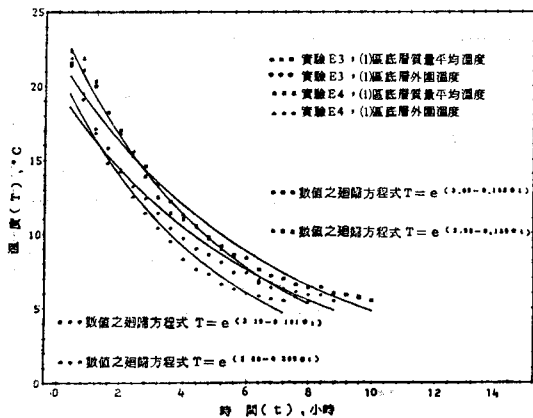


圖18 E3, E4 兩組實驗，(1)區底層洋葱質量平均溫度與外圍溫度差異之比較

## 五、結 論

根據實驗結果綜合分析得出以下結論：

1. 個體洋葱在風速1m/s，溫度由 20.7°C 降為 3.2°C 的情況下，質量平均溫度與時間的關係，可以  $T = e^{(8.22-0.504t)}$  表示，該式符合牛頓冷却原理。

2. 當風速由 1.6m/s 增加為 1.85m/s 或是由 2.3m/s 增加為 2.65m/s，其冷却速率平均增加 7.3%。裝置排氣風扇，冷却速率平均增加 50.3%；而安裝均勻分佈的穿孔導管，冷却速率平均增加 21.2%。增大風速，使得上層與底層洋葱外圍的溫度

(文轉第29頁)