

# 嘉南藥理學院教師專題研究計畫成果報告

計畫名稱：熱傳導度探針法量食品熱傳導度之自動化

計畫編號：CNFH-89-10

執行期限：88年9月1日至89年6月30日

計畫類別：個別型

主持人：林盈君 食品衛生系副教授

## 摘要

本研究建立一套熱傳導度探針裝置，來測量食品之熱傳導度值，並利用電腦程式互相連結而達到快速自動測量的結果，此裝置包含一熱傳導探針，一直流電源供應器，一恆溫控制槽，一樣品容器，一溫度擷取裝置，一個人電腦及印表機。並以甘油作為標準物來校正整個系統，並得到其熱傳導度值為 0.293W/mK 和文獻值(0.284W/mK)比較相差在 3%以內。粉末狀的黃豆分離蛋白被製備成不同水份含量(20~40%)與密度(300~600 kg/m<sup>3</sup>)的樣品，利用熱傳導度探針法來測量其在不同溫度(25~95℃)下之熱傳導度，在整個實驗範圍熱傳導度值從 0.056 到 0.156W/mK。

關鍵詞：熱傳導度值，熱傳導度探針法，黃豆分離蛋白，自動化

## 前言

對於食品熱傳導度的測量，有許多方法均可以從文獻上獲知如 Sweat(1986)；Murakami 和 Okos(1988)；Lin 和 Hsieh(1996)等，而上述這些方法基本上可分成兩類：穩態(典型的代表為 ASTM C 177-85 the Guarded-Hot-Plate Apparatus)和非穩態測量法。其中以非穩態測量法比較適合應用到食品熱傳導度之測量(Tong et al., 1993)。而在非穩態測量法中又以熱傳導度探針法(the line heat source thermal conductivity probe method)最常被使用，這主要是歸因於此方法的方便性、測量時間短、設備成本低和樣品大小形狀較無限制(Sweat, 1986；Murakami 和 Okos, 1988)。因此本研究將發展建立一套熱傳導度探針法來測量食品之熱傳導度值並將此方法利用電腦程式互相連結而達到快速自動測量的結果。

## 本文

### (一) 熱傳導度探針法理論基礎

本研究將採用熱傳導度探針法 (the thermal conductivity probe method) 來測量食品之熱傳導度，這主要是歸因於此方法的方便性、測量時間短、設備成本低和樣品大小形狀較無限制 (Sweat, 1986；Murakami 和 Okos, 1988；Tong et al., 1993；Lin 和 Hsieh 1996)。熱傳導度探針法的基本原理是以線熱源法 (the line heat source method) 為基礎，這方法的理論基礎已經被許多作者廣泛的討論過，如 Hopper 和 Lepper (1950)；Lentz (1952)；Nix et al. (1962)。在此將簡要的說明如下，這理論假設一細小的線熱源埋在一個初始溫度為  $T_i$  的無限大物體內，在此情況

下，該無限大物體內任一點之溫度為此物體之熱性質、時間、與輸入電力強度之函數。對一圓柱座標且只有徑向的溫度梯度存在，則基本熱傳導方程式可簡化如下：

$$\rho C_p \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{r \partial r}\right) \dots \dots \dots (1)$$

上述的偏微分方程式具備一初始條件和兩個邊界條件如下：

初始條件 1：當  $t = 0$  時，則  $T = T_i$

邊界條件 1：當  $r = \infty$  且  $t \geq 0$  時，則  $T = T_i$

邊界條件 2：當  $r \rightarrow 0$  且  $t \geq 0$  時，則  $-2\pi k(r\partial T/\partial r) = Q$

方程式(1)已經被 Ingersoll et al. (1954) 解出如下：

$$T = \frac{Q}{2\pi k} \cdot \int_y^\infty \frac{\exp(-x^2)}{x} dx = \frac{Q}{2\pi k} \cdot [I(y)] \dots \dots \dots (2)$$

此處  $T =$  溫度，以 K 表示。

$Q =$  輸入電力，以 W/m 表示。

$k =$  熱傳導度，以 W/mK 表示。

$y = r/(4\alpha t)^{1/2}$  為一無因次。

$x =$  啞變數。

$r =$  半徑，以 m 表示。

$\alpha =$  熱擴散係數，以  $m^2/s$  表示。

$t =$  時間，以 sec 表示。

和

$$I(y) = -C - \ln(y) + \frac{y^2}{2} - \frac{y^4}{8} + \dots \dots \dots (3)$$

此處  $C$  是一常數。如果  $y$  很小；這意謂著  $r$  很小，在此情況下方程式(3)第三項(含)以後的值可以忽略不計，則方程式(2)可以寫成

$$T = \frac{Q}{2\pi k} [-C - \ln(y)] \dots \dots \dots (4)$$

如果我們可以知道兩個不同時間( $t_1$  和  $t_2$ )的不同溫度( $T_1$  和  $T_2$ )，則上式可以寫成

$$T_2 - T_1 = \frac{Q}{4\pi k} \times \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \dots \dots \dots (5)$$

在方程式(5)中  $r$  和  $\alpha$  並沒有出現，剩下的獨立變數只有溫度、時間與輸入電力。如果我們知道上述那些獨立變數，則熱傳導度  $k$  可以利用下式求得：

$$k = \frac{f \cdot I^2 \cdot R}{4\pi} \cdot \frac{\ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right)}{T_2 - T_1} \dots\dots\dots(6)$$

其中 f 是一校正因子(Lin 和 Hsieh, 1996)，I 是通過加熱線的電流強度以 A 表示，R 是加熱線的電阻以  $\Omega/m$  表示。

## (二)材料與方法

熱傳導度探針的示意構造圖如圖一所示。其為一類似針的東西外徑大約是 0.66mm，長度大約是 39mm，內部裝有熱電偶線和加熱線。而整套熱傳導度測量實驗的儀器配置圖如圖二所示。本實驗以甘油作為標準物質對熱傳導度探針進行校正，並以黃豆分離蛋白(Supro 620, Protein Technology International, St. Louis, MO, USA)為食品原料，為了得到高水份含量的黃豆分離蛋白，蒸餾水將被緩慢的加入且將其混合良好，將混合完全的黃豆分離蛋白裝入密封的塑膠盒內儲存於冰箱冷藏保存 24hr 使其水份達成平衡狀態，在決定其最終水份含量(Helrich, 1990)。樣品的密度是經由充填樣品進入容器時力量大小之不同，而得到一密度範圍，而此力的大小可以利用物性測定儀來決定，最後樣品的密度是經由樣品的質量除以樣品容器的體積而得到。為了測得樣品的熱傳導度，樣品將被放入一特製的樣品容器內並加以鎖緊，以防止在加熱過程中水份因蒸發而流失(Wang 和 Hayakawa, 1993)。其步驟如下將熱傳導度探針插入食品內，然後將探針和食品一起放入一溫度控制槽(25~95°C)，當整個系統達到所預定的溫度時，啟動直流電源開關，經由溫度記錄器(Data logger) 得到溫度和時間之關係，將 T 對  $\ln(t)$  圖上的直線部分，利用線性迴歸分析法求得其斜率(S)，此迴歸分析的  $R^2$  必須大於 0.99，則方程式(6)計算出該食品之熱傳導度( $k=fI^2R/4\pi S$ )。

## (三)自動化建立

整個系統自動化的步驟如下，

1. 經由電腦介面啟動直流電源，在此同時電流加熱探針內的加熱線，
2. 記錄並儲存電流值(以安培計)和電壓值(以伏特計)，
3. 利用 Data acquisition 記錄溫度和時間的變化，
4. 正確決定溫度與  $\log(\text{時間})$  圖形上的直線部份，
5. 當溫度超過設定極限時關閉直流電源，
6. 利用最小平方法決定直線部份的斜率，
7. 計算熱傳導度值並列印結果。

## (四)結果與討論

表一為甘油在室溫下進行熱傳導度測量時，溫度與時間之關係，顯示隨著時間的增加溫度先快速的增加進而慢慢的緩緩增加。圖三為溫度與時間對數之關係圖為一直線其斜率等於 2.6752 而  $R^2$  高達 0.999，其熱傳導度值為 0.2934W/mK。重覆實驗 10 次得到甘油之熱傳導度平均值為 0.293W/mK，和文獻上甘油之熱傳導度值(0.284W/mK)比較，兩者的誤差為 3.2%，此值在 5%以內為一般應用上可以被接受的。在完成自動化之後，利用此裝置測量黃豆分離蛋白之熱傳導值。粉

末狀的黃豆分離蛋白被製備成不同水份含量(20~40%)與密度(300~600 kg/m<sup>3</sup>)的樣品，利用熱傳導度探針法來測量其在不同溫度(25~95°C)下之熱傳導度。在整個實驗範圍熱傳導度值從 0.056 到 0.156W/mK，和文獻上之熱傳導度值比較亦在合理的範圍內。證明此套裝置可以用來快速決定食品之熱傳導度值。

#### (四)參考文獻

ASTM 1985. Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. ASTM C 177-85. American Society for Testing Materials, Philadelphia.

Helrich, K. (Ed.) 1990. "Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist," Association of Official Analytical Chemist, Inc., Arlington, VA.

Hooper, F.C. and Lepper, F.R. 1950. Transient heat flow apparatus for the determination of thermal conductivities. Heating, Piping and Air Conditioning, 22(8) : 129-135.

Lentz, C.P. 1952. A transient heat flow method of determining thermal conductivity ; application to insulating materials. Canadian Journal of Technology, 30 : 153-156.

Lin, Y. and Hsieh, F. 1996. Measurement and prediction of apparent thermal conductivity of plastic foam with or without biomass materials. Applied Mechanics and Engineering, 1 (3) : 465-480.

Murakami, E.G. and Okos, M.R. 1988. Measurement and prediction of thermal properties of foods. In "Food Properties and Computer-Aided Engineering of Food Processing Systems," (ed.) R.P. Singh and Medina, A.G. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands.

Nix, G.H., Lowery, G.W., Vachon, R.I. and Tanger, G.E. 1967. Direct determination of thermal diffusivity and conductivity with a refined line-source technique. Progress in Aeronautics and Astronautics : Thermophysics of Spacecraft and Planetary Bodies, 20 : 865-878. Academic Press, New York.

Sweat, V.E. 1986. Thermal properties of foods. In "Engineering Properties of Foods," (Ed.) Rao, M.A. and Rizvi, S.S.H. Marcel Dekker, Inc. , New York.

Tong, C.H., Sheen, S. Shah, K.K., Huang, V.T. and Lund, D.B. 1993. Reference materials for calibrating probes used for measuring thermal conductivity of frozen foods. Journal of Food Science. 58:186-192.

Wang, J. and Hayakawa, K. 1993. Thermal conductivities of starch gels at high temperatures influenced by moisture. Journal of Food Science, 58, 884-887.

表一甘油內部中心點溫度隨時間變化的情形

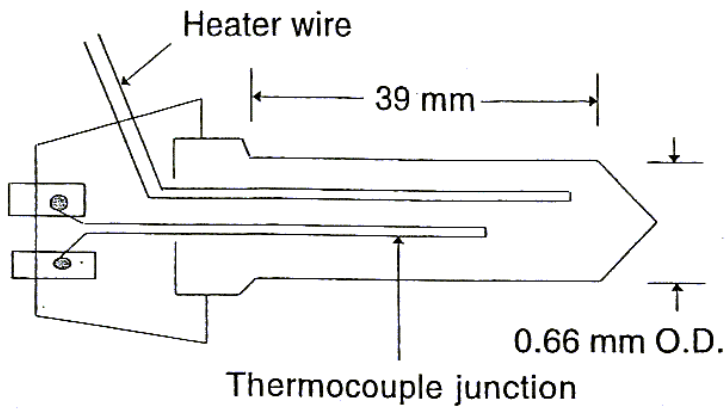


Figure 1. Cross-sectional view of thermal conductivity probe.

時間, 秒	溫度, C
0	21.2
5	28.4
10	30.3
15	31.4
20	32.1
25	32.8
30	33.3
35	33.6
40	34
45	34.3
50	34.6
55	34.8
60	35
65	35.3
70	35.5
75	35.6

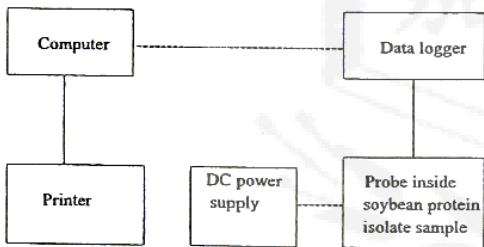


Figure 2. Experimental arrangement for the thermal conductivity measurement using the probe method.

Fig. 3. Temperature versus logarithm time relationship for a glycerol.

