

# 八十六年度行政院國家科學委員會專題研究計畫

## 多彩的熱流傳遞現象

Colorful Visualization of the transmission of Heat Flow

計畫編號：NSC 86-2515-S-002-001

執行期限：86年4月1日至87年7月31日

主持人：陳炳輝 教授 台灣大學機械工程學系

### 一、中文摘要

本計畫建立一套實驗系統，採用液晶(Liquid crystal)作為量測溫度之工具，利用液晶隨著不同溫度變化而呈現不同顏色之特性，將溫度以色彩呈現出來，使得溫度除了量測獲得外，還能以視覺觀察，增進人們對熱之性質的了解。實驗過程以三組不同的測試方式，介紹參觀者認識熱的三種傳遞方式：熱傳導、熱對流及熱輻射。所建立的實驗設備，更可讓參觀者自己動手組裝測試件，實際操作整套實驗之流程，提升科學實驗的樂趣。而在實驗中所觀察到的熱量傳遞現象，也能知道不同的測試材料，由於不同的熱傳導係數值，對於熱量傳遞所造成的影響也會有所不同，增進參觀者了解材料與熱量傳遞之間的關係。

關鍵字：熱傳導、液晶、教學實驗

### Abstract

The present study established an experimental system to visualize the temperature variation of test pieces through the color change of coated liquid crystal. This colorful demonstration will help the viewers to understand the different modes of heat transfer, include conduction, convection and radiation. In addition, the design of the

experimental system allows the viewers to assemble the test pieces and also, change the heat transfer modes without any difficulty. These hand-on operation will increase the interest of viewers to take part in this scientific experiment. Besides, the viewers can also learn about how the material properties and heat transfer modes affect the temperature distribution of test pieces.

Keyword: heat conduction, liquid crystal, educational experiment

### 二、計畫緣由與目的

熱的傳遞方式有三種，分別是傳導、對流及輻射。除了輻射外，其餘兩種都是以擴散方式來傳播熱量，亦即熱傳量與溫度上升或下降的梯度成正比。然而對於熱的認識，通常只能藉由溫度的量測或是人體對溫度的感覺，知道何處高溫，何處低溫，但對於熱量在物體內部的傳播情形，如水平傳播或是拋物線形式傳播，何處傳的慢，何處傳的快等，則無法清楚的知道。因此本計畫建立一套系統，將熱在物體內部的傳播以色彩具體的表現出來，讓參觀者能觀察到熱的流動。

本實驗採用液晶作為量測溫度之工具 [1]，利用液晶隨著不同溫度變化而呈現不

同顏色之特性，將溫度以色彩呈現出來。在實驗過程中，操作者也可以藉由觀察到的現象，了解不同的材料性質，會有不同的傳熱特性。

對於熱在物體內部的熱傳導特性，可以由傅立葉定律(Fourier's Law)[2]加以說明，其形式為

$$\vec{q} = -k\nabla T \quad (1)$$

式中  $k$  為材料的熱傳導係數(Thermal Conductivity)。由式(1)中可以看到，如果  $k$  值或溫度梯度愈大，則材料內部傳遞的熱通量就愈大。以一維的熱傳導現象來簡化傅立葉定律，便於說明熱傳導的理論模式。對於一維的熱傳導，傅立葉定律寫為

$$Q = q \cdot A = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L}(T_0 - T_L) = \frac{T_0 - T_L}{L/kA} \quad (2)$$

為了增進對式(2)物理現象的認識，將式(2)與電路上的歐姆定律( $I = \frac{V}{R}$ )加以比擬，可得到相對應的關係。設  $R_t = L/kA$ ，其中  $R_t$  為熱阻(Thermal Resistance)。在歐姆定律中，若電阻  $R$  小，則表示電子較易通過導線，也就是導線上的電流較大。對於熱傳而言，當材料的熱阻  $R_t$  較小(即表示材料的  $k$  值較大)時，熱通量  $Q$  則愈大。此外在一並聯電路中，電阻不同會造成在各電阻中之電流不同，而電位差則是相同的，與熱傳系統類比，可以知道，在一穩態的系統下，材料之不同只會影響通過的熱通量大小，但其溫度分佈應該是相同的。再將傅立葉定律配合能量守恆方程式，可得到熱傳導方程式

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3)$$

式(3)中  $r = k/\rho c_p$  為熱擴散係數(Thermal Diffusivity)。若  $r$  愈大，表示熱在材料內部的傳遞速率愈快，也就是溫度上升較快，

由實驗過程中即可觀察到溫度變化速率快慢的不同。

除了觀察材料表面溫度的變化外，還可經由式(2)推算通過材料內部熱通量的大小。把式(2)以電路的方法加以估計

$$q = \frac{Q}{A} = \frac{T_0 - T_L}{L/k} \quad (4)$$

若測得材料任意兩端的溫度差( $T_0 - T_L$ )，所選取兩端的距離  $L$ ，以及材料的熱傳導係數  $k$ ，由式(4)便可大概估算單位面積通過材料內部的熱通量  $q$  的大小，其值可與電源供應器所提供的能量( $Q=IR$ )相比對。但由於電源供應器所提供加熱材料的能量，會經由熱對流及熱輻射的方式，散失到周圍的環境中，因此式(4)所算得的  $Q$  值會較電源供應器提供的  $Q$  值來得小。

實驗過程中，進一步利用燈泡取代加熱片，作為材料的加熱源，使燈泡所放出的熱量，經由熱輻射傳到材料表面，促使材料表面的液晶變色，以觀察不同的熱量傳遞方式。而在三組實驗中，取一組加裝風扇，利用風扇吹出氣流，對受熱的材料進行降溫，考慮冷氣流帶走材料的熱量，對材料表面液晶變色速率的影響，了解熱對流的物理模式。

在一連串的實驗中，參觀者都可以自己動手進行測試材料的組裝，實際操作整個實驗流程，認識科學實驗 Just do it 所帶來的樂趣，去除對自然科學實驗刻板的印象。

### 三、結果與討論

本套實驗設備的建立，如圖 1 所示，包括了材料測試架、測試件、底座、溫度控制器、加熱片、熱電偶、風扇及電源供應器等。設備中所需的元件，除了無法自行設計製作，且不是實驗中所要表達的目的外，大多由同學自己動手設計、組裝、

架設。如材料測試架之設計，與所選用製作的材料；或是溫度控制器外罩之設計與線路之連接等等，符合本計畫科學實驗教學實作之目的。圖 2 則為材料測試架之細部尺寸設計圖，所有尺寸標示之單位均為 cm。

由於本實驗是利用液晶顏色來顯示溫度，首先必須要知道液晶受熱後在何種顏色下表示的溫度是幾度。由於不同種類的液晶顯色時的溫度未必相同，本實驗所採用的液晶型號:BMIR38C5W/C17-10。實驗之前，先針對塗在測試件上的液晶進行溫度校正實驗，校正是利用液晶隨溫度變化的色度(Hue)來進行。實驗設備架設完成後，開始進行液晶的校正。由於實驗進行中必須以黑色當作背景顏色方能清楚的觀察到液晶變色的情形，故校正時擺上一片塗有黑漆為背景顏色且鍍有液晶的銅片在加熱器上，銅片上埋有經校正過的 T 型熱電偶線(Thermocouple)來量測銅片的溫度，再以加熱器均勻緩慢的改變銅片的溫度，再透過與暫態液晶實驗相同的影像處理設備(LCIA)與影像擷取卡的驅動程式，即可讀出某特定顏色下的溫度值。本實驗所校正的液晶溫度，紅色時為 35°C，綠色為 36°C，藍色為 40°C，透明(即看到測試件表面黑漆的黑色)時為 40°C 以上。

本實驗所使用的液晶隨著物體表面溫度的上升而看到液晶顏色變化的情形為先由原本的黑色(因液晶本身為透明，故為黑漆的顏色)變成紅色、綠色、藍色再變回黑色，而且液晶顏色對於溫度變化的反應是具有恢復性的，也就是說當物體表面溫度下降時，所觀察到的液晶顏色又會由黑色變為藍色、綠色、紅色最後又

回到黑色，而且液晶校正的溫度並不會因為變色過而改變，所以在正常操作下，液晶是可以多次重複使用的。另外，液晶顯色時的溫度與觀察時的角度、光線的亮度與方位等均有絕對的關係，故校正所得到顏色與溫度的對應均為大約值，而其誤差約 1~2°C。

實驗中所用的測試件共有五種，分別是鋁合金、黃銅、銅合金、不銹鋼及壓克力。選用這五種材料主要是因為日常生活中較常見到，且互相之熱傳導係數差異頗大，較易觀察。本計畫另外設計製作了二個看板，說明實驗之原理及流程，以便讓參觀者能夠在操作本套實驗設備時，也能同時了解實驗的原理及目的。

整個實驗的流程如下：

1. 將 5 片不同材料的測試片並列，架在材料測試架上。
2. 設定溫度控制器之加熱溫度約 70°C，並打開溫度控制器開關，開始加熱測試件。
3. 觀察不同材料在相同的溫度梯度驅動下，其表面液晶顏色變化的快慢，可明顯比較出  $k$  值較大，熱擴散係數也較大的材料，在相同截面積與溫度梯度下，其熱傳速率越快，液晶顏色之變化也越迅速。
4. 當系統達到穩態時，可以看到雖然材料不同，但其溫度分佈應該是相同的，材料的不同只會影響通過的熱通量大小。
5. 由所量得的溫度分佈與電源供應器所供應的能量，反推得到材料之熱傳係數  $k$ 。可以發現所得到的  $k$  值較材料之  $k$  值為大，是因為計算直接採用電源供應器提供的能量，並未考慮到材料表面之輻射

與對流熱散失。

#### 四、計畫成果自評

本計畫主要是介紹熱的傳遞方式，及將熱的傳遞過程以顏色表示出來。目的是讓參觀者親自動手操作整套設備的實驗流程，增加大眾對科學實驗的興趣。並且經由實驗之過程，使大眾了解材料的熱傳導與傅立葉定律之間的關係。而採用不同的材料進行實驗，進一步的說明不同的材料傳熱雖然有快慢之差別，但並不會造成溫度分佈之差異，只會影響通過材料的熱通量大小。

綜合上述，本計畫的結果可以提供下列幾項要點：

1. 為何會有熱量的傳遞。
2. 熱量傳遞的方式有幾種。
3. 材料的性質對熱量傳遞的影響。
4. 如何估算熱量。
5. 何為液晶，它有什麼樣的特性。

本計畫為國科會科教處『科學實驗活動設計計畫』之一，計畫執行重點即在於培養及提昇大眾對科學之興趣，並在計畫執行過程中，培養本土科學實驗或活動設計之人才。本計畫由設計構想到設備之組裝完成，均有大學部的同學全程參與，對於國科會此次計畫執行之目的均已達到。由於本計畫之成品主要用在展示，展示之對象為參觀之民眾，並配合國民中小學之教學單元，供作教學實驗，故並非學術研究之成果。若將整套實驗稍作修改，體積縮小化，則可將實驗設備製作成玩具商品，推廣至一般家庭中，落實科學教育之根基。

#### 五、參考文獻

1. J.L. Hay & D.K. Hollingsworth, "A Comparison of Trichromic Systems for Use in the Calibration of Polymer-Dispersed Thermochromic Liquid Crystals", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1996.
2. J.P. Holman, "Heat Transfer", 7ed., McGraw-Hill, 1992.

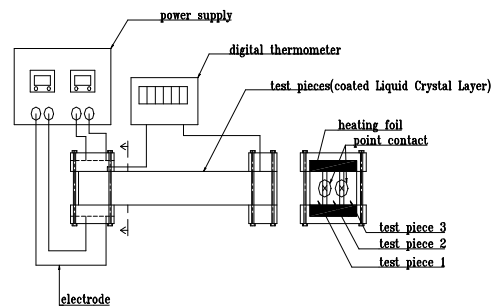


圖 1 實驗設備示意圖

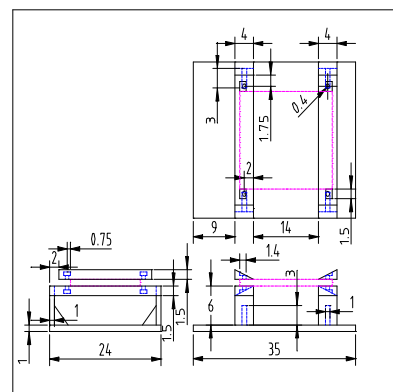


圖 2 材料測試架細部尺寸設計圖