

## 對固體表面加熱之液晶熱像熱傳實驗方法

吳佩學 劉家榮 賴祐民

大葉大學機械工程研究所

彰化縣大村鄉山腳路 112 號

### 摘要

本研究基於對固體表面加熱之液晶熱像法的基本理論，建立了一套熱傳實驗系統與數據約化程序，並採用穩態實驗方法與對固體表面單步級加熱之暫態實驗方法，以具有前端未加熱長度的平板流，以及繞越長圓柱之橫向流進行實驗。結果顯示，利用穩態方法以及對固體表面單步級加熱之暫態方法所得之平板流局部熱傳係數結果與理論值吻合相當良好，充分確認了新建熱傳實驗系統軟體之正確性。繞越長圓柱之橫向流，利用新建之熱傳實驗系統進行實驗，所得之局部紐塞爾數結果與文獻上之數據比較，也非常合理。

最後輔以不準度分析之結果，將本研究之對固體表面加熱法與一般常用的對氣體步級加熱之暫態方法之優劣進行比較。

**關鍵詞：**液晶熱像法，穩態方法，暫態方法，步級加熱

## An Experimental Heat-Transfer Method Using Liquid Crystal Thermography with Surface Heating

PEY-SHEY WU, CHIA-JUNG LIU and YOW-MIN LAI

*Graduate School of Mechanical Engineering, DaYeh University*

*No. 112, Shanjiiao Rd., Dacun, Changhua, Taiwan 51591, R.O.C.*

### ABSTRACT

An experimental heat-transfer system as well as a data reduction procedure was established in this study on the basis of the fundamental theory of liquid crystal thermography with heating at the solid surface. The system was tested by using both the steady-state and the transient methods with single-step heating at the surface. Two problems considered in the test were the flow over a flat plate with an unheated starting length and a uniformly heated cylinder in the cross flow. Both the steady-state and the transient experimental results of the local heat-transfer coefficients from the flat-plate problem agreed well with the analytical solution, thereby confirming the validity of the new system. The local Nusselt numbers in the cylinder-in-cross-flow problem obtained from the steady-state experiment also compared reasonably well with those in the literature.

An uncertainty analysis was also conducted to compare the present liquid crystal technique with the transient step-heating method in the gas temperature, which is now widely used.

**Key Words:** liquid crystal thermography, steady-state method, transient method, step heating

## 一、簡介

在對流熱傳問題的研究上，獲得固體表面局部熱傳係數分佈乃是最主要的工作。有了局部熱傳係數分佈後，固體面的平均熱傳係數值可以容易的求到。這些局部與平均熱傳係數值乃是設計者在設計散熱系統的重要參數依據。然而對於有複雜幾何形狀的物體，其表面熱傳係數之分佈非常不容易量得。早期為了量得熱傳係數分佈，Han 等人 [4] 曾採用了大量的熱偶來量測壁面溫度分佈與流場溫度，其測試件之準備與數據收集均甚為耗時。後來由於質傳技術的發展，使得全面熱傳係數的量測有了進一步的突破 [3]，然而質傳技術中量測萘 (naphthalene) 的揮發厚度對複雜的幾何面也甚為困難。自從 1985 年 Ireland 與 Jones 首先成功地將液晶技術及暫態熱傳方法應用於氣渦輪機葉片之熱傳研究後，液晶技術（或液晶熱像法）已引起熱傳研究人員的高度興趣與注意，其方法之理論與實做要點後來詳記於 Ireland 等人 [7] 之著作中。因為該技術之操作簡單、方便、精確、時間成本較低，不但可以提供全面性、詳細的熱傳係數分佈，而且對於複雜的幾何形狀也可適用。它是屬於一種非破壞性的溫度量測技術。Moffat [9] 於 1990 年即預測「液晶技術對熱傳實驗的衝擊將導致未來十年熱傳研究方法的重大改變」。目前除了氣輪機之熱傳研究外，其他如散熱片、電子电路板等氣相熱傳之研究以及醫學上的應用等，液晶技術也被廣泛受到矚目。

一般常用的液晶熱像法乃採用對流體步級加熱的暫態實驗方式，其最大優點在於測試模型可以有複雜的表面幾何形狀。然而該方法尚有一些問題存在。首先，在一均溫的模型測試區內突然導入不同溫度的氣體，無論是利用快速轉向閥或瞬間加熱器，都將使流場雷諾數有明顯的改變，甚至壓力波的產生，這些因素對於“熱傳係數不隨時間變化”之假設，其影響程度仍然未知。再者，瞬間轉向閥或瞬間空氣加熱器之設備費用也較高，尤其當模型尺寸較大或空氣流量大時，耗資尤鉅，不適用於一般實驗室之推廣使用。

本研究之目的乃在建立一套利用對固體表面加熱方式之液晶熱像熱傳實驗系統，並分析方法之優劣，以期提供熱傳研究人員進行實驗研究的一項有力工具。

## 二、對固體表面加熱之液晶熱像實驗方法理論

使用液晶於穩態或暫態的熱像法 (thermography) 實驗中，液晶所扮演的角色乃是當成實驗模型表面溫度  $T_w$  之指

示計。而在對流熱傳中一般最值得關心的是局部熱傳係數的分佈。局部熱傳係數之定義為

$$h = \frac{q}{T_w - T_{ref}} \quad (1)$$

其中  $T_{ref}$  為適當的流體參考溫度，例如在一般邊界層流可取為自由流之流體溫度  $T_\infty$ ，在內部流則取容積平均溫度  $T_b$ ，在高速流或膜冷卻 (film cooling) 的問題則應取絕熱壁溫 (adiabatic wall temperature)  $T_{aw}$ 。以下就液晶熱像法包含穩態方法 (steady state method) 與暫態實驗方法 (transient experimental method) 的基本理論分別論述。

### (一) 穩態熱傳實驗

在文獻中穩態方法的使用大多配合一表面加熱器使用，以提供一均勻的表面熱通量  $q$  (如 Moffat [9], Hippensteele 等人 [5])。部分學者稱此方法為均勻熱通量方法 (uniform heat flux method)。表面加熱器通常為一薄金屬層。該層通以適當的電流，可提供均勻壁面熱通量的邊界條件，同時，液晶在壁面顏色的分佈則顯示出等壁溫線。有液晶顯示壁溫值 ( $T_w$ ) 的地方，其局部熱傳係數值  $h$  則可由 (1) 式求得。為了求得整個壁面的熱傳係數分佈，在進行穩態實驗的過程中，需依序調整  $q$  的值，使得液晶之等溫線在每一處均顯示過。由於每調整一次  $q$  的值，要讓液晶顯示之等溫線移動到穩定的位置，需等待一段時間。因此，穩態實驗方法雖然操作簡單，實驗所需設備也不複雜，但整個實驗卻甚為耗時。

除了耗時以外，穩態實驗方法尚有以下缺點。首先，加熱金屬不可使用厚層材料，因為它使熱傳的分析更為複雜而困難，尤其是當固體內溫度梯度大時引起沿著金屬層方向之熱傳導難以估算。因此加熱金屬層愈薄愈好，以減少實驗誤差。一般微米級厚的金屬層可用薄膜技術 (thin-film technique) 製作。但是當模型之幾何形狀複雜，尤其是有曲率變化大的表面，使用薄膜技術所沉積出來的金屬薄層之厚度難以均勻，這將影響“均勻壁面熱通量”的假設，進而影響局部熱傳係數的精確度。另外一方面薄金屬層藉由電產生的焦耳熱有多少比例是真正傳入流體以及有多少熱散損失也是需要估算的問題。儘管如此，穩態方法的不準度一般比暫態方法來得低 [1]。

### (二) 對固體表面加熱之暫態熱傳

對固體表面步級加熱之基本對流熱傳問題為如圖 1 所

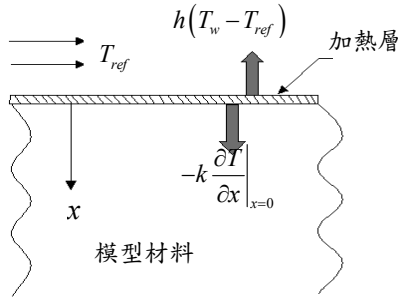


圖 1. 對固體步級加熱之暫態熱傳基本問題

示之半無窮區間的一維熱傳導，此方法必須在固體表面製造加熱層以加熱固體用。假設模型之材料厚度足以模擬成半無窮區間，起初模型維持在  $T_{w,i}$  的均勻溫度，在時間  $t=0$  時金屬層產生的焦耳熱其熱通量已知為  $q$ 。如果只是單步級加熱，在忽略輻射之考慮下，此一維暫態熱傳導問題可表示如下統御方程式：

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

初值條件：

$$T = T_{w,i} \quad \text{在 } t = 0 \text{ 及 } x \geq 0 \quad (3)$$

邊界條件：

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q - h(T_w - T_{ref}) \quad \text{在 } t > 0 \text{ 及 } x = 0 \quad (4)$$

其中  $\alpha = k/\rho C_p$  為模型材料之熱擴散性 (thermal diffusivity)。該基本問題之解可用 Laplace 轉換法求得 [2]，而壁溫之變化則可令解答式之  $x = 0$ ，假設  $T_{w,i} = T_{ref} =$  定數，則問題之解在固體表面位置為

$$h \frac{T_w - T_{w,i}}{q} = 1 - \exp\left[\frac{h^2 t}{\rho C_p k}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{h\sqrt{t}}{\sqrt{\rho C_p k}}\right] \quad (5)$$

在應用 (5) 式時， $T_{w,i}$ ， $T_{ref}$ ， $\rho$ ， $C_p$ ， $k$  等均應已知，其中  $T_{w,i}$  為模型初始溫度， $\rho$  為密度， $C_p$  為等壓比熱， $k$  為傳導熱傳係數， $T_w$  則為液晶指示之溫度，可由校正曲線得知。因此只要量得熱通量  $q$ ，及加熱時間  $t$ ，則局部熱傳係數  $h$  可用疊代法由 (5) 式求得。

使用複步級加熱（或步級加熱/減熱）的表面加熱方法

已由 von Wolfersdorf 等人 [10] 提出。此法在  $t=0$  時施以一均勻的表面熱通量  $q$ ，模型表面等溫線隨時間之分佈變化仍以液晶觀測之。對每個位置當液晶變化到某特定顏色（如綠色）時，記錄其經過的加熱時間  $t_1$ ，如圖 2（條件： $t_u=25s$ ， $q=2300 \text{ W/m}^2$ ， $T_{ref}=27^\circ\text{C}$ ， $h=50 \text{ W/m K}$ ， $\varepsilon=0.55$ ，使用壓克力固體材料）。經過時間  $t_u$  後，將加熱的電功率降低，使輸出的熱通量為  $\varepsilon q$ ，其中  $0 \leq \varepsilon < 1$ 。此時液晶顯示之等溫線將反方向移動，而在每個位置，液晶將同樣的顏色在不同時間  $t_2$  再顯現一次。此問題之統御方程式及初值條件仍為 (2)，(3) 式，但邊界條件為

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = q - h(T_w - T_{ref}), \quad 0 < t < t_u \quad (6)$$

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=0} = \varepsilon q - h(T_w - T_{ref}), \quad t_u < t \quad (7)$$

以上問題可用 Laplace 轉換求得解。由於  $T_w(t_1) = T_w(t_2)$ ，吾人可得

$$\begin{aligned} & 1 - \exp\left(\frac{h^2 t_1}{\rho C_p k}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h\sqrt{t_1}}{\sqrt{\rho C_p k}}\right) \\ &= \varepsilon - \exp\left(\frac{h^2 t_2}{\rho C_p k}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h\sqrt{t_2}}{\sqrt{\rho C_p k}}\right) + \\ & (1 - \varepsilon) \exp\left[\frac{h^2 (t_2 - t_u)}{\rho C_p k}\right] \operatorname{erfc}\left[\frac{h\sqrt{t_2 - t_u}}{\sqrt{\rho C_p k}}\right] \end{aligned} \quad (8)$$

其中  $0 < t_1 < t_u < t_2$ 。此方法需量測在每一位置液晶達到選擇顏色的變色時間  $t_1$  及  $t_2$ ，輸出功率的切換時間  $t_u$ ，以及加熱

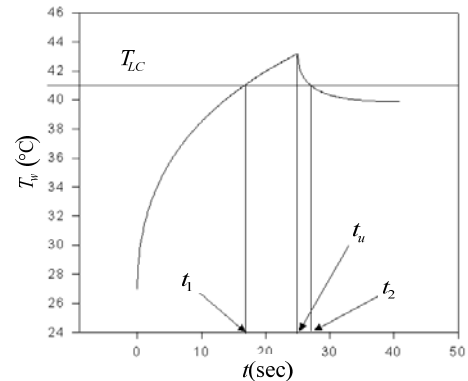


圖 2. 對固體表面步級加熱/減熱之表面溫度變化

輸出功率比 $\varepsilon$ ，配合已知的材料性質 $\rho C_p k$ ，則局部熱傳係數分佈可利用(8)式求出。由於複步級加熱方法中液晶影像數據之後處理甚為複雜，且是基於單步級加熱方法的延伸，因此本研究之目的，旨在自行建立單步級加熱之液晶熱像實驗系統，並探討實驗方法之不準度。

### 三、實驗系統與程序

#### (一) 影像系統

本實驗所使用的影像處理系統 (image processing system) 包括彩色 CCD 照相機，含有計時器、影像擷取卡 (frame grabber card)、及個人電腦 (需有足夠記錄暫態影像資料的記憶體)。彩色 CCD 照相機使用 NTSC 系統及 DC12 的電源供應，像素 (pixel) 數目為 640 (H)  $\times$  480 (V)，將影像直接在螢幕上顯示。影像擷取卡最快擷取速度每秒 30 張，並可以將實驗過程中液晶顏色之變化作真實時間 (real time) 的記錄，且將影像數位化，將標準的 RGB (red, green, blue) 訊號轉成 HSI (hue, saturation, intensity) 訊號。

本實驗除了需將相機光圈、快門的設定，在液晶溫度校正與熱傳實驗保持一致外，相機與模型之距離及鏡頭焦距所造成的像素與實際尺寸之比值也需校正。此校正對於大模型影像接合時尤其重要。一般此校正均以已知尺寸的網格貼附或蝕刻在模型上做為辨認位置的依據。本實驗利用網格線之校正結果為 0.24mm/pixel。

#### (二) 測試平板及圓柱

測試平板模型是以壓克力為材料，前端具有未加熱起始長度 (unheated starting length) (在  $0 \leq x \leq \xi$  區間  $T_w = T_\infty$ )，其問題型態如圖 3 所示。平板厚度為 15mm，在暫態熱傳實驗的短暫時間 (< 60 秒) 中，足以當成半無窮大之區間。平板表面黏一層 0.014mm 厚之鋁箔當成加熱層。為了要增加鋁箔之電阻，將其分割成 11 段串聯，每段 10mm，而分割的劃線恰也可以做為座標位置之觀察。鋁箔上方再依序噴塗黑漆與液晶。

為了測試本實驗方法對具有曲率之表面的適用性，本研究也進行了橫向流跨越長圓柱之實驗，圓柱之直徑為 6cm，其表面加熱及液晶塗層方式與上述測試平板的情形相同。測試平板與圓柱所需的均勻穩定流由一個 306mm $\times$ 306mm 的矩型風洞提供。在測試時，測試平板與圓柱均懸浮在流道截面中央位置。

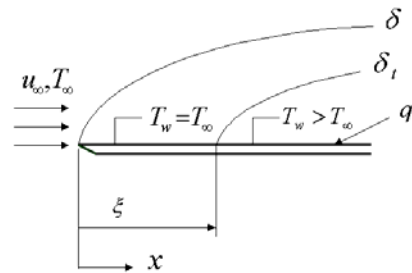


圖 3. 具未加熱起始長度的平板流

#### (三) 電源供應系統

由於加熱層只是在固體表面，因此所需加熱電功率比對氣體加熱之方式節省極多，對於小而不複雜的模型，表面加熱法更是易行而經濟有效。

本實驗使用 Chroma 公司的電源供應器 (power supply)，輸出電壓為 0~15V，輸出電流為 0~20A。控制電源供應器是以 PCI-GPIB 介面卡及 IEEE-488 傳輸線，由 PC 控制其輸出電壓值或電流值，傳輸到測試平板的加熱片上。本實驗採用定電流輸出控制。

#### (四) 氣體溫度量測

本實驗使用 Cole-Parmer 公司 K type 的表面熱偶器量測測試平板壁面溫度。將熱偶貼在鋁箔紙加熱層的上方，黑漆的下方，作為校正液晶溫度之用。量測流場的溫度也是使用 K type 熱偶線，作為量測自由流的溫度。使用 Computer Boards 公司所生產的數據收集機 (data acquisition unit) 來收集溫度，這是以 CIO-DAS08 作為數位和類比的 I/O (input/output) 介面卡，外接一台 CIO-EXP16 作為收集熱偶溫度訊號之用。

#### (五) 電壓、電流與電阻之量測

表面加熱層所用之電壓、電流與電阻之量測是使用 Hwelett-Packard 公司的 HP34401A 萬用電表，由於測試平板上的鋁箔紙電阻不大，約 0.24 歐姆 ( $\Omega$ )，所以利用四線 (four wire) 電阻量測法以避免接觸電阻之影響。並將電流線裝置在測試平板旁的銅塊上，作為觀察測試平板受熱時電阻改變的情形，並可由電源供應器輸出電壓、電流的大小及量測不同線路之壓降，估算出接觸電阻與線路電阻之大小，從而得知加熱片之真正電阻。

#### (六) 照明設備

照射光的選用必須要不會對測試模型加諸太多的輻射熱。Ireland 等人 [7] 建議使用一般的日光燈照明，因其所

含之紅外線光譜較低。再者，因為液晶長期使用受紫外線照射後，校正曲線會有偏移，因此平常無進行實驗之時間應對液晶做防光的保護。本實驗採用的照明設備是使用 4 支 60W 旭光公司的日光燈管，架設在平板測試區之正上方，CCD 相機則置於中間，正對著測試平板方向。風洞四周則裝置黑色的窗簾布，以隔絕外界的光源，使液晶所顯現的顏色不會受到外界光源的影響。

### (七) 實驗程序

穩態實驗之實驗程序已於前面提及，以下則針對固體表面加熱之暫態實驗程序加以描述。

本實驗是以 LabView 軟體控制整個實驗過程及系統設備之動作。在實驗的準備過程中，首先將 CCD 相機之焦距及光圈設定好後，做為測試模型之監視器，再設定取像速度、取像張數或取像時間長度。設定好後，取像系統可待命，等待由 LabView 傳送觸發命令進行取像。實驗時，啟動風洞，監視系統溫度，達穩定均溫時即可開始實驗取值。此時由 LabView 控制電源供應器輸出加熱電源，並同時命令 CCD 開始取像，待達到設定的取像張數或時間時，將加熱電源關閉，系統恢復監視狀態。

值得注意的是，整個實驗過程中，流場一直保持穩定狀態，不會有像氣體加熱暫態方法產生雷諾數改變或壓力波之影響，因此局部熱傳係數不會隨時間變化。

### (八) 數據化約

數據化約是為了要得到熱傳係數分佈，最主要的工作即是要對每一個像素 (pixel) 位置解 (5) 式以求得該位置之局部熱傳係數。數據之後處理程式是以 Borland C++ 語言撰寫，求解方法則採牛頓法。當每一個像素位置之局部熱傳係數得知，則吾人可得整個面的對流熱傳係數分佈，亦即所謂全場熱傳係數分佈 (whole field heat transfer coefficient distribution)。

## 四、結果與討論

### (一) 實驗結果與討論

液晶熱像法之首要工作乃是要先完成液晶溫度校正。本研究使用 Hallcrest 公司 R41C1W 的狹溫帶液晶。型號中 R41C 的意思是紅色 (red) 約在 41°C 時可觀察到，而 1W 代表液晶在有色光波長內變色的溫度帶寬 (width) 約為 1°C。利用彩色 CCD 相機直接取得 RGB 後轉成 HSI。本實驗將飽和度 (saturation) 限制在 20~200 的範圍，而光強度

(intensity) 限制在 100~200 的範圍，並應用色調值與溫度之關係於熱傳實驗之數據化約中。利用實驗測試區現場 (in situ) 裝設之燈光、照明等狀況，校正了該液晶 Hue 值與溫度之關係，如圖 4 所示。其中關係近乎成直線的中間部份其顏色之變化較明顯，與文獻之資料相符。由校正圖中取 Hue 值為 97~98 時 (約為綠色) 之溫度為 41.4°C 做為熱傳實驗時之壁溫 ( $T_w = T_{LC}$ ) 指示。廠商提供的資料中綠色從 41.7°C 開始，與校正結果有點差別，可能光學環境有差別之故。

在穩態熱傳實驗中，本研究利用定電流輸出以控制鋁箔加熱片之電功率。當進行表面加熱法實驗時，低熱傳係數之區域會先顯現出液晶顏色的變化。以測試平板為例，當電源供應器輸出電流大到使下游第二段產生所要的穩定色調值時才開始取值，取值後再提高輸出電流並待溫度及液晶顏色穩定下來，再取值。如此逐步的取到平板前端第二段的數據。為了避免邊界造成的三維影響，熱傳數據僅在二維區域做化約。

在對固體表面單步級加熱的暫態實驗測試上，本研究採 60 秒為實驗取值的時間長度。CCD 擷取的影像數據用於熱傳係數之計算，主要是對每一個固定像素位置取其達到液晶校正溫度 ( $T_{LC}$ ) 之時間，而這時間乃是由液晶影像之編號 (frame number) 換算而得。在取像過程中，只要該點位置在所有的影片中，第一次出現所要液晶溫度的時間給予記錄，而以下該點位置的時間則不再予以記錄。

將測試平板每一分隔段在同樣垂直流向之位置 ( $y=270$  pixels) 取一個代表數據，以二維圖形表示。所得結果與穩態實驗及理論分析值比較如圖 5 所示。該圖顯示，穩態與暫

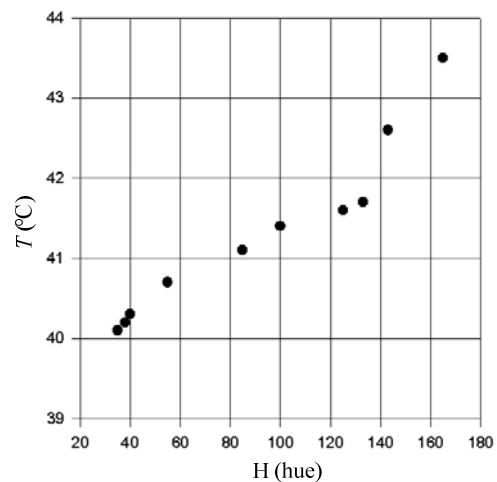


圖 4. 液晶溫度對色調值之校正圖

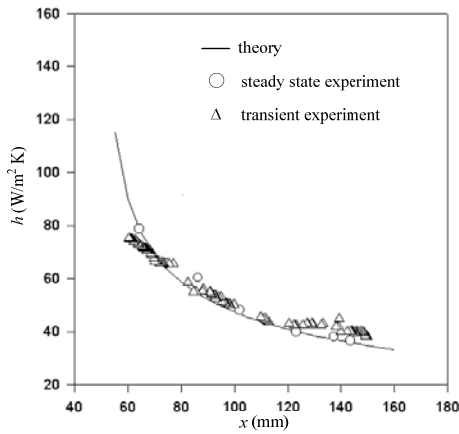


圖 5. 對固體表面單步級加熱暫態實驗及穩態實驗之結果與理論值之比較

態實驗之結果均與理論值吻合。而固體表面單步級加熱，對於熱傳係數值小而平的下游區域，由於受限於記憶體之容量，取像速度尚不夠快 (5 frames/sec)，暫態實驗結果數據稍成階梯狀。在靠近加熱區前端， $x = 50\text{mm} \sim 60\text{mm}$  處，理論熱傳係數值雖隨  $x$  減少而急遽上升，但實際上會有二維熱傳導的影響，情形並不會如此。

在測試圓柱的穩態熱傳實驗中，因表面有曲率之故，所以利用下式計算出所在位置 ( $x$ ) 與相對角度 ( $\theta$ ) 之關係式為

$$\theta = \cos^{-1} \frac{x}{r} \tag{9}$$

其中  $r$  為半徑，所得在圓柱長度一半位置沿著圓周方向之圓柱表面局部熱傳係數以紐塞爾數 ( $Nu$ ) 表示之。本實驗風洞之風速為  $17\text{m/s}$ ，得到  $Re_D = 0.63 \times 10^5$ ，其結果與 Kays 等人 [8] 之數據比較，如圖 6 所示。在實際實驗上，不同角度會因光源的照射，而造成液晶溫度校正曲線的變化，但因狹溫帶液晶所受到之影響遠比寬溫帶液晶小，故本實驗假設此項考慮因素，可以忽略不計。另外，由於燈光反射之影響，在  $\theta = 90^\circ$  之附近均無法取到影像數據。

(二) 最大與最佳不準度分析

為了進一步瞭解本研究所使用之對固體表面加熱法與一般常用的穩態實驗方法以及對氣體步級加熱之暫態實驗方法之優劣，以下採用最佳不準度的分析來作比較。這裡所使用的分析方法是採最大不準度 (worst case combination) 估算法。

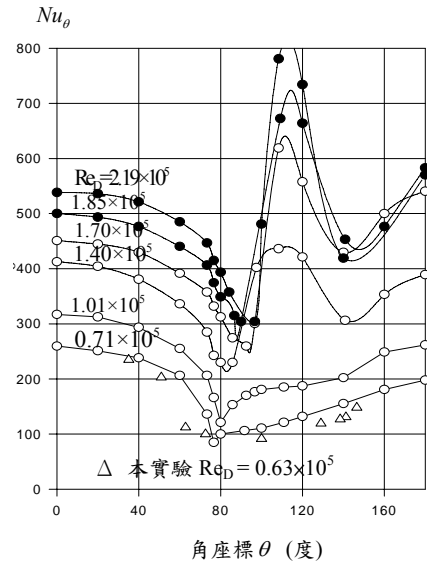


圖 6. 圓柱穩態實驗結果與 Kays 與 Crawford [8] 之比較

若令實驗結果函數為  $f(a_1, a_2, a_3, \dots, a_n)$ ，但真實函數為  $f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ ，則產生的最大誤差為

$$\Delta f = \sum_{i=1}^k \Delta a_i \left| f_{x_{ij}}(a_1, a_2, a_3, \dots, a_k) \right| \tag{10}$$

對於穩態熱傳實驗方法，其計算熱傳係數之公式為

$$h = \frac{q}{(T_w - T_\infty)} = \frac{q}{(T_{LC} - T_\infty)} \tag{11}$$

令實驗計算出來的  $h$  的絕對誤差為  $\Delta h$ ，且令  $(T_{LC} - T_\infty)$  為特性溫度 (characteristic temperature)  $T_c$ ，則可得穩態方法熱傳係數相對不準度如下式

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\Delta q}{q} + \frac{2\Delta T}{T_c} \tag{12}$$

若令熱通量  $\left(\frac{\Delta q}{q}\right)$  與溫度  $\left(\frac{\Delta T}{T_c}\right)$  的相對誤差皆為一定值時，則可得此相對誤差的值為一定值。

對流體步級加熱之暫態熱傳的方法，其不準度分析已由 Hoecker [6] 提出，茲略述如下。將模型表面溫度對時間變化之函數寫成

$$\theta = 1 - \exp \beta^2 \operatorname{erfc}(\beta) \tag{13}$$

其中

$$\beta = \frac{h\sqrt{t}}{\sqrt{\rho C_p k}} \quad (14)$$

假設液晶溫度與自由流溫度與初始溫度之誤差皆相同，定義兩個權重函數  $u$ 、 $v$  及特性時間  $t_c$  分別為

$$u = \frac{2\theta}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \theta} \quad (15)$$

$$v = \frac{1}{2\beta^2} \quad (16)$$

$$t_c = \frac{\rho C_p k}{h^2} \quad (17)$$

配合上述之特性溫度  $T_c$ ，則對流體步級加熱之暫態熱傳對流熱傳係數之相對不準度可寫為下式

$$\frac{\Delta h}{h} = u \frac{\Delta T}{T_c} + v \frac{\Delta t}{t_c} \quad (18)$$

上式中兩個權重函數  $u$ 、 $v$  隨  $\theta$  的變化呈相反的走向，其原因可解釋如下。當  $\theta$  值很小時，若液晶種類選定後，在實驗上即是把  $T_w$  提高，當  $T_w$  提高時，液晶到達變色溫度之時間愈短，造成 (14) 式中  $\beta$  的減小，因而權重函數  $v$ ，(16) 式，隨  $\theta$  之減少呈快速的增加。另一方面，當  $\theta$  大時，在實驗上亦即是要取小的  $T_w$ 。這將使液晶達變色的時間拉長，亦即整個暫態實驗之時間也變長。這使得壁溫變化之速率變慢，液晶在一段時間內會在同一個像素位置顯示同樣有效的溫度數據，因此，當壁溫指示計的液晶必需要夠敏銳，亦即溫帶寬應愈窄愈好，量得的壁溫值才準確，否則誤差變大。而理論上由  $\beta(\theta)$  函數可知  $\beta$  值隨  $\theta$  增加而增加，當  $\theta \rightarrow 1$  時，此值快速增至  $\infty$ ，因而權重函數  $u$ ，(15) 式隨  $\theta$  增加而增加。由於 (18) 式中造成  $h$  相對不準度之兩項權重函數隨  $\theta$  之變化呈相反之趨勢，因而吾人可預期應該有最佳的  $\theta$  值可茲選用。將 (18) 式對  $\theta$  做圖可得圖 7，此圖乃以  $\Delta t = 1/30 \text{sec}$  模擬 Hoecker [6] 之結果。結果顯示：1. 對流熱傳係數之相對不準度隨  $h$  值增加而增加；2. 對每一固定  $h$  值有一個最佳的  $\theta$  值使得相對不準度為最小，該相對不準度之值稱為對應於該  $h$  值之最佳不準度；3. 發生此最佳相對不準度之  $\theta$  值隨  $h$  之增加而增加。

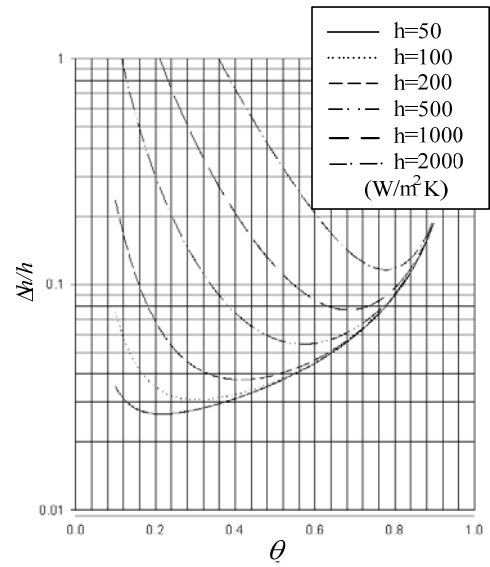


圖 7. 對流體步級加熱之暫態方法對不同  $h$  的不準度結果

本研究對固體表面單步級加熱之暫態熱傳方法不準度分析如下。將模型表面溫度對時間變化寫成

$$\theta = \frac{h(T_{LC} - T_i)}{q} = 1 - \exp \beta^2 \text{erfc}(\beta) \quad (19)$$

令

$$u = \frac{\theta}{\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \theta}, \quad v = \frac{1}{2\beta^2} \quad (20)$$

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta q}{q} = \frac{\Delta C}{C} \quad (21)$$

則對流熱傳係數相對不準度之結果推導為

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{3u}{|1-u|} \frac{\Delta C}{C} + \frac{v}{|1-u|} \frac{\Delta t}{t_c} \quad (22)$$

利用 (14) 式畫出  $\theta$  與  $t$  之關係，如圖 8 所示。這是當模型壁厚已決定後，對一固定的  $h$  值，可以取的  $\theta$  值之上限。假設實驗時間為 60 秒，則圖中  $h$  為常數之曲線會與  $t=60$  秒之交點便決定了實驗設計最大可以選取的  $\theta$  值。若以 60 秒為最大暫態實驗時間長度，利用圖 8 之結果將不可選取的  $\theta$  範圍分別對不同的  $h$  值去除，則得  $h$  的不準度如圖 9 所示。

若將前三種液晶熱像法在各自最佳實驗參數選擇下可得到熱傳係數的最佳相對不準度做圖比較，則吾人可得圖 10 (NO 1：對流體步級加熱之暫態方法；NO 2：對固體

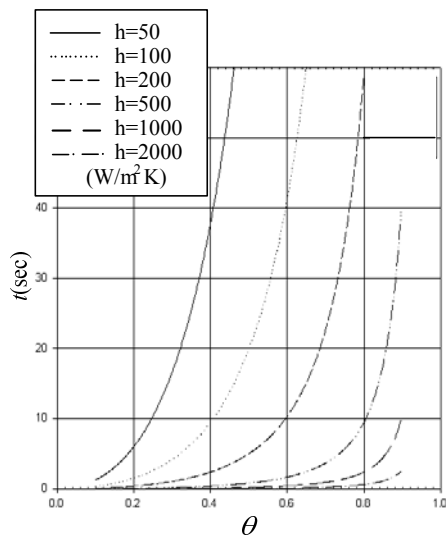


圖 8. 對固體表面單步級加熱之暫態方法之時間  $t$  與  $\theta$  關係

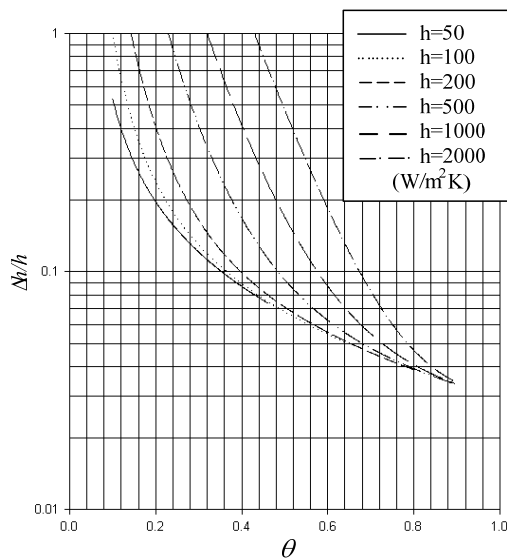


圖 9. 對固體表面單步級加熱之暫態方法對不同  $h$  的不準度之結果 (假設實驗時間最長 60 秒)

表面單步級加熱之暫態方法；NO 3：穩態方法)。其中假設相對誤差 ( $\Delta q/q$ ) 與 ( $\Delta T/T$ ) 皆為 0.01。結果顯示，對絕大部分的紐塞數 (Nusselt number,  $Nu=hL/k$ ) 範圍 (注意圖 10 之紐塞數座標用對數座標)，穩態方法之熱傳係數相對不準度最低，因此它常被用來檢驗液晶熱像法實驗系統的正確性。再者，一般文獻中常用到的對流體步級加熱方法之最佳不準度隨紐塞數之增加而增加。以氣輪機一級葉片內部冷卻流道之熱傳為例，雖然大部分流道面積之  $h$  值均很高，但其  $h$  值之分佈範圍亦甚廣，因此  $h$  的實驗不準度分佈並非是

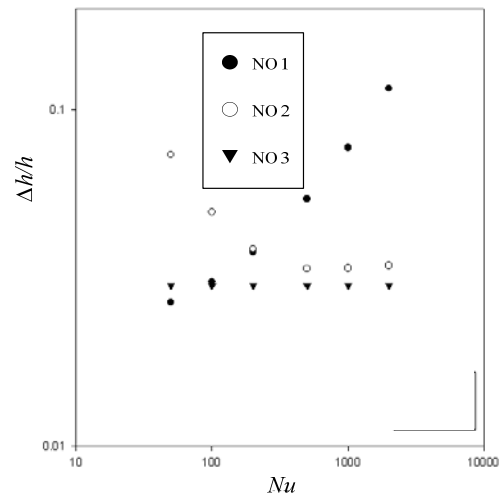


圖 10. 不同方法相對不準度之比較

均勻的。有趣的是，圖 10 顯示對固體表面單步級加熱的最佳不準度隨紐塞數之增加卻呈減少的趨勢，而且對大部份紐塞數或  $h$  的範圍其  $h$  的相對不準度呈現低而較均值的分佈。因此，它具有與對流體步級加熱暫態方法的優點，實驗時間短即可得全場對流熱傳係數的分佈；同時也具有穩態方法之優點；流場保持穩定，同時  $h$  之相對不準度低而且對大部分  $h$  範圍其值分佈均勻。

## 五、結論

本研究採對固體表面加熱之液晶熱像法原理，自建了一套熱傳實驗系統，並以平板流及橫越圓柱流之實驗驗證了系統軟硬體之正確性。

與一般常用的對流體步級加熱方法做一比較，對固體表面加熱法可以始終保持流場之穩態，而且設備較經濟、簡單、控制容易，適合一般實驗室對簡單模型之熱傳係數量測，但對於複雜的幾何形狀則較難施行均勻的表面加熱。對流體步級加熱雖系統設備較昂貴，卻允許複雜的模型幾何形狀。

最佳不準度分析之結果顯示，穩態方法之對流係數其相對不準度較低，所以它可用來檢驗液晶熱像法實驗系統的正確性。對固體表面單步級的最佳不準度隨紐塞爾之增加卻呈減少的趨勢，所得  $h$  的相對不準度呈較均值的分佈，而且其值已與穩態方法之不準度相差不遠，對高  $h$  值的對流熱傳實驗研究，如果幾何形狀許可，採用對固體單步級加熱乃是較簡單而準確的方法。



對固體表面複步級加熱的方法也具有表面加熱的問題，且影像數據處理較為複雜。但此方法具有不需正確知道熱通量之值的優點，值得再深入探討。

### 誌謝

本研究主要經費由台灣電力公司提供，計畫編號 NSC 87-TPC-E-212-001，儀器設備由大葉大學配合提供，特此誌謝。

### 參考文獻

1. Baughn, J. W., P. T. Ireland, T. V. Jones and N. Saniei (1989) A comparison of the transient and heated-coating methods for the measurement of local heat transfer coefficients on a pin fin. *Journal of Heat Transfer*, 111, 877-881.
2. Carslaw, H. S. and J. C. Jaeger (1959) *Conduction of Heat in Solids*, 2nd Ed., Oxford at the Clarendon Press, Oxford.
3. Han, J. C., P. R. Chandra and S. C. Lau (1988) Local heat/mass transfer distributions around sharp 180 deg turns in two-pass smooth and rib-roughened channels. *ASME, Journal of Heat Transfer*, 110, 91-98.
4. Han, J. C., J. S. Park and M. Y. Ibrahim (1986) *Measurement of Heat Transfer and Pressure Drop in Rectangular Channels With Turbulence Promoters*. NASA Contractor Report 4015, 1-197.
5. Hippensteele, S. A., L. M. Russel and F. J. Torres (1985) Local heat-transfer measurements on a composite of a heater element and liquid crystals. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 107, 953-960.
6. Hoecker, R. (1996) *Optimization of Transient Heat Transfer Measurements Using Thermochromic Liquid Crystals Based on an Error Estimation*, Paper 96-GT-235, ASME TURBO EXPO '96 Birmingham, UK.
7. Ireland, P. T., Z. Wang and T. V. Jones (1995) Measurement techniques: Liquid crystal heat transfer measurements. In: *von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series 1995-01*, 1-67.
8. Kays, W. M. and M. E. Crawford (1993) *Convective Heat and Mass Transfer*, 3rd Ed., McGraw-Hill, New York, NY.
9. Moffat, R. J. (1990) Experimental heat transfer. Keynote Paper, KN11. Proceedings of 9th International Heat Transfer Conference, Jerusalem.
10. von Wolfersdorf, J., R. Hoecker and T. Sattelmayer (1993) A hybrid transient step-heating transfer measurement technique using heater foils and liquid-crystal thermography. *Journal of Heat Transfer*, 115, 319-324.

收件：95.01.10 修正：95.10.03 接受：95.11.03

## 符號說明

$C_p$  : 等壓比熱 (J/KgK)

$h$  : 對流熱傳係數 (W/m<sup>2</sup>K)

$k$  : 熱傳導係數 (W/mK)

$q$  : 熱通量 (W/m<sup>2</sup>)

$Re_D$  : 以圓柱直徑為特徵長的雷諾數 (Reynolds number)

$Nu$  : 紐塞爾數 (Nusselt number)

$T_{LC}$  : 液晶選用顏色之校正溫度 (K)

$T_{ref}$  : 流體參考溫度 (K)

$T_w$  : 壁面溫度 (K)

$T_{w,i}$  : 壁面初始溫度 (K)

$T_\infty$  : 自由流溫度 (K)

$t$  : 時間 (sec)

$t_u$  : 複步級加熱開始減熱時間 (sec)

$u$  : 權重函數

$v$  : 權重函數

## 希臘字母

$\alpha$  : 熱擴散性 ( $k/\rho C_p$ ) (m<sup>2</sup>/s)

$\theta$  : 設計之無因次參數, 或圓柱角度

$\varepsilon$  : 減熱率

$\rho$  : 密度 (Kg/m<sup>3</sup>)