

量測熱輻射通量之測溫平板設計

溫昌達、林哲盛、傅柏欽、方翊翔、陳玉彬

國立成功大學機械系

陳志詮、王天志、陳建忠、陳瑞鈴

內政部建築研究所

摘要

火災發生時，熱輻射可能透過建築構件，造成物件引燃及人員傷亡，基於安全上之考量，熱輻射的量測有其必要性。目前熱輻射計價格昂貴且針對高溫物件需搭配冷卻系統，因此本研究將研製可量測熱輻射之測溫平板，藉由表面溫度以推得該平板所接收到之熱輻射通量，其製作容易且價格低廉，可大量製作以滿足同時量測多組資料點之需求。實驗結果顯示測溫平板所接收到之熱輻射通量與熱輻射計實際量測值之絕對誤差皆在 0.5 kW/m^2 以下，而相對誤差大部分皆在 8 % 以下，因此可發現測溫平板和熱輻射計在結果上相當吻合，具有研究開發及應用之價值。

關鍵詞：測溫平板、熱輻射、輻射計

Abstract

When the fire occurs, thermal radiation may cause the properties ignition and hurt lives through the building components. Due to the consideration of security, measurement of thermal radiation is necessary. In general, thermal radiometers are expensive and require cooling system while measuring high-temperature objects. In this research, we design a plate thermometer which can infer the incident radiant heat flux by measuring the surface temperature. It's easy-fabrication and low-cost allow us to produce a lot of plate thermometers so that many data points can be measured simultaneously. Results show that the absolute error between heat flux inferred by plate thermometer and the one measured by thermal radiometer is less than 0.5 kW/m^2 . Also most results have the relative error under 8%. Therefore, the results of the plate thermometer are quite in agreement with the thermal radiometer. It is worthy of being researched and developed.

Keywords: plate thermometer, thermal radiation, radiometer

一、前言

測溫平板(Plate Thermometer)為一測量熱通量之裝置，利用量測溫度的方式藉以推算得該位置之淨熱通量(Net Heat Flux)，淨熱通量為單位時間通過控制體積(Control volume)之熱能，即包含了熱輻射、熱對流和熱傳導三種機制所傳輸的能量。測溫平板的歷史可追溯自 1980 年代，由瑞典科學家 Wickström 所發明，起先測溫平板是被設計用來量測耐火試驗爐內的溫度，以改善熱電偶易受環境對流影響之缺點，進而達到準確控制爐內升加溫曲線之目的。在國際標準規範 ISO 834 及歐洲標準 EN1363-1 中，也將測溫平板改用於測量熱通量上，作為替代熱通量計(Heat flux meter)的一種裝置，從他的的詳細尺寸紀錄於內，目前我國國家標準也將此測溫平板之設計納入參考，可作為紀錄爐內溫度之一種選擇。但隨著時代的演進，從 Ingason 的研究中也發現，經過校正後的測溫平板用於測量熱通量有相當準確性，因此才有利用簡單的方法量測熱通量的概念出現。

符號表			
α	吸收率	k_g	空氣熱傳導係數
ε	放射率	Ra	雷利數
\mathcal{Q}_{ref}	測溫平板反射熱	Pr	普朗特數
\mathcal{Q}_{inc}	測溫平板入射熱	Gr	葛拉秀夫數
E_b	黑體放射功率	g	重力加速度
σ	史蒂芬-波茲曼常數	β	體積熱膨脹係數
T	表面溫度	ν	動黏滯係數
\mathcal{Q}_{emi}	測溫平板放射熱	T_f	薄膜溫度
T_p	測溫平板表面溫度	\mathcal{Q}_{tot}	總熱通量
\mathcal{Q}_{rad}	測溫平板輻射熱	\mathcal{Q}_{stor}	儲存於測溫平板之熱
\mathcal{Q}_{conv}	測溫平板對流熱	\mathcal{Q}_{cond}	測溫平板傳導熱
\bar{h}	平均熱對流係數	ρ_{st}	鋼板密度
T_∞	週圍環境溫度	C_{st}	鋼板比熱
\overline{Nu}	平均紐塞數	δ	測溫平板厚度
L	特徵長度	t	時間
		T_s	加熱源表面溫度

二、實驗設備與裝置

實驗所使用的器材有電源供應器、紅銅塊、彈筒式加熱棒、陶瓷絕熱板、自製測溫平板，其中電源供應器(Power Supply)是由 GWINSTEK(固緯電子)公司所製造，可提供固定之電壓與電流，其提供之電壓上限為 110V，電流上限為 10A，為此實驗熱量的提供來源；紅銅塊(Copper)中間以銑床銑出三個直徑 10 mm 的洞，使其可以插入三根彈筒式加熱棒；彈筒式加熱棒(Electric Heater)每支為 250 W，經由電源供應器輸入之電壓控制其發熱量；陶瓷絕熱板(Ceramic Board)可防止加熱模組的熱散失，使紅銅塊能確實的加熱到我們所需的溫度。

實驗的整體架構為固定一熱源輸出，並以自製測溫平板在一定距離內測量平板之表面溫度，進而模擬實際燃燒時的情形，並達到上述之目的。熱源的配置方式為將加熱紅銅塊以陶瓷絕熱板包覆，使之只有一面暴露於空氣中，即為加熱面，並加上三根 250 W 之彈筒型加熱棒，其中加熱面為 10 cm 平方之紅銅，如圖 2 所示。並以 2 cm 平方之黑色鋼板為測溫平板，如圖 3 所示。

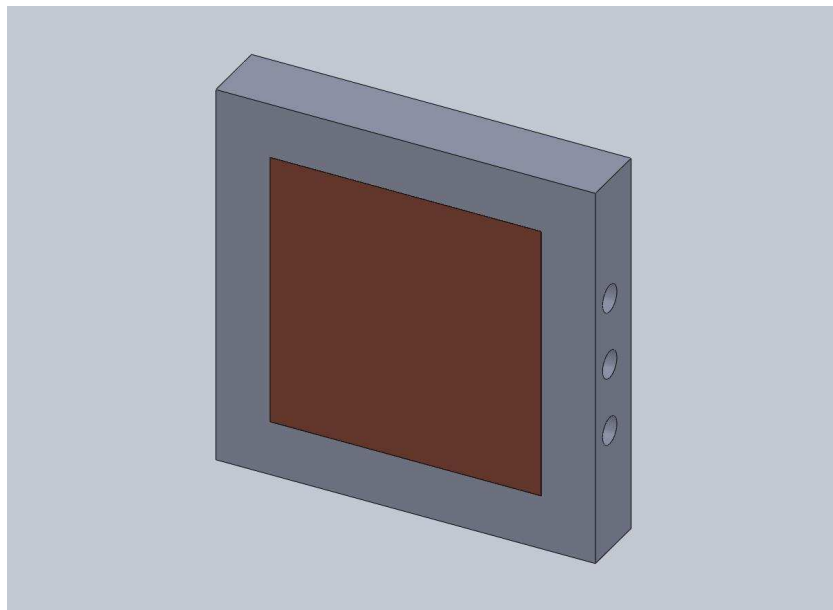


圖 2 加熱之熱源

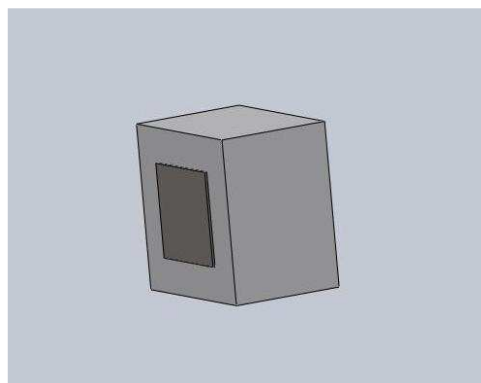


圖 3 測溫平板

整體實驗架設完成如圖 4 所示。實驗進行時，控制電源供應器的輸入電壓，使得熱源表面加熱至均溫狀態，記錄過程中熱源表面及測溫平板的溫度，藉由所測得之 T_s 與 T_p ，經過分析進而達成本實驗之目的。

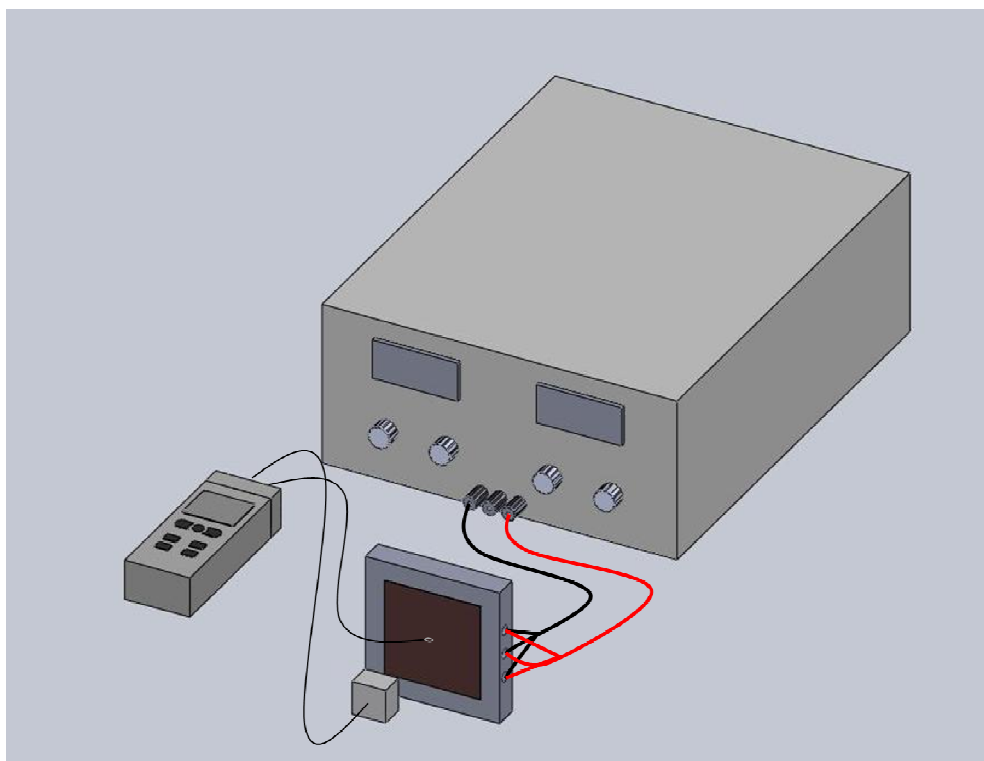


圖 4 實驗架設圖

三、測溫平板原理

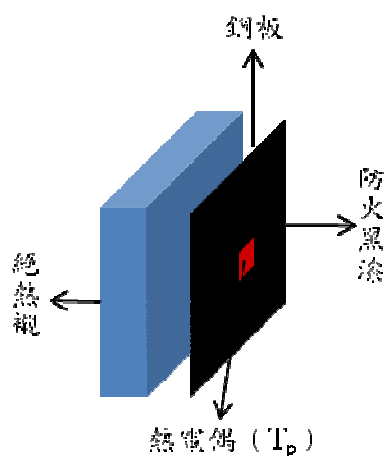


圖 5 測溫平板示意圖

其接收熱通量之面為邊長 20 mm、厚度為 0.5 mm 之正方形(在此面塗上防火黑漆)，材料採用 AISI 304 不銹鋼板，並在鋼板與絕熱襯之間放置熱電偶(Type-K)及 25mm 厚的絕熱襯，將不銹鋼板嵌入絕熱襯中固定，使其緊密貼合。該絕熱襯材料為陶瓷絕熱板(Ceramic board)，可確保平板後方為絕熱狀態，以此方法量測熱通量的理論基礎可分為輻射與自然對流，分別

陳述如下：

• **輻射(Radiation)**

由於在測溫平板表面塗上防火黑漆，可將表面特性視為黑體，因此能表示為：

$$\alpha = \varepsilon = 1 \quad (1)$$

測溫平板的反射熱(\mathcal{Q}_{ref})和入射熱量關係式：

$$\mathcal{Q}_{ref} = (1 - \varepsilon)\mathcal{Q}_{inc} \quad (2)$$

而根據 Stefan-Boltzmann Law，可得黑體放射之功率(E_b)：

$$E_b = \sigma T^4 \quad (3)$$

可得物體表面的放射熱(\mathcal{Q}_{emi})：

$$\mathcal{Q}_{emi} = \varepsilon \sigma T_p^4 \quad (4)$$

將上述統整得到輻射熱(\mathcal{Q}_{rad})：

$$\mathcal{Q}_{rad} = \mathcal{Q}_{inc} - \mathcal{Q}_{emi} - \mathcal{Q}_{ref} = \mathcal{Q}_{inc} - \sigma T_p^4 \quad (5)$$

• **自然對流(Free Convection)**

此部分主要依據先前學者推導出的經驗公式：

$$\mathcal{Q}_{conv} = \bar{h}(T_p - T_\infty) \quad (6)$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}L}{k_g} \quad (7)$$

$$\overline{Nu} = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (8)$$

$$Ra = Pr \cdot Gr \quad (9)$$

$$Gr = \frac{g\beta(T_p - T_\infty)L^3}{\nu^2} \quad (10)$$

$$T_f = \frac{T_p + T_\infty}{2} \quad (11)$$

$$k_g = 13.75 \times 10^{-5} T_f^{0.92} \quad (12)$$

$$\nu = 1.13 \times 10^{-9} T_f^{5/3} \quad (13)$$

公式(6)為熱對流之熱傳公式，而公式(7)至(13)為 Nu、Ra、Pr、Gr 的定義與係數之經驗公式。

• **熱平衡方程式(Heat Transfer Equation)**

由前兩部分可知總熱通量(\mathcal{Q}_{tot})為輻射熱加對流熱(\mathcal{Q}_{conv})：

$$\mathcal{Q}_{tot} = \mathcal{Q}_{rad} + \mathcal{Q}_{conv} = (\mathcal{Q}_{inc} - \sigma T_p^4) - \bar{h}(T_p - T_\infty) \quad (14)$$

總熱通量又可表示為：

$$\dot{Q}_{tot} = \dot{Q}_{stor} + \dot{Q}_{cond} \quad (15)$$

其中 \dot{Q}_{stor} 為儲存在平板中之熱，又可表示為：

$$\dot{Q}_{stor} = \rho_{st} C_{st} \delta \frac{\Delta T_p}{\Delta t} \quad (16)$$

\dot{Q}_{cond} 為傳導所散失之熱，由於鋼板厚度僅有 0.5 mm，可視整體溫度為均勻，故可忽略此項。

由公式(15)、(16)可推得：

$$\dot{Q}_{inc} = \sigma T_p^4 + \bar{h}(T_p - T_\infty) + \rho_{st} C_{st} \delta (\Delta T_p / \Delta t) \quad (17)$$

若整個系統達到穩態，則可忽略掉熱儲存項，公式(17)可簡化為：

$$\dot{Q}_{inc} = \sigma T_p^4 + \bar{h}(T_p - T_\infty) \quad (18)$$

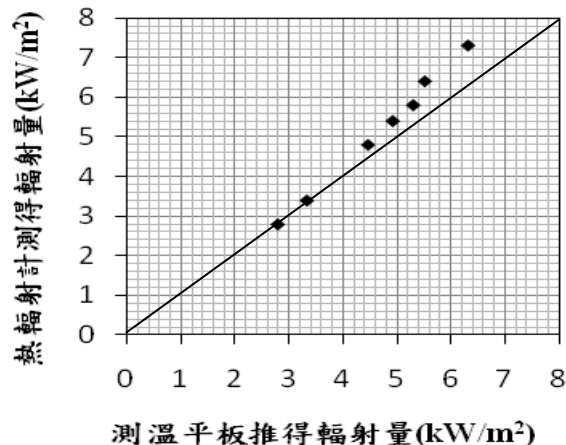
四、實驗結果與討論

下述表 1 為熱輻射計所量測到之熱輻射通量與測溫平板推得之熱輻射通量在相同條件下，當溫度達穩態之結果。由此表可發現熱輻射計與測溫平板具有相當程度的準確性。

表 1 測溫平板推得之熱輻射通量與熱輻射計量測值之比較

Ts(°C)	Tp(°C)	熱輻射計 (kW/m ²)	平板求得 (kW/m ²)	相對誤差(%)	絕對誤差 (kW/m ²)
415.9	149.3	2.8	2.778	0.79	0.022
431.4	168.8	3.4	3.321	2.32	0.079
495.6	205.1	4.8	4.459	7.1	0.341
517.4	217.2	5.4	4.916	8.9	0.484
525.1	227.3	5.8	5.298	8.7	0.502
536.7	232.8	6.4	5.514	13.8	0.886
554.8	252.4	7.3	6.319	13.4	0.981

而上表之結果可繪出圖 6，由圖中可得兩者之熱輻射通量皆隨熱源溫度上升而增加，且熱輻射通量之差值也有隨熱源溫度上升而增加之趨勢，其可能原因將於下章節進行分析。



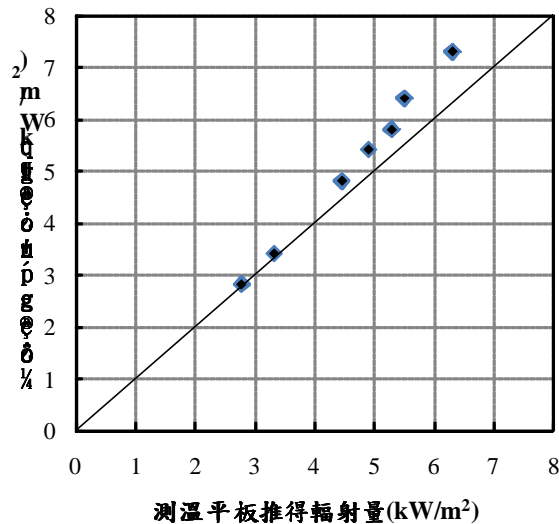


圖 6 輻射計與測溫平板在不同溫度所量得之熱輻射通量比較

由實驗結果可見，熱輻射計與測溫平板之熱輻射通量差值隨熱源溫度上升而增加，此趨勢可能因熱源與測溫平板之距離過於靠近，導致平板周圍空氣溫度過高，因此對流項所帶走之熱量不如預期的高，導致推得接收之輻射通量值低估，但在實驗溫度範圍內低估所造成之誤差尚於可容忍之範圍內。

經由此實驗，可得知當將測溫平板應用於輻射熱之量測時，當待測物之溫度越高，所測得之結果將會低估，應再修改計算時所帶入之參數，期望能找出適用於高溫段之相關數據，使得平板可準確推得高溫之待測物熱輻射通量。而且當實際應用時，只要平板與待測物之距離不要太過接近，本文之經驗公式將能適當地預測出接收之熱輻射通量值，進而以測溫平板取代熱輻射計以降低成本，並能同時多點進行量測且不需冷卻水裝置，製作與架設皆極為容易、方便。

五、參考文獻

1. BS EN 1363-1(1999), "Fire resistance tests- part 1: general requirements", *British Standards*.
2. Incropera, D., and Bergmann, L.(2007), "Fundamentals of heat and mass transfer", John & Wiley & Sons, New York, 6th.
3. Ingason H., Wickström U.(2007), "Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer" *Fire Safety Journal*.
4. ISO 834-1(1999), "Fire-resistance tests — elements of building construction — part 1: general requirements" *International Organization for Standardization*, pp. 4-6.
5. Siegel, R., and Howell, J.R(2001), "Thermal radiation heat transfer", Taylor & Francis Inc,

New York, 4th.

6. Wickström U.(1989), “The plate thermometer —a simple instrument for reaching harmonized fire resistance tests” *SP REPORT 1989:03*