

圓錐量熱儀熱釋放率量測不確定度評估

陳佳玲¹、蘇鴻奇¹、蔡銘儒¹、古瓊忠²

¹內政部建築研究所

²聯合營建發展基金會

摘要

很多舊式用來偵測易燃性之儀器並不是以實際火災條件作為基準，而且也無法測得實際火災之定量結果。因此早期法規遇到的問題在於判定不燃物的重要變數不合理。而圓錐量熱儀之設計以及量測數值是以實際火災工程作為基準，主要應用於：(1) 提供最新火災模式資料 (2) 可利用簡單方程式或修正係數提供資料來預測實際火災之行為 (3) 根據各種材料之特性加以分級 (4) 訂定相關法規。目前已成為現今國際上普遍肯定具有足夠公信力之測試法。其測試標準主要是 ASTM E1354 與 ISO 5660-1，而目前國內的建材耐燃性檢驗標準為進行國際調合，也已制訂 CNS 14705(建築材料燃燒熱釋放效率實驗--圓錐量熱儀法)未來將取代現行之耐燃試驗標準(CNS 6532 建築物室內裝修材料之耐燃性檢驗法)。

本研究主要評估圓錐量熱儀熱釋放率實驗之量測不確定度以展示量測結果的可靠性及其準確度範圍，評估內容僅對 B 類不確定度做分析，諸如測試樣品間變異，樣品重複性變異等，此種 A 類不確定度需透過實驗間之比對才能獲得可靠的數據而非單獨實驗室能力所及，不在本研究評估範圍，依據燃燒氣體量測，是以乾燥空氣為主，其熱釋放率計算排除 CO、CO₂、H₂O 佔氧氣分子量，經過評估所得不確定度之結果將高估不確定的數值。

關鍵字：量測不確定度、圓錐量熱儀、熱釋放率

一、前言

建築防火性能及建築材料耐火特性相關研究之實驗目的，在於了解火災發生的原因及發展經過，並找尋出最佳滅火方式。同時依據相關之實驗結果，更可以研訂驗證基準規範與防火法規以達到預防的目標。一般來說一個典型火災之發展情形可概分為四個時期：起火期、成長期、全盛期與衰減期。當火場溫度及熱釋放率達到一定程度時，即可能造成閃燃 (flashover)，此時火焰會快速傳播，溫度瞬間提高以致於無法控制。因此最佳的逃生與滅火時機是在閃燃發生或全盛期之前。所以針對如何在起火期及成長期階段滅火或降低環境溫度之研究是相當重要的。

早期法規遇到的問題在於判定不燃物的重要變數不合理，主要在於很多舊式用來偵測易燃性之儀器並不是以實際火災條件作為基準，而且也無法測得實際火災之定量結果，所以這些設備只能根據某些控制需求，判斷試件是否合格。因此，發展至今認定熱釋放率可作為重要判定指標，也牽引法規修正往熱釋放率方面著手，而圓錐量熱儀之設計以及量測數值是以實際火災工程作為基準，將試驗所得資料繪成圖形便於進行分析，因此它具有比較廣泛的應用，在現今國際上受到普遍肯定具有足夠公信力。

圓錐量熱儀主要之應用如下：(1) 提供最新火災模式資料 (2) 可利用簡單方程式或修正係數提供資料來預測實際火災之行為 (3) 根據各種材料之特性加以分級 (4) 訂定相關法規。其測試方法以及熱釋放率之計算主要是依照 ASTM E1354 [1999] 與 ISO 5660-1 [1993] 規範標準所設立。利用此設備適切地了解建材燃燒時之熱釋放率變化情形，並模擬不同物品在火災發生時，可能產生之生成物，如黑煙、有毒物、腐蝕物等。而目前國內檢驗標準是以 CNS 6532 [1993] 中規定之基材試驗及表面試驗判定耐燃等級，為求法規周延確實，及進行國際調合，也已制訂 CNS 14705 (建築材料燃燒熱釋放效率實驗--圓錐量熱儀法) 未來將取代現行之耐燃試驗標準 (CNS 6532 建築物室內裝修材料之耐燃性檢驗法)。

本研究主要評估圓錐量熱儀熱釋放率實驗之量測不確定度以展示量測結果的可靠性及其準確度範圍，評估內容僅對 B 類不確定度做分析，諸如測試樣品間變異，樣品重複性變異等，此種 A 類不確定度需透過實驗間之比對才能獲得可靠的數據而非單獨實驗室能力所及，不在本研究評估範圍。

二、內容

2.1 圓錐量熱儀之構造

圖 1 為圓錐量熱儀裝置實體圖，圖 2 為構造示意圖，大體上可分為樣品燃燒室、排氣裝置、氣體分析裝置及校正系統。

2.2 材料燃燒熱釋放率量測

2.2.1 量測方法

實驗方法依據 CNS 14705 「築材料燃燒熱釋放效率實驗--圓錐量熱儀法」，測試步驟依據實驗室圓錐量熱儀實驗操作手冊及原廠 (FTT) 儀器設備操作步驟進行。

主要利用圓錐形加熱器對試體表面施加定量輻照度，使試體表面裂解產生可燃性氣體，在電氣點火器產生火花下，點火引燃。試體放在荷重平台上，同步記錄試體燃燒時質量的損失，而計算出質量損失率。燃燒的產物則導入排氣裝置，在集氣風管中抽取燃燒產物樣品進入氣體分析裝置，測量出燃燒後產物的氧濃度。

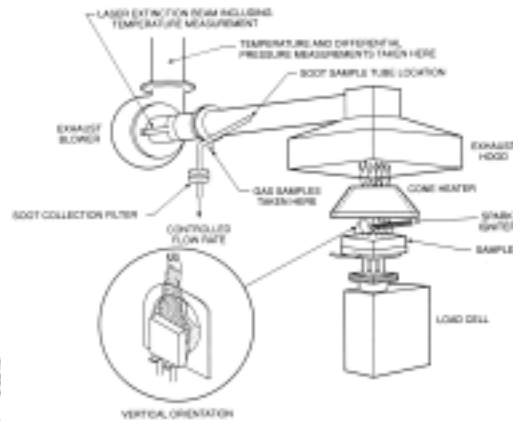


圖 1 圓錐量熱儀裝置實體圖 圖 2 構造示意圖(節錄自 ISO 5660-1(1993)中插圖)

2.2.2 熱釋放率分析原理

本試驗法熱釋放率分析原理係將材料曝露於輻射熱源下燃燒，由材料燃燒產物中量測大氣與煙氣中氧氣濃度之差值，利用消耗每單位質量氧氣產生固定熱量之原理來計算整體燃燒形成之熱釋放率。

根據Thornton[1917]及Huggett[1980]研究，有機物在完全燃燒後，每單位質量氧氣之熱釋放率趨於定值，利用氧氣消耗率來計算熱釋放率，必須量測廢氣中氧氣之流量 m_{O_2} ，然後算出氧氣消耗率。

2.3 量測不確定度評估(古瓊忠，2006)

2.3.1 量測數字模型

依據 CNS 14705 第 5.4.2 節公式 2 得式 1

$$q(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{r_0} \right) \times (1.10) \times C \times \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \times \left(\frac{X^0 - X}{1.105 - 1.5X} \right) \text{-----(1)}$$

公式中：

$q(t)$ ：建築材料燃燒之熱釋放效率 (kW)

T_e ：限流孔內氣體之絕對溫度 (k) (Stack temperature)

ΔP ：限流孔壓差 (Pa)

X^0 ：氧氣分析儀起始讀值為氧氣所占之摩爾比例

X ：氧氣分析儀讀值為氧氣所占之摩爾比例

C ：限流孔流量計校正常數 ($m^{1/2} \times kg^{1/2} \times k^{1/2}$)

Δhc ：淨燃燒熱(KJ/g)

r_0 ：為氧與燃料質量比

本評估分析中 $\left(\frac{\Delta hc}{r_0}\right) = 13.1 \times 10^3 \text{ KJ/kg}$

2.3.2. 利用量測不確定度傳遞原理，求組合標準不確定度

$$q(t) = f \left[\frac{\Delta hc}{r_0}, c, \Delta P, T_e, X \right] \text{----- (2)}$$

公式 (2) 中忽略 X^0 之不確定度。

所以

$$\delta q(t) = \left\{ \left[\frac{\partial q(t)}{\partial \left(\frac{\Delta hc}{r_0}\right)} \times \delta \left(\frac{\Delta hc}{r_0}\right) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial c} \times \delta c \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial (\Delta P)} \delta (\Delta P) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial (T_e)} \delta (T_e) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial (X)} \delta (X) \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \text{----- (3)}$$

2.3.3 計算敏感係數

$$S_1(t) = \frac{\partial}{\partial \left(\frac{\Delta hc}{r_0}\right)} q(t) = (1.10) \times C \times \sqrt{\frac{\Delta P}{T_e}} \left(\frac{0.2095 - X}{1.105 - 1.5X} \right) \text{----- (4)}$$

$$S_2(t) = \frac{\partial}{\partial c} q(t) = \left(\frac{\Delta hc}{r_0} \right) \times (1.10) \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Te}} \left(\frac{0.2095 - X}{1.105 - 1.5X} \right)$$

$$= 14.41 \times 10^3 \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Te}} \times \left(\frac{0.2095 - X}{1.105 - 1.5X} \right) \text{----- (5)}$$

$$S_3(t) = \frac{\partial}{\partial (\Delta P)} q(t) = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta hc}{r_0} \right) \times (1.10) \times C \times \sqrt{\frac{1}{Te \times \Delta P}} \times \left(\frac{0.2095 - X}{1.105 - 1.5X} \right)$$

$$= 7.205 \times 10^3 \times C \times \sqrt{\frac{1}{Te \times \Delta P}} \times \left(\frac{0.2095 - X}{1.105 - 1.5X} \right) \text{----- (6)}$$

$$S_4(t) = \frac{\partial}{\partial (Te)} q(t) = -\frac{1}{2} \left(\frac{\Delta hc}{r_0} \right) \times (1.10) \times C \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Te^3}} \times \left(\frac{0.2095 - X}{1.105 - 1.5X} \right)$$

$$= -7.205 \times 10^3 \times C \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Te^3}} \times \left(\frac{0.2095 - X}{1.105 - 1.5X} \right) \text{----- (7)}$$

$$S_5(t) = \frac{\partial}{\partial X} q(t) = -\left(\frac{\Delta hc}{r_0} \right) \times (1.10) \times C \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Te}} \times \left[\frac{0.7905}{(1.105 - 1.5X)^2} \right]$$

$$= 14.41 \times 10^3 \times C \times \sqrt{\frac{\Delta P}{Te}} \times \left[\frac{0.7905}{(1.105 - 1.5X)^2} \right] \text{----- (8)}$$

1. C 量測之變異為 ± 0.003 (Fire Testing Technology Ltd (FTT) "Cone Calorimeter software user ' s Guide " p10 , p13)

假設矩形分佈標準不確定度為：

$$\delta(C) = \frac{0.003}{\sqrt{3}} = 1.732 \times 10^{-3} \text{----- (9)}$$

2. $\frac{\Delta hc}{r_0}$ 量測之變異範圍 ± 5% (CNS 14705 p10 及 Cone Calorimeter software user's Guide page i)

$$\frac{\Delta hc}{r_0} = 13.1 \times 10^3 \text{ , 所以其變異範圍為 :}$$

$13.1 \times 10^3 \times 0.05 = 655 \text{ (KJ/kg)}$, 假設矩形分佈 , 標準不確定度為

$$\delta \left(\frac{\Delta hc}{r_0} \right) = \frac{655}{\sqrt{3}} = 378.2 \text{ (KJ/kg)} \text{----- (10)}$$

3. 溫度量測所用之 K 型熱電偶依據 (ANSI/AMCA210) 規範, 對流量量測所用儀具之通用規格要求其變異範圍計算如下:

$$F = (K - 273) \times \frac{9}{5} + 32$$

$$\delta F = \frac{9}{5} \delta K$$

$$\delta K = \frac{5}{9} \delta F \text{----- (11)}$$

因為 F 之變異範圍規定為 $\pm 2^\circ F$, 所以 K 之變異範圍則為 $\pm 1.1^\circ K$, 假設矩形分佈, 標準不確定度為:

$$\delta (T_e) = \frac{1.1}{\sqrt{3}} = 0.635 \text{----- (12)}$$

4. 依據 ANSI/AMCA 210 對氣體量測所用之壓力量測儀具之適用規格其變異範圍 $\pm 1 Pa$, 假設矩形分佈, 標準不確定度為:

$$\delta (P) = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \text{----- (13)}$$

5. 依據氧氣分析儀性能規格 4100 C Pm1158 O2 control、Xentra Analyser p7. 6 線性誤差 $\pm 0.05\%$, 輸出變化誤差 $\pm 0.05\%$, 同時 CNS 14705 第 3.11 節規定氧氣分析儀之雜訊及漂移規範 $\pm 50 ppm$, 假設矩形分佈, 組合標準不確定度:

$$(\delta x)^2 = \left(\frac{0.0005}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0.0005}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{50 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}}\right)^2$$

$$(\delta x) = 4.1 \times 10^{-4} \text{----- (14)}$$

2.3.4. 組合標準不確定度

1. 從電腦軟體系統中, 測試資料之讀取為每 5sec 一筆數據, 將每筆資料中之 X (含氧量), T_e (Stack Temperature), ΔP (限流孔壓力差) 及執行測試前所得校正常數 e 代入敏感係數公式 (4) ~ 公式 (14), 代入公式 (3) 中即可計算出每 5sec 量測資料之組合標準不確定度, 亦可繪製隨量測時間變化的組合標準不確定度圖。
2. 上節所計算結果其熱釋放和組合不確定度單位為 kW, 為配合測試儀具內建軟體, 熱釋放率其量測單位為 kW/m^2

$$q''(t) = \frac{q(t)}{A_s} \text{----- (15)}$$

式中 $A_s = 0.01 m^2$, 並假設忽略試體面積之變異, 則

$$\delta q''(t) = \left\{ \left[\frac{\partial q''(t)}{\partial q(t)} \delta q(t) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial A_s} \delta A_s \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \text{----- (16)}$$

$A_s=0$, 所以

$$\delta q''(t) = \frac{1}{A_s} \delta q(t) = 100 \delta q(t) \text{----- (17)}$$

因此此部分計算結果，亦可利用與 2.3.4 第 1. 相同概念，每 5sec 計算 $q''(t)$ 及 $q''(t)$ 並作圖，可獲得熱釋放率量測時其組合不確定度 $\delta q''(t)$ 與時間之關係圖如圖 3 所示。

2.3.5. 相對組合標準不確定度

1. 相對組合標準不確定度的定義

$$RU = \frac{\delta q''(t)}{q''(t)} = \frac{\delta q(t) / A_s}{q(t) / A_s} = \frac{\delta q(t)}{q(t)} (\%) \text{----- (18)}$$

此相對不確定度亦是隨測試時間而不同，可依照 2.3.4 第 1. 之方式繪出其與時間之關係圖如圖 3 所示。

2. 瞭解不確定度成份對總的不確定度所貢獻程度，應分別計算及每個分量的關係圖，即可掌握變異的來源。

3. 由公式 (3) 與公式 (18)，獲得相對不確定度成份如下：

$$[RU]^2 = \frac{[\delta q(t)]^2}{[q(t)]^2} = \frac{1}{[q(t)]^2} \left\{ \left[\frac{\partial q(t)}{\partial \left(\frac{\Delta hc}{r_o} \right)} \times \delta \left(\frac{\Delta hc}{r_o} \right) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial c} \times \delta(c) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial (\Delta P)} \times \delta(\Delta P) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial T_e} \times \delta(T_e) \right]^2 + \left[\frac{\partial q(t)}{\partial X} \times \delta(X) \right]^2 \right\} \text{----- (19)}$$

$$[RU]^2 = [RU_1]^2 + [RU_2]^2 + [RU_3]^2 + [RU_4]^2 + [RU_5]^2 \text{----- (20)}$$

$$RU_1 = \frac{1}{q(t)} \times \left[\frac{\partial}{\partial \left(\frac{\Delta hc}{r_o} \right)} q(t) \times \delta \left(\frac{\Delta hc}{r_o} \right) \right] = \frac{S_1(t)}{q(t)} \times \delta \left(\frac{\Delta hc}{r_o} \right) \text{----- (21)}$$

$$RU_2 = \frac{1}{q(t)} \left[\frac{\partial q(t)}{\partial c} \delta(c) \right] = \frac{S_2(t)}{q(t)} \times \delta(C) \text{----- (22)}$$

$$RU_3 = \frac{1}{q(t)} \left[\frac{\partial q(t)}{\partial (\Delta P)} \times \delta(\Delta P) \right] = \frac{S_3(t)}{q(t)} \times \delta(\Delta P) \text{----- (23)}$$

$$RU_4 = \frac{1}{q(t)} \left[\frac{\partial q(t)}{\partial(Te)} \times \delta(Te) \right] = \frac{S_4(t)}{q(t)} \times \delta(Te) \text{ ----- (24)}$$

$$RU_5 = \frac{1}{q(t)} \left[\frac{\partial q(t)}{\partial X} \delta(X) \right] = \frac{S_5(t)}{q(t)} \times \delta(X) \text{ ----- (25)}$$

(4) 繪製各成份 RU_1 、 RU_2 、 RU_3 、 RU_4 、 RU_5 、對時間之變化圖單位%，每 5sec 計算一次，繪在同一張圖中如圖 4 所示，即可看出其變化。

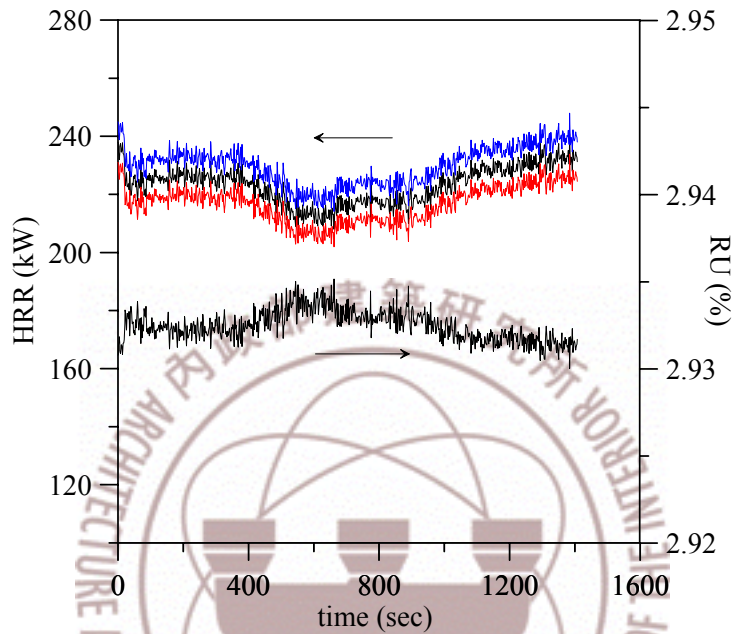


圖 3 熱釋放率與組合標準不確定度各成份對時間之變化圖

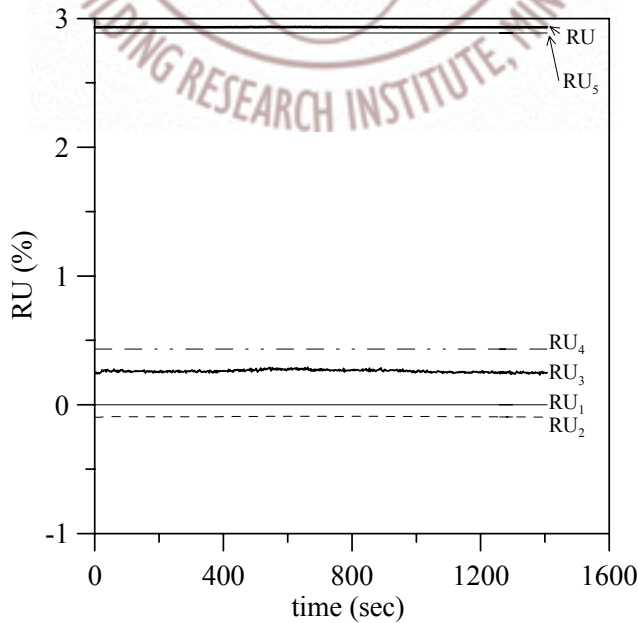


圖 4 不確定度成份對總的不確定度所貢獻程度

三、結論

1. 本評估僅對量測之 B 類不確定度做分析，不考慮隨機性之 A 類不確定度，諸如測試樣品間變異，樣品重複性變異等，此 A 類不確定度須透過實驗間之比對才能獲得可靠的數據而非其單獨實驗室能力所及。
2. 依據 ISO 5660-1 及 CNS14705 利用圓錐量熱儀量測熱釋放率之公式，是假設乾燥空氣不考慮 CO、CO₂、H₂O 之量測，所得不確定度之結果會高估不確定的數值，要完整精確評估量測不確定度，則須將其納入熱釋放率計算與量測不確定度評估。
3. 量測不確定度的評估並非一項例行的工作，也不是單純數學公式的套用與運算，量測者必須對量測方法及對程序長期觀察累積經驗深入的了解後，才能正確地評估。

四、參考文獻

1. ISO 5660-1 ,1993,Fire Tests-Reaction to Fire-Rate of Heat Release from Building Products (Cone Calorimeter), International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
2. CNS 14705 , 2002 , 築材料燃燒熱釋放效率實驗--圓錐量熱儀法。
3. 內政部建築研究所防火實驗中心 , 2006 , FLW-028 圓錐量熱儀(Dual Cone)實驗操作手冊。
4. Fire Testing Technology Ltd(FTT) ,2001, User's Guide for the Cone Calorimeter.
5. Fire Testing Technology Ltd(FTT)"Cone Calorimeter software user 's Guide" .
6. Thornton, W. ,1917, The Relation of Oxygen to the Heat of Combustion of Organic Compounds, Philosophical Magazine and J. of Science, Vol. 33, No. 196.
7. C. Huggett, 1980, Estimation of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurement, *J. of Fire and Materials*, Vol. 12, pp. 61-65.
8. 古瓊忠, 2006 , 圓錐量熱儀熱釋放率量測不確定度評估報告, 內政部建築研究所防火實驗中心。
9. ANSI/AMCA 210,1999,Laboratory Methods of Testing Fans for Aerodynamic Performance Rating.