

火場勘察中燃燒效用 之類型與應用 上

賴麒文／中央警察大學鑑識科學研究所 博士生

張維敦／中央警察大學鑑識科學研究所 教授

一、前言

火災與爆炸調查（fire and explosion investigation）向來就隸屬在鑑識科學（forensic science）領域之中，在講究以物證為導向的科學辦案時代，當前火場勘察與重建均必須以科學事實為基礎，火災調查人員必須具備應有之「知識」、「技術」、「才能」，這是鑑識科學實驗室認證對於執行特定工作人員能力的共同要求⁽¹⁾，尤其對於燃燒效用（fire effects）基礎知識之理解與應用限制，必須能清晰掌握，才能基於燃燒效用之事實基礎進行燃燒型態（fire patterns）之分析，進而明確研判出起火處（點）及起火原因，圖1顯示燃燒效用及燃燒型態分析與其在起火處（點）與起火原因假設建立與驗證上之應用關係。

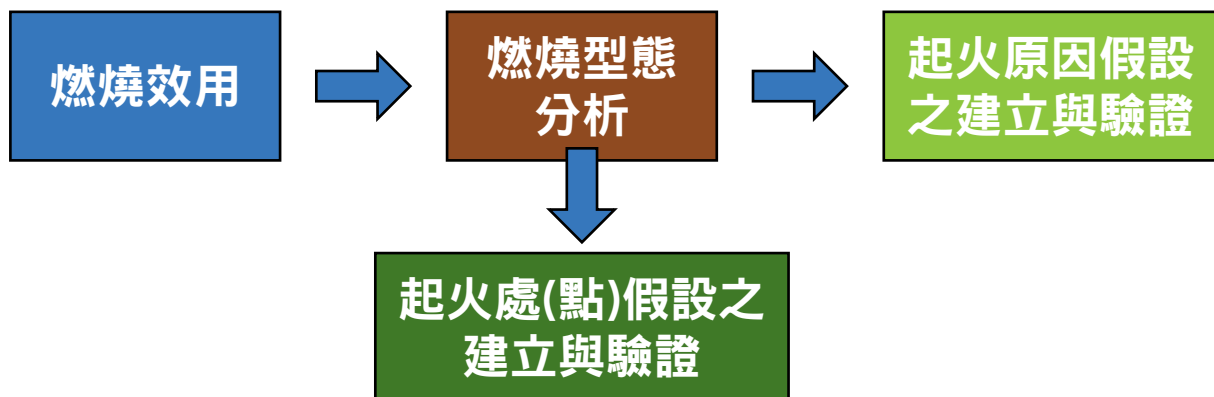


圖1、燃燒效用及燃燒型態分析結果與其應用

任何火災現場勘察的首要按照科學方法進行實證資料（empirical data）之收集，這些資料來源主要是火場中現場材料因暴露在燃燒的高熱環境下，發生可觀察或可測量等不同種類之燃燒效用，進而產生各式燃燒型態，所謂燃燒型態是受一個或一組燃燒效用所形成的型態而言，這些燃燒型態對於起火處（點）或起火原因之研判常具有不同程度的重建作用。

火災現場擬進行實證資料勘察採集的內容與範圍，考驗著火調人員對燃燒效用和燃燒型態識別分析之能力，本文將介紹NFPA 921標準相關章節之內容⁽²⁾與其他文獻，同時加入筆者自火災現場勘察所得之實證燃燒型態資料，經綜合整理與相互印證，系列性地分上、中、下篇進行介紹有關火場勘察中燃燒效用之類型與應用，期能對火災現場勘察從業人員提供相關之參考資料。

二、燃燒效用之定義

燃燒效用之所以需要分細項加以探究，主要是為進行燃燒型態之綜合分析，火調人員必須辨識材料因受燒而產生的各種變化，這些變化被稱為燃燒效用。換言之，燃燒效用是指由於燃燒而導致材料內部或表面發生致可觀察或可測量的變化特徵而言。

三、燃燒效用之類型與應用

（一）具溫度估算（temperature estimation）之特徵

火場中材料因受熱而熔化、變色或變形與其受燒溫度及時間之間具一定程度之相關性，利用此特徵有助於評估受熱的溫度和持續時間、熱流的程度或燃料釋放熱量的相對速率等。

從熱源貢獻的角度而言，基本上木材和汽油在燃燒時生成火焰的溫度大致相近，所有碳氫化合物燃料（塑膠、可燃性液體）和纖維素燃料等，儘管燃料以不同的速率釋放熱量，其火流擴散火焰溫度也大致相近。但金屬燃燒和高放熱化學反應產生的溫度則會明顯高於碳氫化合物或纖維素燃料火災產生的溫度。





圖2、混凝土受燒後之型態與顏色特徵，黑褐色區域顯示表面受燒大於1200°C，草黃色區域顯示內部受燒大於900°C⁽³⁾

一般建築物火災中很少達到並維持在1040° C（1900° F）以上的可辨識溫度（identifiable temperature），這些可識別的溫度有時被稱之為有效燃燒溫度（effective fire temperature），因為它們反映了可以由特定溫度範圍定義的物理作用，因此，火調人員可以利用材料的受燒後特徵來大致幫助估算特定區域達到的溫度。不過，當使用玻璃、塑膠、混凝土或金屬等材料來估計溫度時，火災調查人員應注意這些屬性之材料因具有材料多樣

化，如利用此類材料作為溫度顯示的正確方法是採集現場材料控制樣本，後交由有能力的實驗室、材料科學家或冶金學家加以確定（如圖2）。

（二）質量損失（mass loss）/燒失

火調人員透過燃料於燃燒過程中質量損失之程度，以瞭解材料的特性及其受燒的差異狀況。理論上，燃燒反應係在熱源與助燃劑條件下將燃料經氧化生成燃燒產物、熱和光，該過程會導致燃料的質量損失（材料的消耗）。實際上，在火災發生過程中，可燃和不可燃材料也可能因蒸發（vaporization）、分解（decomposition）、煅燒（calcination）或昇華（sublimation）而損失質量。

燃燒過程材料消耗的損失可以透過將燒損的材料與對照材料進行比較來確定，邊界或表面的剩餘材料可用於估算火災前材料的尺寸和形狀。火災前存在的材料可以透過未被燒損的複製品或類似材料，或透過存在之測繪、平面圖、照片，或對熟悉火災前情況的關係人訪談加以確定（如圖3）。



圖3、沙發受燒後造成材料質量損失兩側差異

材料質量的損失通常被用來顯示火災的持續時間和強度。應用時需特別留意，雖然這在許多情況下可能正確，但並非在所有情況下都正確，因為質量損失率是牽涉材料特性和燃燒狀況等複雜因素。質量損失率通常在火災過程中會改變，質量損失速率（rate of mass loss）取決於材料表面的熱通量（heat flux）、火勢增長率（fire growth rate）以及材料本身的熱釋放率（rate of heat release）。隨著火災規模和強度的增加，質量損失率也會增加。

（三）碳化（char）

火調人員可以利用木材碳化程度的差異來分析火勢的發展，研判火勢延燒方向及距離熱源之遠近。當木材暴露於高溫下時，會發生化學熱分解，而以煙霧的形式排出氣體、水蒸氣和各種熱解產物，留下的固體殘渣主要是炭，此即為碳化過程。炭在形成時會收縮，並產生裂痕和氣泡。因此，幾乎所有建築物火災中都可能發現木材的碳化現象。

許多物質的表面在燃燒時之高溫下會分解，此亦為碳化過程，例如油漆中的黏合劑會碳化並導致塗漆表面的顏色變暗；壁紙和石膏牆板上紙面材料受熱後會碳化；牆壁、地板、桌子和其​​他塑膠表面也會變色、燒熔或碳化。木材的碳化率依影響因素的不同而有很大差異，影響木材碳化率之因素包含下列各項因素：

- （1）燃燒速率和受熱持續時間
- （2）通風狀況
- （3）表面積質量比
- （4）木紋的走向、方位、大小
- （5）木材種類（松木、橡木、杉木…等）
- （6）木材密度
- （7）水分含量
- （8）表面塗層性質
- （9）熱氣中的氧濃度
- （10）火場中熱氣流衝擊速度
- （11）材料的間隙、裂痕、縫隙和邊緣作用



木材之變色和碳化的程度可以與鄰近相同材質區域進行比較，以找出燃燒不同碳化程度之區域，用於評估火勢延燒之方向。火調人員對碳化的外觀和裂縫的解釋，特別須注意是否已超出了經過控制測試所證實的範圍。首先，鱷魚皮碳化紋（alligatoring burn pattern）⁽⁴⁾的存在並不能證明火災期間存在使用液體助燃劑，也不能證明火勢蔓延迅速或燃燒強度較為猛烈，因為這類型的碳化型態可以在許多不同類型的火場中找到。其次，碳化物的表面外觀，如暗度、光澤、顏色或紫外光源下的外觀，與有機溶劑的使用或火勢增長率亦無具關係性。

火調人員使用碳化深度測量來研判燃燒持續時間時亦需要特別謹慎，僅根據碳化深度並不能確定特定的燃燒時間，因為木材的材質、種類及存放環境都可能影響木材的碳化深度，木材碳化和燃燒速度通常亦與樹齡無關。

在應用上係透過受燒範圍內點與點之間碳化深度的分析比較進行火勢延燒之評估，或距離熱源遠近之研判，距離熱源越遠碳化深度就越小（如圖4），但碳化深度的比較無法做為研判特定的燃燒時間或相鄰不同材料受燒程度的大小之評估。因為，碳化嚴重程度大小將隨其暴露狀態、材質、通風或可燃物放置位置不同而異，在火場勘察應用時均須考慮所有可能影響的變數。



圖4、天花板下方橫向木支架因距離頂部熱氣層越遠，碳化越不明顯

（四）崩裂（spalling）

崩裂現象是混凝土、磁磚、岩石或磚塊等建築材料因受燒後形成裂開、破裂、或坑洞等特徵。崩裂現象可能因受應力或外力擠壓所造成，而在火場中相關的崩裂則是由於溫度變化引起材料表面拉伸強度的破壞，導致材料內產生機械應力。拉伸強度是工程和製造應用中使用的材料的重要特性，它是建築物、橋樑或飛機結構設計中能夠承受拉力或拉伸力的關鍵因素。拉伸強度會受到各種因素的影響，例如溫度、應變率和疲勞。而引起崩裂的機械作用尚有因表面受熱的膨脹或收縮，同時內層材質則以不同的速率膨脹或收縮所致，例如，用水快速冷卻受熱的材料崩裂現象⁽⁵⁾。以混凝土崩裂為例而言，引起崩裂的應力受以下列一項或多項因素所影響：

- （1）混凝土中存在的水分。
- （2）鋼筋或鋼筋網與其周圍混凝土的膨脹差。
- （3）混凝土混合（混凝土、沙粒、細石）、與骨料（細骨料及粗骨料）之間的膨脹差⁽⁶⁾。
- （4）樓地板受熱面與內部的膨脹差。



圖5、鋼筋混凝土樓板受燒後，混凝土嚴重崩裂之情形

崩裂區域可能比鄰近區域的顏色淺，主要是因為崩裂區域暴露了乾淨的表面底層材料所致，而崩裂處之鄰近區域也可能因煙之沉積而變暗。混凝土崩裂的另一個因素是火災時材料的負荷和應力。由於這些高應力或高負載區域可能與起火的位置無關，因此天花板或橫樑下側的混凝土崩裂處並不定位於火源之上方。圖5顯示鋼筋混凝土樓板受燒後，混凝土崩裂至鋼筋裸露之情形。

火災現場是否存在崩裂情形，不應被視為存

在或不存在液體燃料促進劑的判斷指標，因為少量可燃性液體的燃燒通常不會導致液體表面下產生崩裂，但大量可燃性液體燃燒產生之迅速且強烈的熱能可能會導致鄰近表面產生崩裂，或是在可燃性液體燃燒殆盡後，受燒的結果可能會導致表面崩裂。混凝土或石造表面崩裂可能由多種因素引起，包括熱、冰凍、化學物質、磨損、機械做動、衝擊、外力或疲乏等。因材料配比不良或施工處理不當的表面可能更容易引發崩裂。由於崩裂也有可能由火災以外的原因所引起，火調人員應確定於火災發生前是否已有發生崩裂情形，以免造成誤判。綜合而言，崩裂處是否為可燃性液體燃燒所致，或是否為受燒較嚴重之處，或是否為起火處等之研判，均無存在直接之關聯性。

（五）氧化（oxidation）

氧化是燃燒的基本化學反應，氧化也是氧氣與金屬、岩石或土壤等物質結合的反應。在火場中含有酸性成分的煙霧氣溶膠（aerosol）的沉積，可能導致表面被氧化並形成可辨識的燃燒型態。氧化的影響包括顏色變化和結構變化，某些可燃材料的氧化會產生分界線（lines of demarcation）和燃燒型態，可供火調人員進行受熱溫度及受熱時間比較與研判，溫度越高、暴露時間越長，氧化作用越明顯（如圖6）。受燒後氧化的程度與環境濕度和暴露時間有關，在溫和受熱的情況下，會造成鋼材鍍鋅塗層的氧化，裸露的鍍鋅鋼可能會出現暗白色的表面，這種氧化可能消除鋅對腐蝕保護，未受保護的鋼材潮濕一段時間，就會生鏽而形成氧化分界線的燃燒型態。

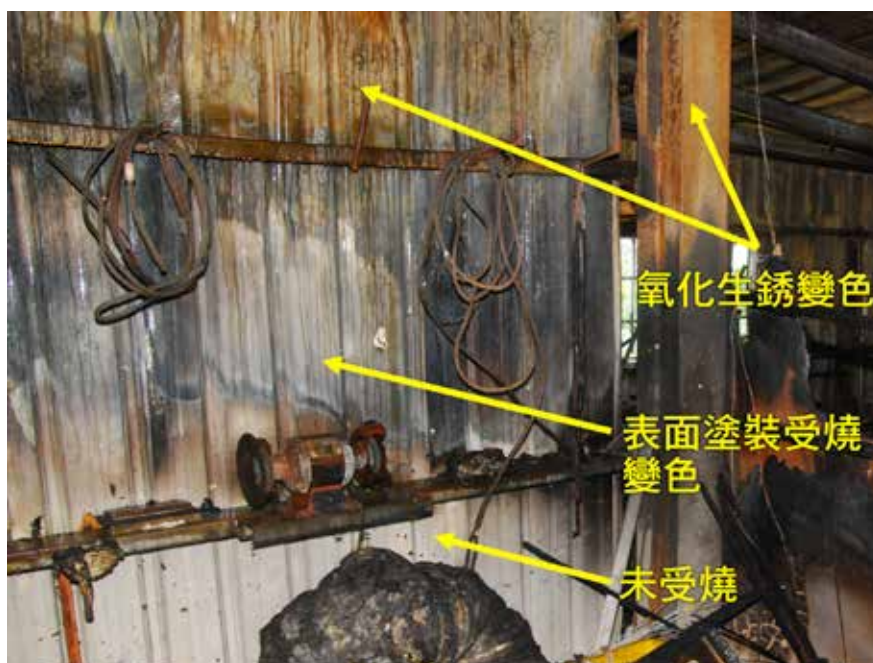


圖6、鋼板被氧化的生鏽變色和表面塗裝結構變化

當無防銹塗層的鋼或鐵在火場高溫被氧化時，表面會生成暗藍灰色（blue-gray dullness）至黑色之氧化物，此即為四氧化三鐵（ Fe_3O_4 ）⁽⁷⁾， Fe_3O_4 的顏色一般為黑色或深灰色，有時也會呈現藍灰色。這種顏色特徵是由於其混合氧化態（ Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ）所致。在不同的光照條件下，有時會顯現出深灰色或藍灰色。當火場溫度達 800°C 時，鐵與水蒸氣高溫反應會產生四氧化三鐵及氫氣⁽⁸⁾。因氧化而產生體積較厚的氧化物層，易發生剝落現象。受燒後，如果處於環境潮濕之狀況下，金屬可能會出現常見鏽色的三氧化二鐵氧化物（ Fe_2O_3 ）或氫氧化鐵（ $\text{FeO}(\text{OH})$ ， $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ）。氧化嚴重的鋼可能呈現出類似熔化（melting）的外觀，但僅透過目視觀察通常無法確定鋼是否已熔化，為了確定熔化的鋼，有必要對鋼檢體進行拋光、蝕刻橫切面之冶金檢查。此外，不鏽鋼表面輕度氧化會產生彩色條紋，嚴重氧化會呈現暗灰色（dull gray color）。

銅受熱時形成深紅色或黑色氧化物。但顏色並不重要，重要的是氧化會形成一條分界線。氧化物的厚度取決於熱暴露的持續時間和強度。受燒越嚴重，氧化就越嚴重。某些岩石和土壤在加熱到非常高的溫度時，通常會改變顏色，範圍從淡黃色到紅色。

變色可提供材料暴露於不同溫度下受燒的資訊來源，受燒後的材料由於對光線不同的吸收、反射或透射比例而產生特定的顏色結果。光源的強度、顏色和角度均會影響觀察者對物體顏色的詮釋，材料的表面特性也會影響觀察者的色彩感知。例如，深藍色汽車在某些照明條件下可能會呈現近於黑色，因此，在平均太陽光下觀察與紀錄，或進行正確白平衡再進行攝影紀錄，對於顏色的描述與比對至為關鍵。

一般變色之燃燒效用可能會由許多非火災因素引起的，當發現材料上具有色變的證據時，調查人員應考慮火災前後的各種影響因素，如陽光照射或化學物質暴露等。這些暴露可能會導致染料和顏色添加劑發生化學變化，從而改變其原始顏色。染料也會影響色變，織物染料在接觸火後可能會發生變色，從燃燒區域到完全未燃燒區域，織物可能會呈現不同的顏色。雖然變色通常與熱暴露有關，但需詳細了解染料分解行為⁽⁹⁾，才能加以進行差異化比較。換言之，火調人員若要以變色做為研判受燒溫度之參考時，需考慮火災前後各種因素及材料之熱暴露與分解行為。FACT

（待續）



參考文獻

- 1.TAF-CNLA-T11，鑑識科學實驗室認證技術規範，第三版（2023），財團法人全國認證基金會。
- 2.National fire protection association(2017). NFPA 921 2017: Guide for Fire and Explosion Investigations . Natl Fire Protection Assn.
- 3.陳火炎、張維敦、黃金旺 (1993)。高溫火場中混凝土性質變化之研究。刑事科學，35，31–40。
- 4.Mohbeshir. (2017). Fire Investigations: The Battle between Science and Myths. Retrieved from: <https://internationalmasterinfiresafetyengineering.wordpress.com/2017/09/14/fire-investigations-the-battle-between-science-and-myths/> (May 6, 2024)
- 5.Corbitt-Dipierro, C. E. (2024). Fire Investigation Mythunderstandings. Mythunderstanding #1: Spalling of Concrete. Retrieved from: <https://www.interfire.org/features/spalling.asp> (May 6, 2024)
- 6.高健章(2023)。混凝土簡介，經濟部。Retrieved from: https://www.moea.gov.tw/MNS/CNC/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=12307 (June 5, 2024)
- 7.Klein, C., & Dutrow, B. (2007). The Manual of Mineral Science (23rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- 8.吳鴻鈞、吳俊逸 (2012)。金屬與高溫水蒸汽反應研究-Ti、Fe、Al。勞工安全衛生研究報告（報告編號：IOSH101-S515）。台北市：行政院勞工委員會勞工安全衛生研究所。
- 9.Dry-concepts. (2024). Causes of Color Changes in Carpet Fibers. Dry-Concepts. Retrieved from: <https://www.dryconcepts.com/blog/color-changes/> (June 23, 2024)

