

出國報告（出國類別：進修）

參加「航空器火災和爆炸 調查訓練課程」出國報告

服務機關：國家運輸安全調查委員會

姓名職務：蔡華生/運輸安全組副調查官

派赴國家：美國洛杉磯南加州安全學院

出國期間：民國 114 年 04 月 27 日至 05 月 04 日

報告日期：民國 115 年 07 月 29 日

公務出國報告提要 系統識別號

出國報告名稱：參加「航空器火災和爆炸調查訓練課程」出國報告

頁數：53 頁 含附件：否

出國計畫主辦機關：國家運輸安全調查委員會

聯絡人：郭芷桢

電話：(02) 7727-6228

出國人員姓名：蔡華生

服務機關：國家運輸安全調查委員會

單位：運輸安全組

職稱：副調查官

電話：(02) 7727-6287

出國類別：☐1 考察 ☒2 進修 ☐3 研究 ☐4 實習 ☐5 視察 ☐6 訪問 ☐7 開會 ☐8 談判 ☐9
其他

出國期間：民國 114 年 04 月 27 日至 05 月 04 日

出國地區：美國洛杉磯南加州安全學院

報告日期：民國 114 年 07 月 29 日

分類號/目

關鍵詞：火災、爆炸、航空事故調查

內容摘要：

本會持續派員至國外相關機構研習事故調查知識與技術，此次運輸安全組派員前往美國洛杉磯南加州安全學院，參加為期 5 日之航空器火災和爆炸調查訓練課程。航空器火災和爆炸調查是專業性質工作，須充實相關知識、技術與獲得經驗。研習學員將課程內容整理後，摘要火災調查方法論、火災科學基礎知識、航空器火災與爆炸調查方法，並介紹說明相關案例。此次訓練之效益為獲得航空器火災和爆炸相關知識與調查技術，以因應未來相關事故調查工作。

目次

壹、目的.....	1
貳、過程.....	2
參、課程摘要與心得.....	3
肆、建議.....	52

壹、目的

航空器火災是事故調查人員面臨的最大挑戰之一，高溫加上衝擊力通常會隱藏、改變，或在某些情況下破壞關鍵證據。因此本會指派人員至美國學習蒐集、檢查及分析航空器火災證據的系統化方法，以利後續分析驗證，並學習調查炸彈或其他破壞行為的方法和工具，儲備相關運輸事故調查能量。

研習主辦單位為南加州安全學院（Southern California Safety Institute）是一間私人訓練機構，其與合作的專業講師群提供多種飛航事故調查及安全管理課程。完成航空器火災和爆炸調查訓練後，學員能建立火災科學知識基礎，掌握航空器火災調查方法與須考慮的面向，並確保採用適當技術正確蒐集證據以利後續分析。

貳、過程

1. 行程

本次訓練課程為美國南加州安全學院舉辦，日期為民國 114 年 04 月 28 日至 05 月 02 日，行程共計 8 日，詳如下表所示。

日 期	起 訖 地 點	行 程 紀 要
04/27	臺北－洛杉磯	起程
04/28 - 05/02	訓練地點	訓練
05/03 - 05/04	洛杉磯－臺北	返程

2. 參與人員

本次參與短期課程之學員共 4 人，來自美國、加拿大、智利及我國，學員來自執法機構、航空運輸業、民航局及事故調查單位。

3. 講師與課程

講師 Matt Robinson，曾任美國海軍陸戰隊 CH-46E 直昇機駕駛及美國海軍安全中心首席航空事故調查員，擁有超過 30 年航空安全與事故調查經驗，曾參與多國重大事故調查案件。他取得安柏瑞德航空（Embry-Riddle）大學航空系統安全碩士學位，目前為國際航空安全調查員協會（ISASI）會員與南加州安全學院負責人。

本次課程為期 5 日，課程涵蓋內容包括科學調查方法、火災物理化學、材料特性、電弧偵測、火焰傳播、油池火災、案例研究、燃燒穿透、火勢路徑、飛行中火災、地面火災、證物處理、生還性分析、實驗室測試，以及毒理學等。

參、課程摘要與心得

1. 火災調查方法論

科學方法

火災或爆炸調查是一項複雜的工作，涉及科學知識與技術能力。事實證據的蒐集以及對這些資料的分析應該客觀、真實地完成，並且不帶有期望偏見或先入為主等錯誤。火災調查的方法，應該使用系統性方法並注意所有相關細節，將新發現的事實證據進行分析，可能需要重新評估先前的結論。除了少數例外情況，火災或爆炸調查的正確方法是先確定起源，然後調查原因、環境、條件狀況，以及使火源、還原劑和氧化劑聚集在一起的因素。推薦使用的系統性方法是用於自然科學的方法，此科學方法提供成功火災調查必要的組織與分析過程。科學方法是一種探究原則，它構成了合理的科學和工程，包括火災事故調查處理過程的基礎，依照 NFPA 921 《火災與爆炸調查指南》，如圖 1-1 步驟進行應用：

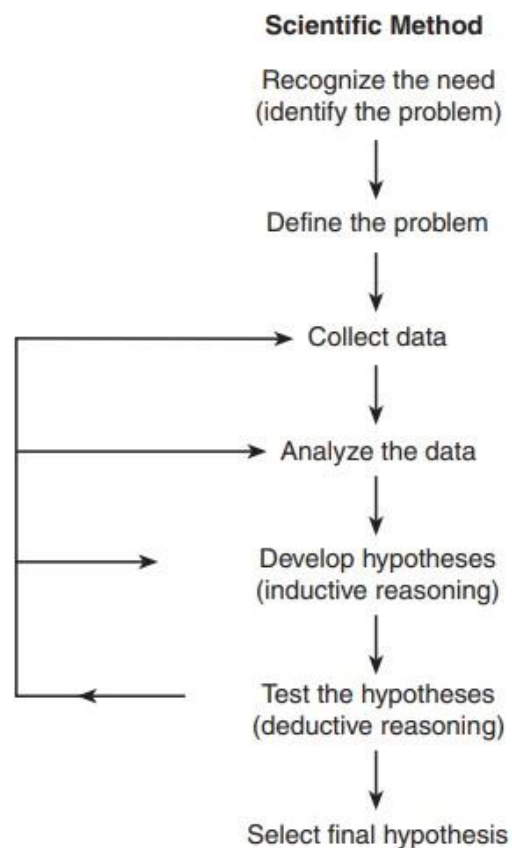


圖 1-1 使用科學方法的流程

首先是識別需求，然後界定問題，例如發生了火災或爆炸，應該確定並列出發生的原因，以防止將來發生類似事件。這是一個反覆的過程，確認問題存在後，調查或分析人員應確定解決問題的方式，在這種情況下應進行適當的起源和原因調查，可以透過檢查現場並結合其他資料蒐集方法來完成，例如查閱對先前事件進行的調查、訪談目擊者或其他瞭解情況人士，以及相關科學測試的結果。

透過觀察、實驗或其他直接資料蒐集手段或過程，得到有關火災事件的事實資料，這樣蒐集的數據稱為經驗數據，因為它是基於觀察或經驗，並且能夠被驗證為真實，測試方面或許可以透過電腦進行模擬。科學方法要求對蒐集到的所有資料進行分析，這是形成最終假設之前必須進行的重要步驟。單純資料的識別、蒐集和分類並不同於資料分析，資料分析是基於分析人員的知識、訓練、經驗及專業技能。如果調查人員缺乏賦予資料正確意義的專業知識，應該尋求協助理解資料的意義，使調查人員能夠依據證據而不是猜測形成假設。

依據資料的分析，調查人員將提出一個或多個假設來解釋現象，無論是火災模式性質、火勢蔓延、起源識別、著火順序、火災原因，或是火災或爆炸事件的損害或責任等，這個過程稱為歸納推理。歸納推理在科學方法中用於形成假設和理論，從具體的觀察中做出廣泛的歸納，即使陳述中的所有前提都是真的，結論也可能是假的。例如「某甲是一位祖父，他頭髮稀疏。因此所有的祖父都頭髮稀疏」，陳述與結論不符合邏輯。

火災調查的假設應完全基於調查人員透過觀察蒐集的經驗數據，並以此為基礎對事件進行解釋。調查人員的假設必須能夠經得起嚴謹的挑戰，否則它就不成立。檢驗假設是基於演繹推理原理，即調查人員將其假設與所有已知事實，以及與事件相關現象的科學知識進行比較。演繹推理與歸納推理相反，從一般性陳述（假設）開始，並研究得出具體、合乎邏輯的結論的可能性。如果某類事物的某件事為真，則該類所有成員也為真。例如「所有人終將一死。某乙是人，因此某乙也會死亡」。演繹推理要合理必須有正確的假設。假設前提「所有人都會死」和「某乙是人」均為真實，因此結論合乎邏輯且為真實。如果概括陳述錯誤，結論可能在邏輯上成立，但實際上可能並不正確。例如「所有頭髮稀疏的男人都是祖父」。

某丙頭髮稀疏，因此某丙是祖父」這在邏輯上成立但實際不正確，因為起始陳述就是錯誤的。

假設可以透過進行實體試驗進行檢驗，也可以運用思考科學原理來分析檢驗。當依賴他人的實驗或研究時，調查人員必須確保其條件和環境足夠相似，且應註明研究的參考文獻。如果假設無法獲得支持則應將其捨棄，並發展和驗證替代的假設，可能會蒐集新資料或重新分析現有數據。檢驗過程需要持續進行，直到所有可行的假設都被檢驗，並確定假設與事實和科學原理一致。如果沒有假設能經得起演繹推理的檢驗，該問題應被視為未定論（undetermined），這種情況可能比想像中更常見。任何無法被驗證的假設，都是無效的假設。基於缺乏資料而提出的假設，就是一種無法被驗證的假設範例。此外無法推翻一項假設，並不代表該假設為真，它可能須要進一步驗證其真確性。在蒐集得到資料之前，無法合理地形成或檢驗任何具體的假設，因此所有火災和爆炸事件的調查都應由調查人員進行，不應對事件的起源、著火順序、原因、火勢蔓延或責任等做出任何假設，除非使用科學方法得出可檢驗的假設，並且這些假設無法被嚴格檢驗推翻。

調查過程常犯錯誤有期望偏見（expectation bias），是一種在科學分析中普遍存在的現象，個人對結果的預期影響了對自己或他人行為的感知，調查人員在沒有檢查或考慮所有相關資料的情況下，就得出不成熟的結論。調查人員並非以合乎邏輯和公正的方式，蒐集和檢查所有資料得出可靠的科學結論，而是利用不成熟的判斷來指導調查過程、分析，並最終得出結論，而這種方式在科學上是無效的。在調查過程中帶入期望偏見，會導致只採用支持先前形成結論的數據，並且常常導致誤解或放棄非支持原始觀點的數據，調查人員應透過正確使用科學方法來避免期望偏見。另外有一種錯誤是確認偏見（confirmation bias），人在處理資訊時，傾向於尋找或解讀與自身既有信念一致的資訊。不同的假設可能與相同的資料符合，使用科學方法時，假設的檢驗應該以推翻該假設為目標。當調查人員試圖證明假設時，可能出現確認偏見導致他們忽略其他假設。只有經過嚴格的檢驗後，假設仍未被證明錯誤才能說假設成立。

調查工作

在大多數火災或爆炸事件中，調查工作基本使用科學方法，也包括以下步驟：接收任務、準備調查、進行調查、蒐集保存證據、分析事件、結論，以及確定程度。相關單位接收任務後應將火災事件通知調查人員，並告知其職責和任務，調查人員應該知道他是否須要確定起火原因和責任、製作書面或口頭報告、準備刑事或民事訴訟、為法規執行頒布或變更提出建議、向製造商或行業協會或政府機構採取行動提出建議，或判定其他的結果。準備調查工作時，調查人員應該整合自身的資源與力量規劃調查工作，在此階段若預先進行規劃可以大幅提高效率，增加調查的成功率，包括估計需要哪些工具、設備和人員（含勞動人力與專家），可以使初步現場調查以及後續的檢驗分析更加順利。也可以準備一個裝有必需工具和物品的裝備包，以便快速部署工作。

航空器火災或爆炸調查會對現場進行勘查，檢查事故現場的根本目的是蒐集所有可用資料，記錄事故現場和航空器的狀況。調查人員應檢查現場並蒐集盡可能多的分析所需資料。實際調查可能包括不同的步驟和程序，這將由任務的目的決定。航空器火災或爆炸調查可能包括以下全部或部分的任務：

- 現場檢查或審閱他人先前所製作的現場記錄
- 透過攝錄影和繪圖進行現場記錄
- 證據的鑑別、記錄和保存
- 證人訪談；審閱和分析他人的調查
- 識別和蒐集來自其他適當來源的資料

如果可能的話，在任何事件或事故的現場調查中，至少由 1 個獨立機構對現場進行檢查與蒐集記錄資料。調查人員可以利用先前妥善記錄的現場蒐集資料，透過適當運用科學方法對事件進行分析，從而得出有效的結論。所有的目標都是準確判斷事件的起源、原因和責任，然而不恰當的現場記錄可能會損害其他相關方從資料中獲得相同證據價值的機會，這種潛在的損害凸顯了全面現場記錄和資料蒐集的重要性。蒐集和保存證據時應識別、記錄、妥善蒐集和保存有價值的物證，以便進一步檢測評估或在法庭上出示。

所有蒐集到的可用資料應運用科學方法進行事故分析，依據任務的性質和範圍，調查人員應提出並驗證假設，解釋火災的起源、著火順序、火勢蔓延、火災原因，以及造成損害或傷亡的原因，或調查過程中發現的監管問題等。最終的結論是對

假設進行驗證後得出的，應根據相關原則、科學方法、測試、演示以及現場調查過程中獲得的事實資訊推導確定。

確定程度即對結論的信心，描述某人認可某項意見或結論的強度。一個人對任何結論都可能有高或低的確定程度。這個確定程度是透過評估調查人員對資料的信心、對資料分析的信心，以及對所形成假設的驗證結果來決定的。確定程度可能影響該結論的實際應用，尤其是在法律程序中。調查人員應該瞭解提供專家意見時所需的確定程度。常見的兩種確定程度為很可能（possible）與可能（probable）。確定程度為很可能，表示某項假設「比不成立更有可能成立」，也就是該假設為真的機率超過 50%。確定程度為可能，表示該假設可以被證明為「具有可行性」，但無法被判定為很可能。如果有 2 個或更多假設具有相同可能性，那麼確定程度必須界定為「可能」。如果某項看法的確定程度僅為「懷疑」，該看法便不具備專家意見的資格。如果確定程度僅為「可能」，則應明確表達該看法為「可能」。只有當確定程度被認為是「很可能」時，才應以合理確信的方式表達該看法。

2. 火災科學

名詞解釋

為具備基礎知識進行火災與爆炸調查工作，調查人員須瞭解以下火災科學相關名詞與定義：

火（Fire）是一種物質快速氧化過程，屬於化學反應，會釋放出不同強度的光和熱，並可能產生煙霧。

閃點（Flash point）是指透過特定實驗室測試確定的液體最低溫度，在此溫度下，液體以足夠的速率釋放蒸汽，以支持其表面的瞬時火焰。

燃點（Firepoint/Flamepoint）是指液體燃料點燃後，產生足夠蒸氣以支持燃燒的溫度。

自燃溫度（Auto-ignition temperature）是指可燃物質在空氣中無需火花或火焰即可點燃的最低溫度。

爆燃 (Deflagration) 是指將物質加熱至快速燃燒的過程。燃燒以亞音速在氣體中或爆炸物表面傳播，由熱傳遞驅動。

爆轟 (Detonation) 是一種燃燒類型，超音速放熱前沿加速穿過介質，最終驅動衝擊波鋒面在其正前方傳播。爆轟由常規固體和液體炸藥以及反應氣體產生，發生在爆炸之前。

爆炸 (Explosion) 是指位能 (化學能或機械能) 突然轉化為動能，同時產生和釋放加壓氣體，或僅釋放加壓氣體，這些高壓氣體隨後進行移動，改變或粉碎附近的物質。

熱裂解 (Pyrolysis) 是指物質僅靠熱作用 (高溫引起的分解) 分解或破碎成較簡單的分子化合物的過程，熱裂解先於燃燒。

燃燒 (Combustion) 是一種化學氧化過程，其發生速度足夠快，能夠產生熱量，通常還會以微光或火焰的形式產生光。

傳導 (Conduction) 是透過直接接觸將熱量傳遞到其它物體或物體內部。

對流 (Convection) 是透過氣體或液體等介質內的循環進行熱量傳遞。

輻射 (Radiation) 是透過電磁能進行熱量傳遞。

閃燃 (Flashover) 閃燃是指封閉空間內大部分直接暴露的可燃材料幾乎同時被引燃的現象。當某些有機材料受熱時，會發生熱分解，並釋放出可燃氣體。

易燃性 (Flammability) 是指支持燃燒的能力，即化學物質燃燒或著火從而引發火災或燃燒的能力。引發化學物質燃燒所需的難易度可透過防火測試進行量化。通常材料被劃分為高度易燃、易燃和不易燃，可以在安全資料表 (SDS) 中找到相關資訊。

爆炸上限 (Upper explosive limit) 是指氣體或蒸氣的最高濃度 (佔空氣的體積百分比)，存在點火源 (電弧、火焰或熱量) 的情況下，高於此濃度時火焰不會蔓延。高於爆炸上限的濃度「過濃」無法燃燒，也稱為可燃上限。

爆炸下限（Lower explosive limit）是指氣體或蒸氣在空氣中燃燒的最低濃度。不同氣體的爆炸下限各不相同，但大多數可燃氣體低於 5%。

化學計量比（Stoichiometric ratio）化學計量比是指理想的空氣與燃料混合比例，使所有燃料都能燃燒且無過量空氣剩餘。對於汽油，其化學計量比約為 14.7:1，即每燃燒 1 g 燃料，需要 14.7 g 空氣。

火勢蔓延（Fire spread）是指火勢從一個地方蔓延到另一個地方，可能是複雜的過程。

墜落（Dropdown）是指燃燒物垂墜或掉落所導致的火勢蔓延。

焦炭（Char）是指有機物在燃燒或熱裂解後，留下的黑色固體殘留物，主要由碳組成。

煙灰（Soot）是燃料未完全燃燒時產生的黑色粉末狀物質，火災中煙灰通常會被離子化，從而被吸引到某些表面並附著其上。

火災物理與化學

元素是指無法經由化學變化分解的純淨物質，例如：金、碳、氧。單純元素只包含一種原子，而原子是元素中能夠參與化學反應的最小粒子。原子的相互組合稱為分子，分子是元素或化合物中能獨立穩定存在的最小粒子。化合物由 2 種或 2 種以上的原子組成。例如水（ H_2O ）、二氧化碳（ CO_2 ）、氯化鈉（ NaCl ）等。化合物也可分解，例如 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 。有機化學是含碳化合物的化學，有機化合物主要成分是碳，大多含有氫，有些含有氧、氮與其他元素。有機燃料包括甲烷、汽油、煤油、紙張、木材、塑膠和纖維等，而碳氫化合物是由碳和氫組成的化合物。

傳統火災概念模型為火三角如圖 2-1，說明維持火勢所必需的 3 種要素（熱、氧氣及燃料）之間的相互依存關係，三角形若一邊缺失則圖形不完整，同樣如果起火的 3 種要素缺少任何一項，就不會發生火勢。雖然火三角圖有助於說明起火的基本要素，但從觀察到的現象及對起火理論進行的研究表明，火焰中發生了更複雜的反應。

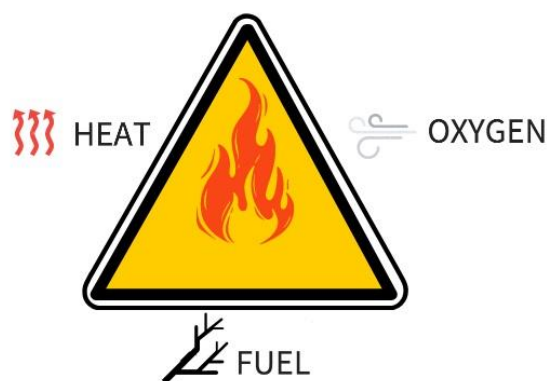


圖 2-1 火三角模型

起火是一種發生速度非常快的化學反應，它會產生可被偵測的熱和光。更具體地說，火是一系列放熱氧化反應，要發生這種氧化反應，必須存在可燃物質（燃料）和氧化劑（氧氣），例如丙烷 + 氧氣 → 二氧化碳 + 水（ $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 \rightarrow 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ ）。觀察結果表明還有另一種維持火勢所需的基本要素。研究將這第 4 個要素確定為「化學連鎖反應」或「未受抑制的連鎖反應」。當放熱反應產生的過量熱量回傳至燃料，使其產生可燃蒸氣並在沒有原本點火源的情況下引發燃燒時，就會發生未受抑制的連鎖反應。用來說明第 4 個要素的是火四面體模型，如圖 2-2。

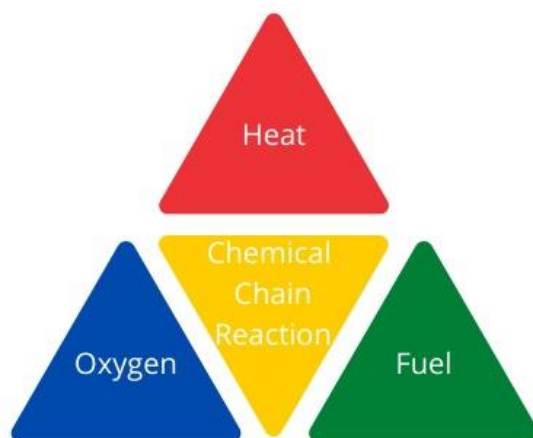


圖 2-2 火四面體模型

火四面體是一個立體四面金字塔，四面體的每一面都標示 1 種要素，用來描述維持火勢所需 4 種要素之間的相互關係。在燃料（還原劑）、氧氣（氧化劑）、熱（能量回到燃料）之外，第 4 面標示為化學連鎖反應或未受抑制的連鎖反應（自由基）。

氧化是指氧氣與其他元素或化合物結合的化學反應，或是化合物失去電子的化學反應。常見的氧化基團包含過氧化物（peroxides）、硝酸鹽（nitrates）、亞硝酸鹽（nitrites）、高氯酸鹽（perchlorates）、氯酸鹽（chlorates）、亞氯酸鹽（chlorites）、次氯酸鹽（hypochlorites）、重鉻酸鹽（dichromates）、高錳酸鹽（permanganates）、過硫酸鹽（persulfates）等。

所有物質都會燃燒，但並非所有物質都以相同的方式燃燒，物質的燃燒方式可能不同，但它們都需要氧氣。木炭會發出微弱的光芒，木材、天然氣、煤炭和石油會透過火焰發熱，火焰的顏色取決於燃燒的材料和溫度。如果物質快速燃燒會造成爆炸，例如當氧氣與燃料混合物在可燃極限內且有點火源時，會發生爆炸產生大量氣體，這些燃燒氣體會迅速劇烈地膨脹，產生熱、光、聲音和衝擊波，衝擊波就是我們所感知到的爆炸。

若要發生火災須符合以下條件：必須有燃料（可燃物質），燃料必須被加熱到放出足夠的蒸汽，形成可燃混合物。然後蒸氣必須加熱到其燃點，也必須有足夠的氧氣。在大多數火災中，氧化劑是地球大氣中的氧氣，但氧化劑也可以是某種化學氧化劑。只有當燃料空氣比在一定範圍內時燃料才會燃燒，這被稱為易燃（爆炸）範圍。混合物在化學計量比下，是燃燒效率最高的最佳比例，反應物之間完全反應且無剩餘。大氣中氧氣的體積濃度約為 21%，在 21°C 時如果氧氣水平低至 14%-16%也可發生燃燒。此外環境越熱燃燒所需要的氧氣越少，發生閃燃後的情況下，燃燒仍可以接近零的速率繼續進行。

燃料被定義為任何能夠燃燒的物質，大多數燃料是有機物，例如木材、塑膠、汽油、酒精、天然氣等。無機燃料不含碳，包括金屬鎂和鈉。所有燃料都是物質，並以固態、液態或氣態 3 種狀態之一存在。燃料的物理狀態包括：固體—剛性、固定的立體物體，具有確定的形狀；液體—可流動並呈現裝載容器的形狀；氣體—除非置於密封容器中，否則沒有確定的體積或形狀。物質會根據壓力和溫度發生物理變化，氣體可以被冷卻或壓縮變成液體。例如丙烷液體可以加熱變成氣體，也可以冷卻變成固體，能在 3 種狀態之間變換。

固體燃料點燃

固體燃料的燃燒，比液體或氣體的燃燒更為複雜。例如木材加熱時會形成氣態分解化合物留下燒焦的部分，這個過程稱為熱裂解。即使火焰尚未形成，木材也會開始分解，反應從表面轉移到木材內，隨著木材吸收熱量氣體持續逸出，當有足夠的可燃氣體時，氣體就會被點燃，溫度可達 315-482°C。固體燃料要燃燒產生火焰必須先熔化並氣化，或熱裂解成氣體或蒸氣，過程必須加熱才能產生蒸氣。密度對固體的點火和燃燒非常重要，高密度材料相比低密度材料，可以更快將能量從點火源傳導出去，例如較厚實的橡木比松木難被點燃，需要更高的熱量與更長的持續時間才能點燃。

固體燃料的點燃形式有 3 種：悶燒點燃 (smoldering ignition)、引導燃燒點燃 (piloted flaming ignition)，及自燃點燃 (flaming autoignition)。悶燒點燃是一種固相燃燒過程，通常包括熱分解步驟以產生焦炭，然後對生成的焦炭進行固相燃燒。熱分解過程通常稱為熱裂解，可能是純粹的受熱過程，也可能涉及與氧氣的相互作用。若燃料本身無法進行固相燃燒，也不能熱裂解形成可燃焦炭的材料無法悶燒點燃。這類材料例如熱固性聚合物（聚氨酯泡棉），通常在劇烈加熱時會分解成液體，在適度加熱下不會燒焦。悶燒一詞有時不恰當地用來描述固體燃料對外部熱流的無火焰反應。熱塑性塑膠等固體燃料，在受到足夠的熱流時會降解、氣化並釋放蒸氣。此氣化過程通常不涉及氧化反應因此是吸熱過程，此過程是熱裂解而不是悶燒。悶燒必須涉及固相放熱過程，燃燒必須能夠自我維持，一旦點燃無需外部能量輸入也能繼續燃燒。

使固體燃料燃燒並產生火焰，物質必須熔化並氣化或熱裂解成氣體。在這兩種情況下，都必須向燃料提供熱量以產生可燃蒸汽。在引導燃燒點燃中，這些可燃蒸汽由火花、小火焰、灰燼或熱表面等點燃源點燃。自燃點燃是指在沒有點燃源的情況下，固體燃料的點火依賴於加熱產生的可燃氣體的自燃。自燃溫度沒有明確的定義，因為它們高度依賴環境條件。表面積與質量比也會影響點火所需的熱能，例如木屑比木塊表面積大得多，更容易被點燃。

塑膠是由碳氫化合物以各種方式連接在一起所構成的高分子量化合物，也被稱為聚合物，例如合成橡膠、尼龍、聚酯、聚苯乙烯和聚乙烯等。塑膠是固態碳氫燃料，如被加熱會導致塑膠熱裂解，分解成更簡單、更容易揮發（分子量更低）的

化合物。熱塑性塑膠對溫度敏感，受熱時會變軟並像液體一樣流動，冷卻後會重新凝固。大約 90%的塑膠屬於熱塑性塑膠，例如聚乙烯、聚苯乙烯和尼龍。熱塑性塑膠會熔化、滴落並可能引發二次火災。另有一類熱固性塑膠是交聯結構具有熱穩定性，一旦成型就無法再次熔化和重新成型。例如：聚氨酯、矽膠、聚酯和環氧樹脂。所有塑膠製品均易燃，雖然使用添加劑可以提高塑膠的燃點，但目前已知的任何添加劑都無法使其變得不可燃，常見塑膠例如聚氨酯，其燃點介於 456-579°C 之間。

塑膠燃燒的特徵是迅速產生大量濃密的黑煙，所有塑膠燃燒時都會產生有毒氣體。塑膠是碳氫化合物的衍生物，含有硫、氧、氮、氯等，根據燃燒塑膠的類型能產生其他有毒氣體，例如氰化氫、氯化氫、氨和一氧化二氮。塑膠燃燒產生的多種有毒氣體易燃，加熱燃燒時可能還會釋放其它有毒副產品，塑膠燃燒產生的有毒物質在屍體檢驗中具有重要意義。

液體燃料點燃

液體燃料方面，當可燃或易燃液體的表面，曝露於高於其閃點的空氣中時會產生蒸汽，蒸汽與燃料及空氣混合形成混合物。當燃料及空氣混合物處於其可燃極限範圍內，並曝露於高於其燃點的點火源時，混合物將易於點燃。可燃極限指易燃氣體和空氣混合物發生點火的體積百分比範圍，存在下限和上限，除了某些不穩定或反應性物質外，液體不會真正被「點燃」，液體的點燃通常是指液體蒸氣的點燃，並且與大氣一起點燃。當液體表面曝露於高於絕對零度的空氣中時，液體會表現出蒸氣壓發生汽化作用，汽化對溫度高度敏感，也取決於液體的化學性質。為了使液體蒸氣形成可燃混合物，液體的溫度必須等於或高於其閃點。液體的閃點是指其表面能釋放出足夠蒸氣，以支撐瞬時火焰的最低溫度，而霧化液體或噴霧更容易被點燃。

閃點是指液體必須被加熱至某一溫度，才會發生瞬時火焰的現象。這個溫度可以透過多種測試設備測量，但其結果未必能反映真實世界或所有可能情況。某些液體可透過毛細作用、噴灑或其他方式被點燃，其溫度可能與文件記載的閃點不同。若液體為混合物而非純物質，其成分可能個別揮發，導致閃點表現也不同。閃點

與自燃溫度之間並無直接關係。例如甲烷的自燃溫度為 640°C ，而閃點為攝氏 -188°C 。

在密閉空間中，液體上方的蒸氣會達到平衡狀態。對於開放於大氣的容器，液體會持續因蒸發而損失。在這類容器中，隨著距離液面高度增加，蒸氣濃度會逐漸降低，因此若有點火源靠近開口容器，只有在某些特定高度才可能點燃。這是假設大氣處於靜止狀態，若內部空氣存在湍流將幾乎消除濃度梯度。通常只有在對空油箱進行焊接時才有可能發生爆炸，若油箱內含有任何液體燃料，其內部蒸氣濃度通常高於可燃上限不會燃燒，除非處在極低溫環境下。

另有熱表面點燃（hot surface ignition）類型，指可燃蒸氣或氣體因接觸高溫表面而被點燃的現象，受燃料的化學反應性與揮發性的影響。如果熱表面形成一個封閉空間，點燃通常會發生在接近自燃溫度的條件下。這種情況相對罕見，假設熱表面點燃溫度比自燃溫度高出約 200°C ，通常可作為較可靠的估計值，熱表面點燃比想像中還要難發生。關於液體在熱表面點燃的現象，已有許多測試與研究進行。Jet A 燃料被噴入一個帶強制氣流的圓形導管中，在下游區段容器壁被加熱。燃料霧化液滴的粒徑約為 $20\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$ ，在這些條件下發現液滴在撞擊加熱壁面之前就已完全汽化，點燃所需的壁面溫度會隨著空氣流速的增加而提高。其他類似研究也得出結論，若航空發動機中的熱表面溫度低於 260°C ，發生熱表面點燃的可能性相當低。

對單一燃料液滴的點燃研究已進行多年，但尚未得出具有廣泛普遍性的結論。然而已知在固定溫度下，點燃時間與燃料種類及液滴大小有關。當存在 2 個液滴時，會產生距離效應（proximity effect），若液滴間距為其直徑的 4 到 5 倍時，點燃速度比間距更近時還要快。發動機是將液體燃料以氣膠、霧狀或噴霧形式進行燃燒，液滴尺寸通常落在 $5\text{--}300\text{ }\mu\text{m}$ 的範圍內。點燃通常以以下 3 種方式之一發生：局部點燃（local ignition）、整體點燃（global ignition）、均勻點燃（homogeneous ignition）。局部點燃屬大直徑液滴所形成的氣膠，其點燃方式與單一液滴類似，相鄰液滴之間幾乎沒有互相影響。整體點燃屬小直徑液滴所形成的氣膠，其反應區域分布在多個液滴之間，液滴不再以單獨個體行為表現。點燃時火焰會包圍外部區域的多個液滴，而內部區域因燃料過濃而不會有明顯火焰產生。均勻點燃屬更小尺寸的

液滴氣膠，在高溫環境下會先汽化再點燃，因此其點燃行為與均勻氣體蒸氣的燃燒無明顯差異。

可燃液體可被分類為 Class I 易燃液體（內含 Class IA/Class IB/Class IC）、Class II、Class IIIA、Class IIIB，係依據閃點、蒸氣壓與沸點範圍訂定。可燃液體又可分類為純化學品，例如戊烷、己烷、庚烷（與 Jet A 航空燃油蒸汽非常接近）；燃料，例如汽油、柴油、航空燃油；潤滑劑和冷卻劑，例如潤滑油、液壓油。

閃點是指液體釋放出足夠蒸氣，並與空氣形成可燃混合物的溫度。當閃點低於室溫時該液體被視為高度易燃，遇熱源即可被點燃。到達閃點溫度通常不足以持續燃燒，而燃點是指在點火源移除後，產生足夠的蒸氣得以維持持續火焰的溫度。液體依其閃點分為易燃（flammable）或可燃（combustible）。易燃液體閃點等於或低於 100°F，例如丙酮閃點為- 4°F（-20°C）。可燃液體閃點高於 100°F，例如 1 號燃油或煤油閃點 100-162°F（43-72°C）。而沸點是指液體在特定壓力下，當其蒸氣壓等於外部壓力時，液體開始產生氣泡並轉變為氣體的溫度，蒸氣壓是液體揮發性的良好指標。沸點低則蒸氣壓高、蒸氣濃度高、閃點低；沸點高則蒸氣壓低、蒸氣濃度低、閃點高。

液體自燃溫度是指燃料在空氣中，被加熱到一定溫度後能點燃，並無需火焰或火花。閃點為-45°F（-43°C）的汽油必須加熱到至 495°F（257°C）才能自燃。這是在特定測試條件下點燃汽油所需的最低溫度。達到閃點或閃點以上的溫度容易引起火災，當實際達到燃點時便會導致燃燒發生。點火源如火柴溫度可達 648°C，或是香菸溫度可達 260-425°C，都超過了易燃液體的自燃溫度。即使易燃液體或氣體產生蒸汽，並且點火源的溫度超過了燃點，仍然可以不發生火災爆炸，因為在發生火災爆炸之前，液體或氣體燃料濃度也必須處於易燃爆炸範圍之內。

可燃性範圍越大，在有點火源情形下越容易引發火災，可燃性範圍較窄的燃料較難點燃，可燃性範圍寬的燃料容易點燃。液體以液態存在是因為它們的蒸氣壓低於周圍的大氣壓力，分子不斷從液體表面逸出到液體上方的空間。蒸氣壓是蒸氣與其液體達到平衡時所施加的壓力，如果液體溫度升高，其蒸氣壓將接近並最終超過大氣壓力。大多數液體蒸氣比空氣重，這會導致它們下沉並分散在最底層。

我們可以透過檢查物質的蒸氣密度來確定液體蒸氣的反應方式，蒸氣密度是氣體或蒸氣的重量相對於空氣的重量。根據定義空氣的蒸氣密度為 1，蒸氣密度等於氣體分子量除以空氣分子量（約 29），例如甲烷蒸氣密度 $16/29 = 0.55$ ，甲烷約為空氣的二分之一重。乙烷蒸氣密度 $30/29 = 1.03$ ，乙烷與空氣重量大致相同。蒸氣密度小於 1 會上升；蒸氣密度大於 1 會下沉，蒸氣密度約等於 1 時，容易與空氣混合。

大多數蒸氣不會在密閉區域內被釋放流通，因風扇或是人員的移動，都會導致燃料蒸氣與空氣混合。當燃料與空氣混合爆炸時，我們必須評估觀察到的損害是源自於氣體的蒸氣密度還是源自於容器的結構。例如丙酮的蒸汽密度為 2.0，它會下沉並沿著地面傳播。易燃液體的蒸氣在環境溫度下通常比空氣密度大，可能會在地面傳播相當的距離到達點火源開始燃燒，並回火（flash back）返回燃料源。相比之下，可燃液體的蒸氣除非經過加熱，否則不太可能產生回火。液體或固體物質的比重，是該物質單位體積的重量，與同等體積標準參考物質（通常為 20°C 水）的重量之比。比重大於 1.0 的物質容易沉入水中，而比重小於 1.0 的物質容易浮在水面上。比重可以幫助決定在火災現場的採樣位置，例如丙酮的比重為 0.8 會浮在水面上。

液體也有可能在常溫下發生自燃，有時人們會將沾有油的舊抹布丟棄並遺忘，空氣中的氧氣會慢慢與其中的油結合，隨著氧化作用發生，逐漸累積足夠的熱量來點燃抹布。植物油或動物油可能會發生自燃，而石油基燃料不會發生自燃。

氣體燃料點燃

氣體可燃物質的質量極低，且氣體燃料點火所需的能量最少。氣體燃料例如天然氣，易於與空氣混合流動順暢，即使很小的點火源如火花也能夠點燃。一旦點燃火焰會迅速蔓延至燃料與空氣混合物，產生高溫並形成壓力波可能導致爆炸，氣體燃料燃燒的限制因素包括氣體量和密閉空間。

火焰蔓延

大多數的材料必須處於蒸氣狀態或氣體才能點燃，閃點低於環境溫度的液體不需要熱量即可產生易燃混合物。點火所需的時間和能量取決於：點火源的能量、燃料的熱惰性（thermal inertia）包含熱導率、密度與熱容量、燃料所需的最小點火能

量、燃料的幾何形狀等。為了使燃料達到其點燃溫度，熱傳導到燃料的速率，必須大於燃料傳導分散熱，或因輻射及對流造成的損失。悶燒是一種無焰燃燒，其主要熱源是焦炭的氧化放熱。固體燃料如木材會分解、氣化並釋放蒸氣，此過程稱為熱裂解，而每單位燃燒量中，悶燒產生的有毒副產物比明火火焰更多。

火災中火焰可能會蔓延，液體或固體燃料的火焰蔓延，是蒸發或熱裂解前緣的移動，該處表面達到燃點所需溫度時，火焰開始蔓延。火焰蔓延速度是火焰前緣變化的速率，對於氣體而言，火焰速度則是表面火焰前緣變化的速率。各種燃燒方式火焰傳播的速率如表 2-1，悶燒速率最慢，每秒 0.001 至 0.01 公分，爆轟速率最快，可達每秒 1 公里。

表 2-1 各種燃燒方式火焰傳播的速率

Flame Spread	Rate (cm/sec)
Smoldering	0.001 to 0.01
Lateral or downward spread on thick solids	0.1
Upward spread on thick solids	1 to 100
Horizontal spread on liquids	10 to 100
Premixed Flames deflagration detonations	10 to 100 100,000

火焰傳播分擴散火焰與預混火焰 2 種類型，火焰速度範圍從每秒數公分到每秒數公尺不等。擴散型燃燒過程較慢，尤其是液體與固體，需要時間進行氣化、混合、活化與反應，而輻射在維持固體與液體燃燒過程中扮演關鍵角色。固體與液體的燃燒速率，取決於有效熱能回饋與氣化熱之比值。在實際空氣環境中的燃燒行為會有所不同，影響因素包括：燃料的物理性質與燃料載量、初始壓力與溫度、侷限程度、通風條件（自然或強制通風）等。

綜合火災燃燒的原理，熱分解會釋放燃料中的原子，這些原子隨後成為「自由基」，自由基不穩定，會與空氣中的氧氣產生反應。氧氣、氯酸鹽及硝酸鹽等氧化劑有

助於燃燒，易與其他元素的電子結合。一旦燃燒將持續進行並且通常會加速，直到可燃物被消耗、氧氣減少至足以抑制燃燒的程度、熱量降低，或火焰被化學抑制並冷卻至足以防止進一步反應。燃燒需要可燃物（燃料）、空氣或氧化劑，以及點火源。可燃物必須在有空氣或氧化劑的情況下被加熱，才會點燃並持續支持火焰的蔓延，隨後的燃燒主要取決於對正在氣化的可燃物的熱能回饋。雖然有少數例外，但一般來說只有氣體會直接燃燒，固體與液體燃料需要足夠的熱能來釋放可燃氣體後才能燃燒。

3. 航空器火災

油池火災

航空器火災的燃料，可能是發動機燃油、液壓油、潤滑油、液壓系統、內裝材料（地毯、襯墊等）、電線絕緣層、椅墊、貨物（尤其是鋰電池），甚至是人體組織。航空器可能因油箱破損的燃油洩漏而引發大面積地面火災，稱為油池火災（pool fire），油池火災由大量燃油溢出或釋放引起，例如機翼分離、主要油箱損壞、嚴重洩漏等。2007 年華航 120 號班機事故，肇因為止檔螺帽鬆脫穿刺油箱，造成燃油外洩形成油池火災，如圖 3-1。使外洩燃油著火的熱源可能有發動機熱段、機身與地面滑動產生的摩擦、電路短路等。油池火災通常是航空器發生事故後乘員生還性的最大因素，被視為重大風險。進行火災調查須考量油池的大小、燃燒時間、向機身的熱傳遞，以及火是否會燒穿機身等。油池火災火焰的蔓延取決於許多因素，例如液體溫度、風向風量、火焰回傳的熱量、液體表面張力（與溫度有關）、輻射和對流熱傳遞、油池退化率（液體蒸發）、油池尺寸等。



圖 3-1 航空器油池火災樣態

油池火災在航空領域已被廣泛模擬，火焰燒穿機身的時間是根據蒙皮厚度、隔熱隔音材料和其他機艙材料進行計算。依據歐盟航空安全署（EASA）委託的研究報告¹，對於油池火災，須考量乘員防護時間以及燒穿防護時間。乘員防護時間指事故事件序中，從航空器靜止到客艙內乘員失去對火焰侵入機身的保護的時間。燒穿防護時間指火焰從侵襲機身到穿入客艙的時間。若是金屬機身，再考量額外燒穿防護時間，指火焰從穿透機身蒙皮到侵入客艙的時間，不同的防護時間與時間序之關聯如圖 3-2。

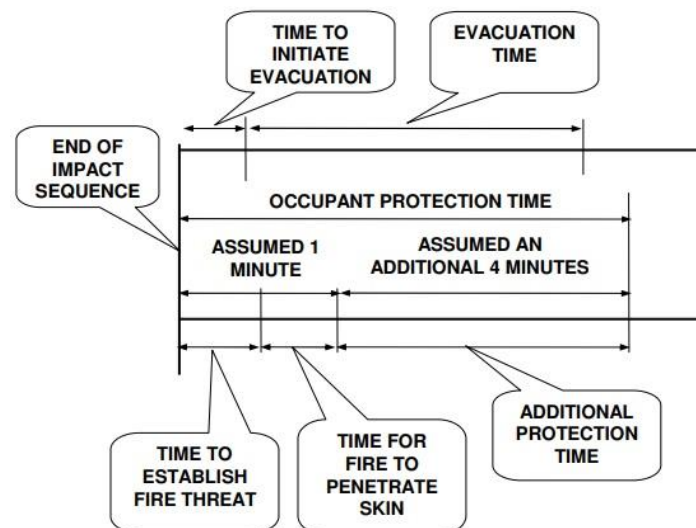


圖 3-2 金屬機身航空器乘員疏散和燒穿時間序

¹ Project EASA.2008.C19 Burnthrough Resistance of Fuselage

對於乘員保護時間，大多數油池火災事故，預計 5 分鐘後乘員疏散過程可能已完成，或者消防人員已控制住火勢。建議的保護時間為 5 分鐘，其中第 1 分鐘為火焰穿透機身蒙皮時間，後續 4 分鐘由內部防火材料提供保護。針對金屬機身，提供 4 分鐘額外防火時間通常已足夠。

EASA 委託的研究將開始疏散所需時間、完成疏散所需時間、消防員到達的時間、消防員控制火勢的時間等資料結合，採用蒙地卡羅方法得到從撞擊到疏散結束，乘員保護時間與累積機率分佈如圖 3-3。此模擬顯示 5 分鐘時間，可以保障事故中約 86%具行動能力的乘客完成疏散。對於大多數油池火災威脅，5 分鐘的保護時間可能足夠。

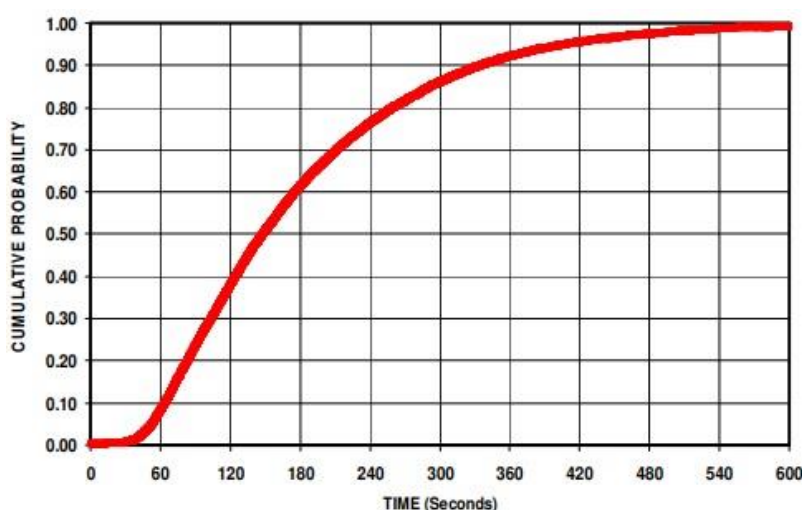


圖 3-3 乘員保護時間與累積機率分佈

機身可能因撞擊而破裂，並為火勢進入客艙提供可能的入口。破裂如果夠大可以讓乘客疏散，但破裂也可能大到讓火勢進入卻不足以讓乘客逃脫。在地面油池火災事故中，機身破裂似乎會對乘客造成更嚴重的火災威脅，然而研究大多數涉及機身破裂的地面油池火災事故，乘客都將破裂處作為逃生路線。為了確定機身破裂對乘客生存的影響已開發模型模擬，評估機身斷裂發生機率變化對乘員存活的影响。根據模型所得的結果，機身斷裂對乘員生存是不利影响。然而由於該研究是基於有限的數據，因此無法確定死亡人數的增加，是由於機身斷裂事故中遭受的更劇烈的撞擊強度，還是由於火勢蔓延至客艙。

案例回顧 1

1985 年 8 月 22 日，一架英國 Airtours B-737 客機在曼徹斯特起飛前起火，造成機上 137 人中 55 人死亡，這是民航史上的決定性時刻，因為它引發了民航業界的變革，包括緊急出口附近的座位布局、防火椅套、地板照明、防火牆和天花板、滅火器，以及更明確的疏散規定等。

在起飛階段飛行組員聽到客機下方傳來一聲巨響，機長以為是輪胎爆裂下令中止起飛並啟動反推裝置。當時操控客機的副駕駛施加大約 5 秒的猛烈煞車，機長擔心輪胎爆裂指示副駕駛減少機輪煞車，副駕駛依照指示執行。聽到巨響 9 秒後（航空器停下前約 36 秒），駕駛艙響起火警警報。10 秒後塔台管制員確認說「有猛烈火勢」。

聽到巨響 25 秒後（航空器停下前約 20 秒），塔台管制員建議飛行組員將乘客疏散到右側。一名空服員在航空器停下前約 10 秒試圖打開右前出口門，但由於緊急滑梯系統的設計缺陷門卡住了，空服員放棄嘗試打開。從聽到第 1 聲巨響起燃油就從左翼溢出，客機開始在跑道上減速時，燃油與引擎燃燒罐破洞中冒出的火焰接觸並被點燃。航空器停下後燃油仍從一個面積為 270 平方公分的開口處以每分鐘 450- 680 公升的速度洩漏，導致火勢不斷蔓延，如圖 3-4。

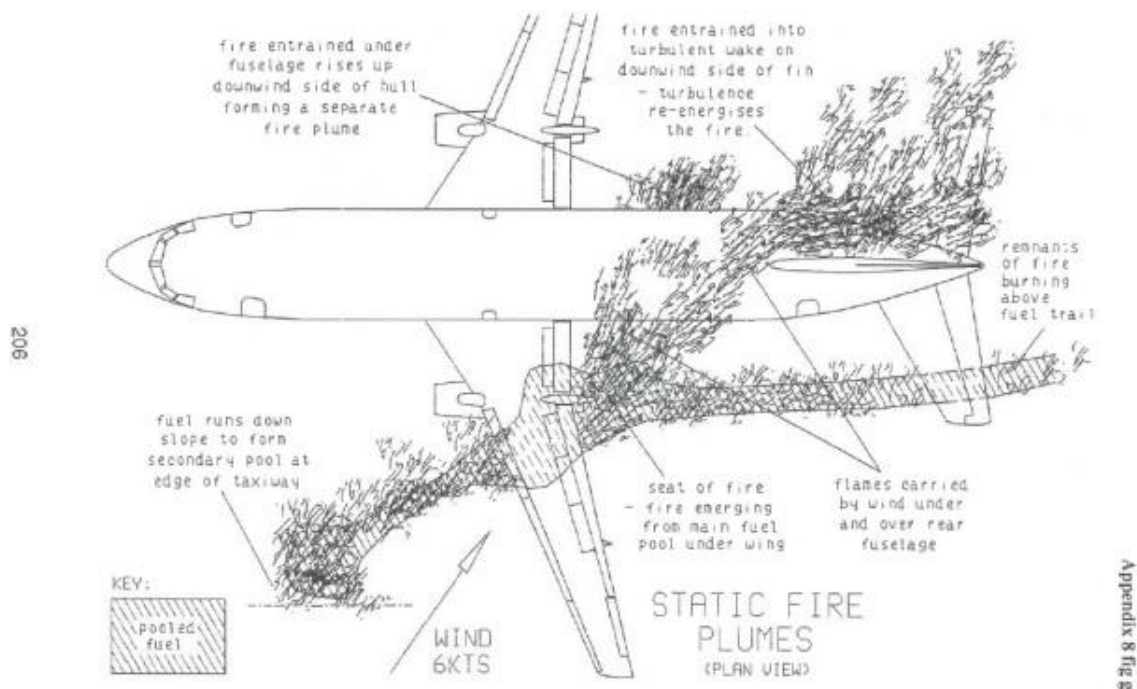


圖 3-4 Airtours B-737 事故火勢平面圖

此時火焰已經穿透客艙地板以下的鋁合金蒙皮，英國航空事故調查處（AAIB）估計火焰穿透機身蒙皮的時間是從航空器停止前 5 秒到停止後 13 秒。坐在走道左側和後方的乘客感受到強烈的火焰輻射熱急於逃離，其中許多人在航空器仍在移動時就站立或進入走道。

航空器停下時機頭朝向西北方，當時有 6 至 7 節的微風從西方吹來，將濃煙偶爾還有火焰帶入前方左側艙門。最初開啟艙門時航空器正對著風向，出口處仍然清晰可見。當左前艙門打開時，產生了從航空器前方向後方的氣流，並經由右後艙門排出，這很可能使煙霧限制在航空器後部。但當右側機翼上方出口與右前出口開啟後，這股氣流被打斷，整個機艙迅速被煙霧充滿，左後出口則一直保持關閉。

航空器停下後 1 分鐘內，火焰通過地板並沿著左側侵入客艙後方。事故調查人員表示，火勢如此迅速地蔓延到客艙，似乎與航空運輸業對此類火災的預期明顯相悖，當時航空運輸業界預期，在火災達到直接威脅乘客的程度之前，乘客將有 1 至 3 分鐘的時間進行疏散。

左發動機內的 9 號燃燒罐破裂，燃燒罐的一部分被彈射到機翼下方的油箱檢修蓋板上造成蓋板破裂，導致燃油洩漏到引擎燃燒產生的高溫氣體中。由此引發的火災造成災難性的後果，主要原因是航空器的飛行方向和迎風方向的火焰，儘管當時風速很小。該引擎的 9 號燃燒罐先前曾出現過裂紋，曾於 1983 年透過熔焊進行修復，該次修復並未包含固溶熱處理，而固溶熱處理是此類修復的必要程序。9 號燃燒罐前段斷裂的週緣與修復過程中焊接的部分裂痕重疊，部分裂縫位於修復時未發現裂縫的區域，並且在故障和隨後的火災中，裂縫邊緣嚴重受損。AAIB 無法斷定修復品質是否為事故的起因或促成因素。

這起 Airtours B-737 飛航事故發生之後，機身燒穿防護措施備受關注。AAIB 在事故調查報告中提出了以下建議：「在航空器火災研究方面，應透過加強機身耐火能力、限制火勢透過結構傳播，以及防止關鍵區域結構倒塌等方向，重新取得研究重心的平衡。應制定短期措施，應用於現有機型；長遠來看，火災相關標準應納入國際適航性要求的一部分」。

美國聯邦航空總署（FAA）第 25.856（b）條規則規定：對於擁有金屬機身的航空器，須額外提供 4 分鐘的額外燒穿防護時間，以保護乘客免受劇烈地面油池火災的危害。1998 年，英國民航局（CAA）對機身防火加固可能帶來的效益進行了研究，得出的結論是：改善效率似乎呈指數級變化，在超過 4 到 8 分鐘的額外保護之後改善有限。該研究僅涉及金屬機身航空器，分析了 1966 年至 1993 年間發生的 17 起飛航事故，這些事故中乘員由於地面火災導致火焰穿透客艙受傷。

航空器火勢路徑

燃燒後火焰和煙霧進入客艙的難易程度，取決於火焰可能通過的路徑，以及每種航空器類型的內部布局和所用材料。然而不同類型航空器之間存在足夠的共通性，可以評估最可能的火焰路徑。EASA 委託的研究檢視影響機身燒穿的因素，並探討事故後火焰可能經由哪些路徑進入客艙。這項研究結合以往的事故回顧及對現有航空器的調查，以研究遭受油池火災的航空器並確定一些典型的火勢路徑，如圖 3-5。

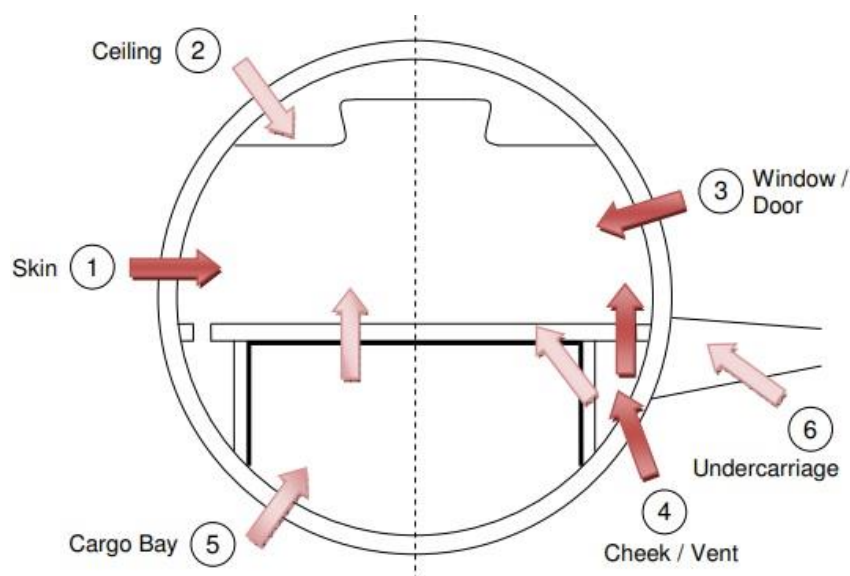


圖 3-5 典型火焰進入客艙路徑

火勢路徑 1 表示從客艙側面直接燃燒，研究表明火焰須穿透機身蒙皮、隔熱系統與客艙側壁板。火勢路徑 2 表示火焰穿透上部機身蒙皮、隔熱系統，然後是天花板或上方行李櫃，在這些區域由於客艙內飾板之間存在縫隙，煙霧很可能在火災發生前滲入客艙。火勢路徑 3 指火焰透過客艙窗戶或艙門進入客艙，火焰穿過客

艙壓克力窗板可直接進入有人區域，窗戶密封條在遇火時也可能產生煙霧。路徑 1 相比路徑 3，機身蒙皮火焰還須穿透隔熱系統及內裝壁板。研究發現艙門也是可能的火勢路徑，艙門應至少能提供與機身同等程度的防護。機身由蒙皮、隔熱系統和某些形式的堅固內裝面板組成，如果密封條所使用材料不耐燃，艙門周圍的密封條也可能成為火勢進入的途徑。

火勢路徑 4 從機身下方通過，包括燒穿機身蒙皮及隔熱袋進入腹艙內壁區域 (cheek area)，腹艙內壁區域通常會跨越機身的很大一部分，通常到翼盒或主起落架存放處才停止，從而使火勢沿著機身長度蔓延，並循著任何可用的路徑進入客艙。一旦到達腹艙內壁區域，火勢進入客艙的主要路徑是通過主貨艙或出風柵。對於僅搭載乘客的新型 Part 25 航空器，其主要貨艙將採用 C 類艙 (參見 CS 25.857)，該艙配備經 CS-25 Annex F Part III (參見 CS 25.855) 測試合格的側壁與天花板貨艙內襯，這些內襯構成重要的防火屏障，因此對客艙造成的直接威脅將主要來自出風柵。

火勢路徑 5 從機身下方進入貨艙，需要穿透機身蒙皮、隔絕包，然後是貨艙地板及襯墊。與側壁和天花板襯墊不同，C 級貨艙的地板襯墊只須滿足較為寬鬆的 CS-25 Annex F Part I 測試，但火焰仍須穿透天花板襯墊、客艙地板及其覆蓋物才能進入客艙。此外全面火災測試表明，當起落架收起時航空器不易受到火勢路徑 5 的火焰侵襲，然而無論起落架處於何種位置，曝露的腹艙內壁區域 (火勢路徑 4) 都是火焰可能穿透的區域。

火勢路徑 6 是經由主起落架艙，起落架放下後，火勢可能進入艙內並直接蔓延至耐壓地板。火勢要進入客艙，需要燒穿耐壓地板、隔熱系統，然後是客艙地板。起落架艙開口的大小取決於航空器設計，有些航空器在起落架放下時艙門可能全開，而有些航空器則可能部分或完全關閉，前起落架艙也存在類似的情況。

機身下方還有 1 條與貨艙門有關的火勢路徑 7，如圖 3-6。如果火焰燒穿貨艙門蒙皮，它可能會穿透艙門內蒙皮進入貨艙，或穿透艙門側壁或頂板進入艙口區域。進入貨艙的火勢在火路徑 5 範圍內，但如果貨艙門沒有使用經 Appendix F Part III 測試的貨艙襯墊，火勢可能會進入腹艙內壁區域。為防止火勢經由貨艙門進入腹

艙內壁區域，必須確保艙門本身或艙門周圍的側壁和頂板受到保護以免被燒穿。類似情況也存在於機身下方的其他檢修蓋板，例如設備艙檢修蓋板。

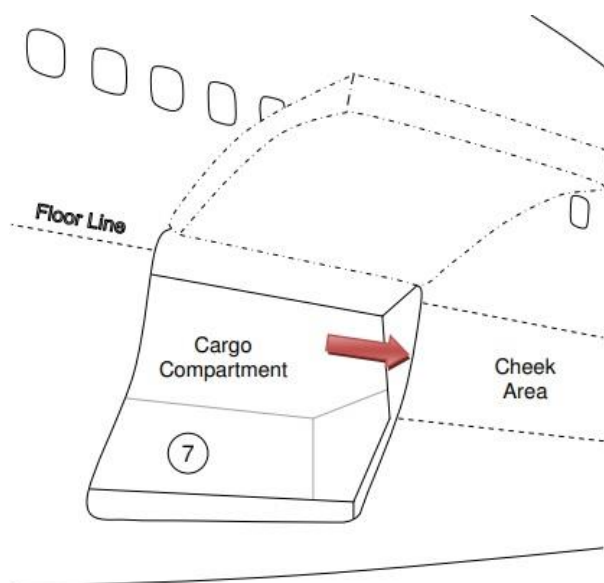


圖 3-6 通過貨艙門進入的火勢路徑

從機身上方到客艙，阻力最小的火勢路徑可能是通過蒙皮（路徑 1）或客艙窗戶（路徑 3）。另外從機身下方，若燒穿腹艙內壁區域可使火勢透過出風柵直接進入客艙。這些路徑在圖 3-5 中以較深色箭頭表示。測試表明起落架展開時航空器更容易受到傷害，因為有更大的表面積曝露在火焰中，露出可能在主輪艙與鼻輪艙艙內開通的額外路徑。

回顧 88 件地面油池火災事故，96% 的事故火焰進入了客艙。在 45% 的事故中，機身燒穿被評估為導致客艙煙霧或火勢進入的主要原因或助因。在其餘事故中，火勢是通過機身斷裂、破裂或打開的艙門立即進入客艙，因此之後發生的機身燒穿被認為是次要的因素。

案例回顧 2

2019 年 5 月 5 日俄羅斯航空 Aeroflot 1492 航班，機型 Sukhoi Superjet 100 在爬升過程中遭遇雷擊發生電氣故障，返回 Sheremetyevo 機場緊急迫降。航空器降落時彈跳並重落地導致後起落架折斷，燃料從機翼洩出引發火災。大火吞噬了航空器後部，78 名乘客中有 41 人在火災中喪生。事故後乘客從前客艙門滑梯疏散，副駕駛利用

逃生繩從駕駛艙窗戶爬出。俄羅斯航空公司聲稱疏散過程耗時 55 秒，但影片顯示滑梯在展開 70 秒後仍在使用的，且有乘客攜帶手提行李離開航空器，最終航空器後半段被大火燒毀，航空器降落後約 45 分鐘火勢被撲滅。

事故引發的大火吞噬了機翼、機身後部及尾翼，駕駛艙內後貨艙和輔助動力裝置（APU）的警報響起。客機沿跑道滑行向左偏轉，最後停在兩條相鄰滑行道之間的草地上，機頭迎風。40 名乘客及坐在航空器後方的 1 名空服員罹難；1 名機組人員和 2 名乘客受重傷；3 名機組人員和 4 名乘客受輕傷；其餘 27 名乘客無傷。調查報告引述 Sukhoi 公司提供的資料，聲稱目前的認證要求並未考慮「起落架損壞後機身對地面的二次撞擊」的影響，期中報告並未調查事故中人員的生還因素。事故後當局對違反航空安全運輸規則產生致命結果的行為展開刑事調查，顯示出航空管制部門未能及時發出警報，且事故發生時消防車尚未離開消防隊。6 輛可用的消防車中只有 2 輛在事故發生後的 6 分鐘內參與滅火，而且它們沒有充填泡沫，而泡沫比水更能有效撲滅燃油引發的火災。2019 年 10 月 2 日機長被起訴，俄羅斯調查委員會發言人指出他的行為違反現行規定導致破壞和火災，檢察官試圖求處其 7 年監禁。

當地面油池火災發生在航空器下方或附近時，火焰流動衝擊機身下方是不可避免的，形成機身蒙皮被燒穿的根本風險。最常見的機身蒙皮材料為鋁合金，熔點約為 600°C，因此其抵抗溫度高達 1,100°C 燃油火焰的穿透能力非常有限。鋁合金機身蒙皮的燒穿時間可被查詢確認，蒙皮的熔化時間僅為 15 至 60 秒，取決於其厚度，機身蒙皮加上襯板內的隔熱隔音材質，可能會增加機身整體的燒穿時間。然而 FAA 於 1988/1989 年利用 DC-8 和 Convair 880 機身進行的全尺寸燒穿測試表明，即使安裝了隔熱隔音材料，機身也可能在 40 到 50 秒內被燒穿。

一旦機身下方蒙皮在地板以下的腹艙內壁區域發生燒穿，火焰或煙霧便能透過出風柵相對不受限制地進入客艙，這將對疏散乘客的生存構成直接威脅。FAA 的測試和大量事故調查報告的證據均支持這一觀點。相對的若客艙內襯板具備額外防護能力，則地板以上機身蒙皮部位被燒穿的風險會較低。這取決於襯板的耐火性能，以及襯板之間的接縫能否阻擋煙霧和火焰通過，除非襯板及其安裝經過專門設計以抵抗火焰穿透，否則它們不太可能提供任何有效的保護。

FAA 的全尺寸測試中，報告提到煙霧迅速進入航空電子設備艙，並且該艙室未有隔熱層。航空電子設備和其他需要散熱的發熱裝置，在機身蒙皮內側可能沒有設置隔熱層，這些未隔熱區域唯一的防火屏障是機身蒙皮，極易被快速燒穿。FAA 全尺寸測試儘管煙霧量相對較小，與主要進入途徑相比風險極小，但煙霧仍能以極快的速度穿過艙門密封條進入。當艙門密封條與邊框之間有細小縫隙，或密封條被火損壞時，煙霧可能會穿過密封條進入，可以藉由優化密封材料以最大限度提高阻燃性。在大多數航空器中客艙窗戶位於機身的上半部，然而在某些航空器客艙窗戶可能位於或部分位於下半部，客艙窗戶帶來的火災燒穿風險已另外評估。

案例回顧 3

1994 年 3 月 21 日西班牙 Vigo 機場，1 架麥道 DC-9-32 客機進場時高度過低，主起落架觸及跑道前方的進場燈與向上傾斜的地面，導致主起落架支柱及部分右翼油箱脫落。洩漏的燃油被點燃，火勢順著蔓延到跑道旁客機停止的地方，停止後火勢轉移到左側，幾乎影響整個機身外部造成嚴重損壞。

當客機進入跑道時，附近一輛車以 121.5 MHz 頻率報告了緊急情況，塔臺立即通知消防部門，消防人員攜帶裝備出勤。警報響起約 1 分鐘後，消防人員抵達並開始在左翼處滅火以保護疏散人員，30 秒後左側的火勢被撲滅，消防人員轉而撲滅右翼的火勢，1 分鐘後火勢被撲滅。客機停穩後機組員立即下指令疏散乘客，並將乘客與火災區域隔離，疏散工作有秩序。過程中使用了 2 個前門和左翼上方的 2 個緊急出口。右翼上方的緊急出口被打開導致煙霧進入客艙，消防人員試圖關閉但沒有成功，火勢撲滅後僅 2 分鐘，一些配備氣瓶和面罩的消防人員進入客艙，檢查乘客是否已全部疏散，共 110 名乘客和 6 名機組員全部疏散，無人員死亡。右後機身外部的火災損壞程度最嚴重，猛烈的火焰燒穿機身下部蒙皮，露出隔熱隔音層，2 組機身框架被燒穿。機身上半部在客艙窗戶周圍和上方被燒穿，機艙內部材料在客艙窗戶上方遭到火災損壞。西班牙事故調查機構 CIAIAC 已確認，內部火災損壞是由窗戶上方外部燒穿造成，而非由火災進入疏散期間打開的 Type III 翼上緊急出口造成。

客艙窗戶為外部火焰蔓延進入客艙區域提供潛在途徑，測試表明火焰可以在 5 分鐘內穿透客艙窗戶，在一些事故中乘客報告看到火焰從客艙窗戶進入。客艙窗戶

通常由幾片壓克力（acrylic）板製成。外層最厚須承受週期性的客艙壓力負荷，它還能起到隔音作用。窗戶厚度可沿著機身長度的變化，以滿足特定的聲學需求。中間層相較外層薄許多，用於在外層玻璃發生故障時承受客艙壓力負荷。最內層的非結構玻璃也較薄，有保護屏障的作用防止結構受損。外層和中間的結構通常由拉伸壓克力製成，與澆鑄壓克力相比，拉伸壓克力具有更高的強度。較薄的內層很可能由澆鑄壓克力製成。

沒有證據顯示窗戶會在極短的時間內被燒穿，整體而言，這些有限的數據在某種程度上與美國 FAA 於 1984 年窗戶測試的結果相符。1995 年英國 CAA 委託 Faverdale 技術中心使用中型尺度試驗，對機身面板進行測試，少數測試面板包含從 BAe 146 取下的客艙窗戶。測試過程中窗板在 39 秒後脫落，故障機制被描述為窗板密封條燃燒、周圍的鋁材變形，窗板熔化並脫落。但對 1985 年曼徹斯特 B-737 事故資料的評估，客艙窗戶在起火後 54 至 95 秒內燒穿。得出此時間範圍的依據，是假設火災發生在引擎壓裂油箱後不久，或左側乘客因外部起火而開始向前移動時（分別發生在航空器停止前 45 秒和 15 秒）。事故調查報告的結論，窗戶在航空器停止後至少 40 至 50 秒內被燒穿。

根據設計的不同，客艙壓克力窗板的防火燒穿時間約為 1 到 3 分鐘。在多份事故調查報告中，客艙窗戶被火穿透被認為是客艙環境迅速惡化的主要原因。客艙窗戶的防火燒穿性能可能受厚度、安裝細節與材料特性的影響，目前對客艙窗戶防火燒穿性能的研究似乎很少，進一步的研究可能會有所助益。如果將設計優化，客艙窗戶可以在至少在 4 分鐘內阻止火焰穿透，但可能會增加重量。

隔熱隔音材料安裝

靠近機身蒙皮的隔熱材料，如有任何縫隙都會導致火焰迅速蔓延到客艙。因此隔熱隔音襯裡的安裝必須能夠限制氣體通過，從而防止火焰迅速蔓延到隔絕包較冷的那一側。航空器結構上的保護塗層與防腐蝕劑，似乎會對測試建議的防護水準產生負面影響，特別容易受到影響的區域是在隔絕包重疊處。目前未安裝隔熱隔音層的航空器區域，尚無任何燒穿防護要求。使用隔熱隔音層作為保護客艙免受油池火災侵襲的措施，會因存在的任何縫隙而受到影響，這些縫隙可能是由於隔

熱隔音層提供的保護不連續，或航空器運作期間連接裝置老化造成。保護塗層和防腐蝕劑也可能會降低隔熱隔音層的保護等級，但現行規定並未涉及這方面內容。

為防止火焰進入耐壓殼而安裝的防火屏障，其完整性取決於機身框架是否被燒穿，從而導致屏障脫落離或掉落。如果使用隔熱毯作為屏障，則應將其牢固地夾在框架上，使其具有柔韌性以貼合框架輪廓，一旦機身蒙皮熔化，框架將受到隔熱毯的保護。此外應加強航空器火災研究，平衡機身的防火性能，限制火焰在結構中蔓延，並防止關鍵區域的結構坍塌。相關方應制定適用於現有機型的短期措施，但長期來看，防火標準應成為國際適航要求的一部分，即使由機身燒穿造成機身結構強度下降，對乘客生還機率似乎沒有顯著的影響。

現代的航空器設計，越來越多採用新的非金屬材料來製造機身蒙皮。波音 787 機身蒙皮大量使用碳纖維增強聚合物（CFRP），而空中巴士 A380 的機身上部蒙皮選擇一種 GLARE 玻璃纖維增強金屬層壓板。這些複合材料和層壓板與傳統鋁材相比具有許多顯著優勢，包括更高的耐火性。碳纖維增強聚合物在燃燒過程中往往能保持其結構完整性，碳纖維構成 CFRP 的主要成分，由於它們本質上是惰性的，因此 CFRP 板的燃燒方式類似於燒焦材料，燒焦的碳纖維會形成一層絕緣層，從而降低內部加熱和燃燒速度。然而用於增強纖維的樹脂會蒸發，導致材料膨脹至其體積的 2 倍。

GLARE 採用交替的鋁層和玻璃纖維層並用環氧樹脂粘合在一起，也比單純鋁材具有更優異的耐火性質。當曝露的鋁層熔化時，下方玻璃纖維周圍的環氧樹脂會碳化，從而保護其餘的鋁層，由於各分層的隔離效果，內側冷面的溫度可降低一半以上。波音公司已根據 FAR 25.855 的要求對 GLARE 作為貨艙內襯材料進行測試，厚度在 0.7 mm 和 1.4 mm 之間的樣品在 1,100°C 的火焰曝露 15 分鐘後沒有被燒透。雖然用於機身蒙皮的 GLARE 材質可能屬於不同等級，但確實證明其具有良好的耐火穿

4. 航空器火災與爆炸調查

飛行中起火/地面起火

調查人員進行航空器火災與爆炸調查，須釐清究竟是發生飛行中起火、地面起火，

或者是爆炸？起火點在哪裡？燃料和點火源又是什麼？

可能是飛行中起火的徵象包括：

連鎖性失效現象（cascading failures）

- 液壓系統故障
- 煙霧探測器失效
- 電氣系統故障
- 飛控系統失效
- 不尋常的多重同時性故障

機組員或乘客證據

- 感受到熱
- 聞到異味
- 聞到燒焦或煙味
- 與航管的通話
- 飛航資料記錄器（FDR）及座艙語音記錄器（CVR）紀錄
- 毒理學檢驗

衝壓空氣效應（ram air effects）

- 更高的火災溫度
- 氣流中形成的煙灰沉積（積碳）

可能是地面起火的徵象包括：

重新凝固的金屬滴（resolidified droplets）

- 熔化後重新凝固的鋼鐵或不鏽鋼
- 材料完全燒失
- 蓄意放置的物質（malicious material）

殘骸與碎片痕跡

- 被燒毀的客艙物品
- 貨物殘留物
- 座椅殘骸
- 乘客遺留物

殘骸檢查

- 金屬摺痕或折彎處的煙灰沉積

- 被火焰燒灼或冒煙痕跡
- 原本浸水部位上仍有火損煙燻的跡象

調查人員必須徹底評估事故目擊者的證詞，在一些事故調查中，目擊者聲稱他們在墜機前就看到火，但實際上火是在撞擊時發生的，因此調查人員必須謹慎地將證詞與殘骸檢查發現的證據進行聯結比對。

金屬材料特性

飛行中起火其他線索方面，若火災燃燒溫度超過 $1,700^{\circ}\text{C}$ ，將可熔化熔點約 $1,480^{\circ}\text{C}$ 的鋼鐵部件，而航空器在水平運動模式下，煙灰或飛濺物質會沉積在機身上，通常為局部性，但煙灰不會粘附在溫度高於 370°C 的表面。鋁合金熔點約 600°C ，如在飛行中被火焰加熱至接近熔融狀態，在遭受撞擊後因共晶熔化（eutectic melting），會形成掃帚狀開裂（broomstraw），末端看起來像一塊破碎的木材，如圖 4-1。



圖 4-1 鋁合金共晶熔化後開裂

不同材料熔點的差異，也可用來評估是否可能為飛行中起火。飛行中的高速氣流能使火燃燒得更熱更快，因此可能將高熔點金屬，例如錳（ $1,246^{\circ}\text{C}$ ）、鎳（ $1,455^{\circ}\text{C}$ ）、不鏽鋼（ $1,400-1,500^{\circ}\text{C}$ ）、鐵（ $1,538^{\circ}\text{C}$ ）、鈦（ $1,668^{\circ}\text{C}$ ）、鈇（ $1,910^{\circ}\text{C}$ ）等材質熔融。如果只有鋁合金（ 600°C ）、純鋁（ 660°C ）、鎂合金（ 676°C ）、玻璃軟化（ $760-870^{\circ}\text{C}$ ）、黃銅（ $900-940^{\circ}\text{C}$ ）、青銅（ 913°C ）、銀（ 961°C ）、金（ $1,064^{\circ}\text{C}$ ）、銅（ $1,085^{\circ}\text{C}$ ）等熔點相對較低材料熔融，地面火災的機會可能較大。此外當金屬在特定溫度範圍內受熱時，表面會因氧化形成不同顏色，這些顏色可用來協助判斷溫度或硬度變化，

如圖 4-2。但要注意檢查金屬表面受熱變色時有可能得出錯誤的結論，因為顏色產生取決於時間與溫度的相對關係。長時間曝露於低溫（正常運轉時）或短時間曝露於高溫（火災發生時）會導致相同的變色，例如鈦在 316°C 下曝露 260 分鐘的顏色，會與鈦在 538°C 下曝露 15 分鐘的顏色相同。

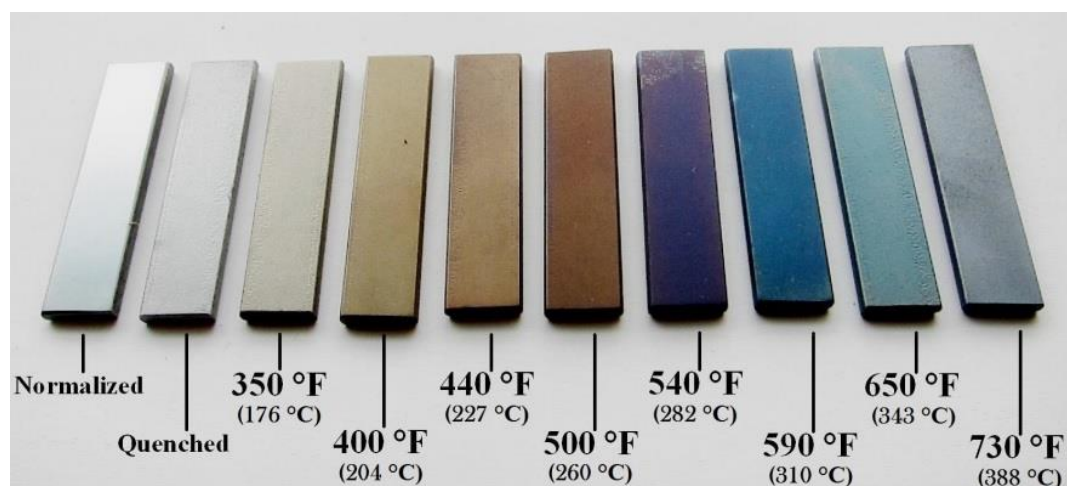


圖 4-2 鋼材表面在不同溫度下的顏色

航空器火災調查須蒐集間接證據，包括目擊者證詞及機組員在駕駛艙的行動，以及物理證據，包括飛行中起火的影響（溫度、煙灰形態）、地面起火的影響（溫度、氣流），還有瞭解燒毀部件的位置是因火災損害還是撞擊損害？哪一個先發生？

電線與電弧

航空器內的電氣系統，電源供應方面有發電機、電池、新科技設備等。電壓方面有交流電、直流電、電壓、電流等。控制方面有開關、變阻器、匯流排、系統等。保護方面有保險絲、斷路器、過壓/欠壓保護電路等。配電方面有匯流排、端子排、接線盒、電線、連接頭、電器接頭（cannon plugs）等。應用方面有系統控制、系統操作、照明等。

典型的電線故障模式是電線受到電氣、機械、熱、化學的影響，一架航空器內部可能有總長達 150 哩以上的線路，大多數線路緊密捆綁，也包含上百個電器接頭。某些線路位於預組裝區域無法檢查，且會累積遮蔽物如污垢、碎屑、液體等，進行線路檢查時也有可能增加損壞。飛機電線線材所使用的銅合金，包括無氧高導電性銅，純度 99.99%，退火溫度 370-650°C。以及高強度銅合金，包含鎳銅合金或鎳鉻銅合金，退火溫度 535-760°C，帶有增強的抗拉強度。電線如果拉伸負荷超過

拉伸強度會受到延展性破壞，顯微特徵呈現一端呈凹形杯狀，通常是拉伸方向的斷裂面，另一端呈凸型錐狀，通常是材料內部剪切造成的破面，如圖 4-3。電線使用的絕緣材料有聚氯乙烯（PVC）、氟碳聚酰亞胺（Kapton）、聚四氟乙烯（PTFE）、氟塑膜（ETFE）、聚烷烯（Polyalkene）等，各自有不同物理化學性質。

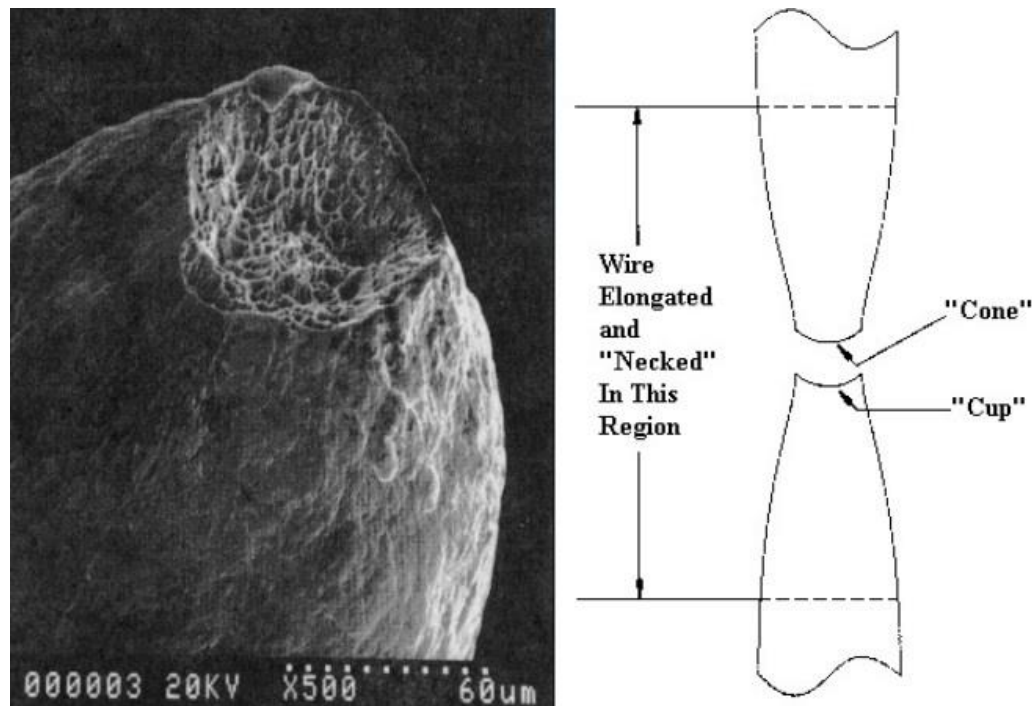


圖 4-3 電線拉伸斷裂處顯微構造

有關電線的一項重要風險，是電線之間可能產生電弧。NFPA 921 將電弧定義為跨越間隙的高溫發光放電，電弧中心的溫度可高達 5,000°C 甚至更高。電弧可能發生在導線彎曲處，因為製造缺陷或磨損產生裂縫，裂縫持續損傷完全延伸至內部銅導體。加速電弧產生的環境因素有陽光（紫外線照射）、濕氣與多種航空器液體。電線的局部損壞會導致相鄰電線的導體曝露，一般航空器的電壓包含 28 V 直流電及 115 V 交流電，濕氣可形成低電阻路徑，由含銅的低電阻通路在水分的橋接下形成，微小的短路使導電粒子加熱至白熾狀態，通路燃燒後重新形成最終導致火災。產生電弧的電線，會因熔融金屬快速冷卻末端形成圓珠狀，如圖 4-4。此外電弧也可能造成金屬轉移，如圖 4-5。微小銅滴沉積在鋁表面，左側是一般電子顯微鏡照片，右側為背散射影像，金屬原子序數越高則影像越亮。

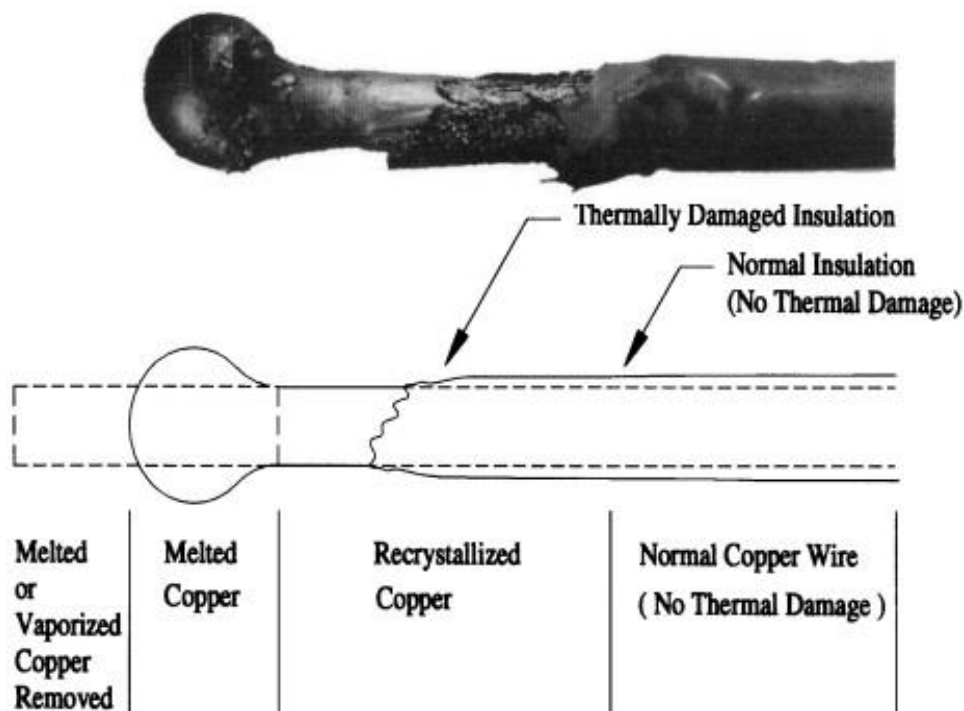


圖 4-4 發生電弧後形成球狀構造

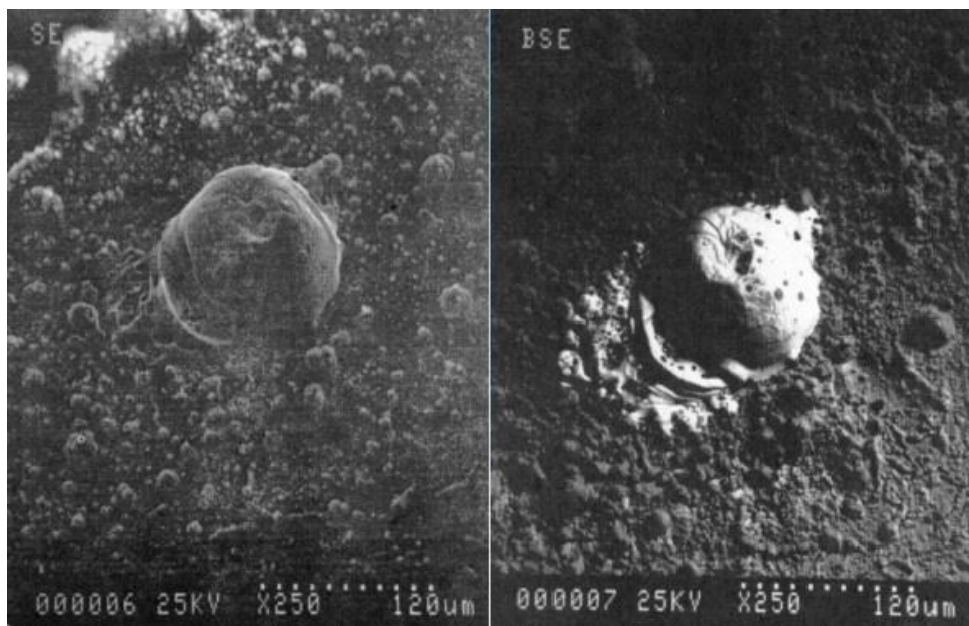


圖 4-5 微小銅滴沉積在鋁表面

電線絕緣材料可能受高熱損傷使化學成分分解，通常顏色逐漸變深、柔韌性喪失開裂、電阻性能喪失。如果電流超過負載，會損壞絕緣材料的內面而外表無變色。如絕緣材料受熱碳化損壞，碳化的部分能提供導電路徑，可能隨時間推移而產生電弧。

電線中的銅導體也會變色或腐蝕，熱曝露導致氧化或塗層材料被銅吸收。鍍銀電線中，銀與銅會彼此擴散（200-250°C 下），失去外觀光澤變為暗褐色，在相對較低的溫度下常變為暗黃色，形成硫化物或其他銀化合物，若曝露於燃油、液壓油或滅火泡沫時亦可能產生變色。當電鍍層消失後，會形成棕色、紅色與黑色的氧化銅，當金屬基材曝露於水或其他液體時，會形成綠色的銅化合物，如果是發生地面火災須謹慎處理。

電線的故障分析，要檢查是否有任何不均勻的損壞，如絕緣層損壞或變色、導體熔化、電線末端捲邊或磨損等。切割電線進行拆卸時，要在兩端標記並貼上唯一的識別碼，盡可能移出最大的區段，並將線束和連接器端對端完整移除。如果可疑區域位於設備連接點，移除時電線仍然保持連接，由於連接的複雜性移除時須小心操作。懷疑有發生電弧時，同時拆除附近的電線段或機身材料，檢查相鄰電線的表面是否有銅沉積物，並就線路、結構及表面與未受損區域比較。

案例回顧

1998 年 9 月 2 日，瑞士航空 111 航班於 2018 時從美國紐約起飛飛往瑞士日內瓦，載有 215 名乘客和 14 名機組人員。起飛約 53 分鐘後飛航組員在駕駛艙聞到異常氣味，他們注意到後上方一個區域並開始調查氣味來源。氣味不久後消失，飛航組員認為是空調系統異常，當他們評估看到的是煙霧之後決定轉降。最初打算轉降波士頓，之後改為 Halifax 國際機場。飛航組員準備降落時並未察覺火勢正在飛機前段天花板上方蔓延。在偵測到異常氣味約 13 分鐘後，飛航資料記錄器開始記錄一系列與飛機系統相關的故障，機組員宣布緊急狀態並表示需要立即降落。約 1 分鐘後無線電通訊中斷，飛行記錄器也停止運作。約 5 分 30 秒後客機墜毀於加拿大 Nova Scotia 省 Peggy's Cove 西南方約 5 哩處海域，客機完全毀損無人生還。

調查人員依據航管及記錄器資料瞭解客機因起火而墜毀，為對打撈上岸的機身殘骸碎片進行檢驗，製作了 2024、6061 及 7075 系列鋁合金，經不同溫度處理之試驗樣品，用以進行比對獲得燃燒溫度資訊，如圖 4-6。



圖 4-6 比對用之不同鋁合金試驗樣品

機頭上方受火災影響結構受損如圖 4-7，紅色標示結構損壞範圍。駕駛艙內溫度曾經極高，導致駕駛艙天花板內的鋁製部件融化，如圖 4-8。機身框架部分受熱損害以及煙灰附著情形如圖 4-9，綠色部分為缺失的框架。



圖 4-7 結構受熱損壞範圍



圖 4-8 駕駛艙右側後方區域

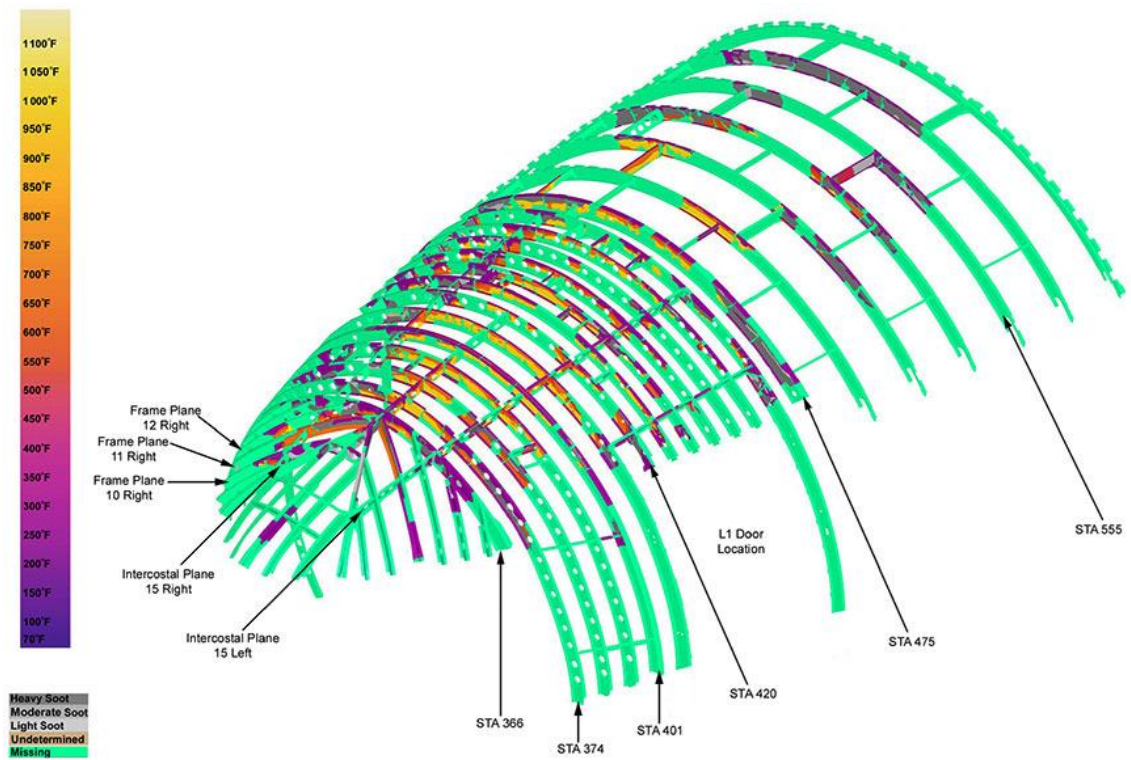


圖 4-9 機身結構受熱損壞範圍

殘骸打撈過程找到一束纏繞的電線如圖 4-10，其中 20 段電線中有 9 段被發現具有電弧損傷。

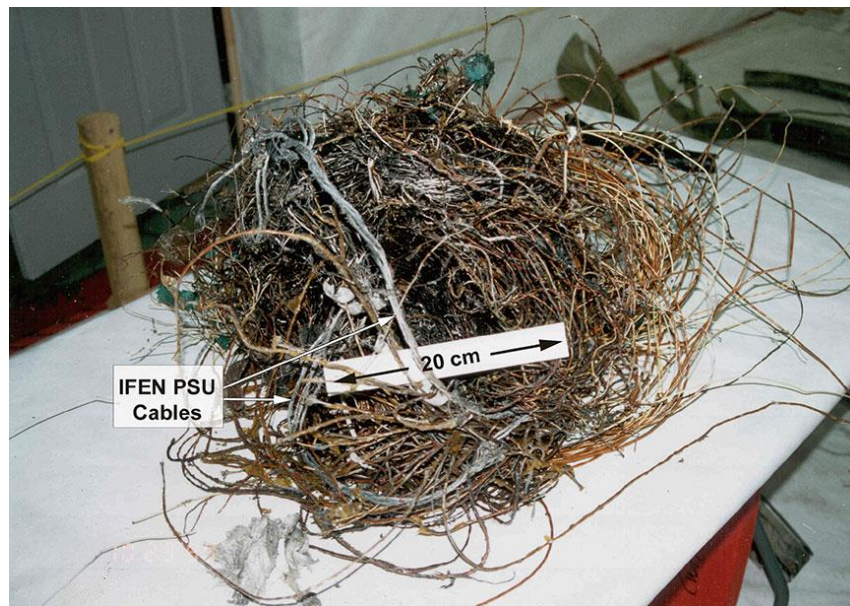


圖 4-10 打撈取得之證物電線

從 9 段電弧熔融電線中，根據其中 4 段仍附著殘留在電線上的彩色 ETFE 絕緣材料，確定電線屬於機上娛樂系統電源供應單元，如圖 4-11。

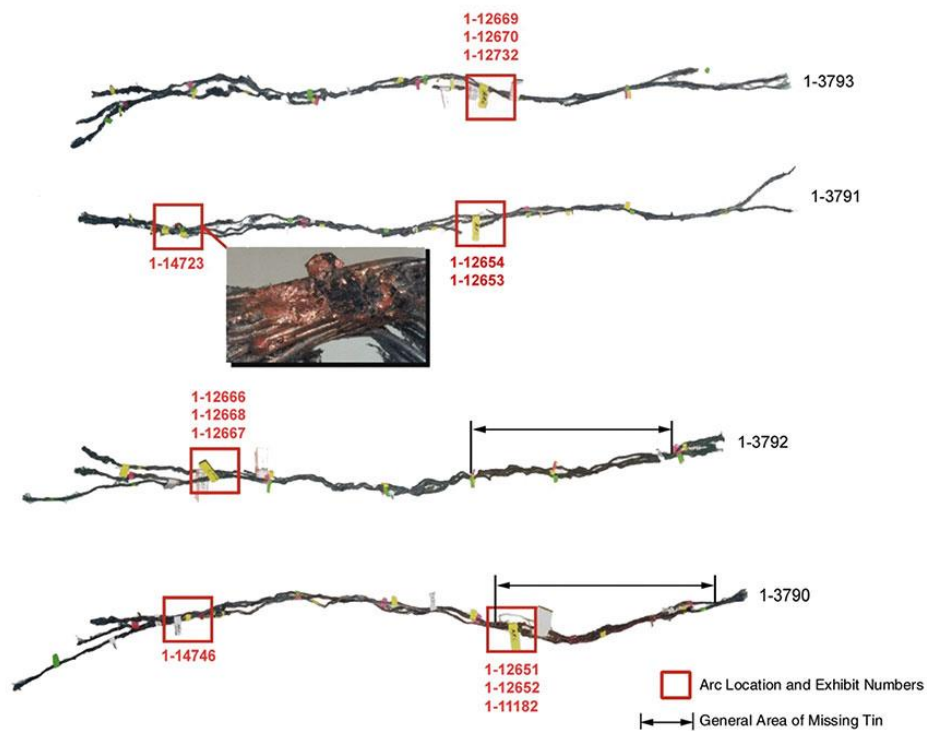
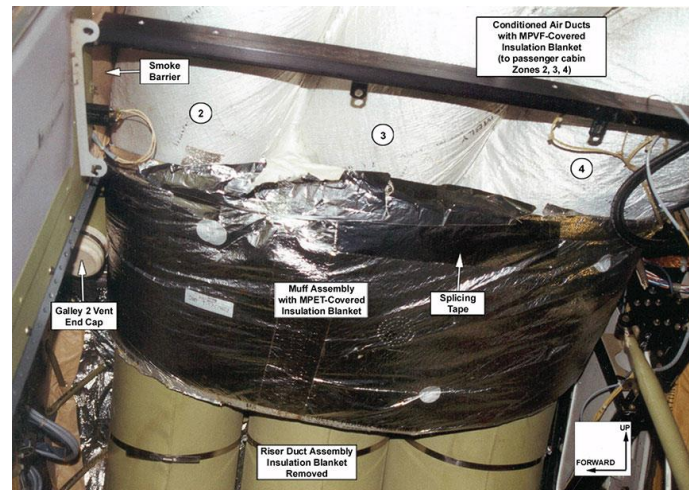


圖 4-11 產生電弧的機上娛樂系統電源供應單元電線

事故客機 MD-11 在駕駛艙後壁右側稍後、2 號廚房上方設置有隔熱組件，該組件採用金屬化聚對苯二甲酸乙二酯（MPET）材質覆蓋的隔熱毯，如圖 4-12，而 MPET 具有易燃性。



調查人員對齊導管內的機上娛樂系統線束，與 MPET 材質隔熱組件的相對位置如圖 4-13，深藍色是機上娛樂系統線束導管，小黃點標示出內部線束多處電弧產生的位置。

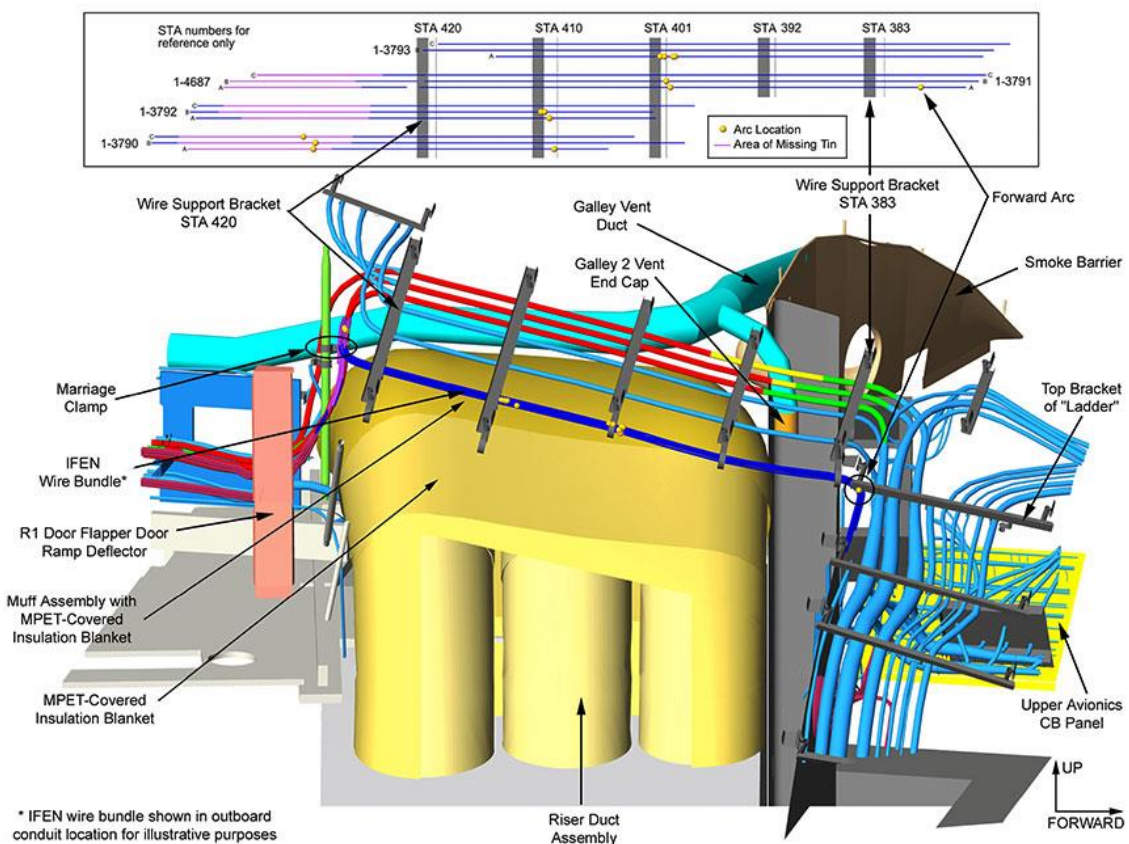


圖 4-13 飛行娛樂系統線束導管與電弧位置

加拿大運輸安全委員會（TSB）在事故調查報告中確認了 11 項與可能肇因有關之調查發現，其中與火災相關的重要項目為：

- 該航空器材料可燃性的適航認證標準不足，導致允許使用易燃、可維持或蔓延火勢的材料。因此易燃材料引發火災，火勢從駕駛艙右側天花板上靠近駕駛艙後壁的地方開始蔓延。火勢迅速蔓延加劇，嚴重影響飛機系統和駕駛艙環境，最終導致飛機失控。
- 該航空器隔熱隔音毯上使用的金屬化聚對苯二甲酸乙二醇酯（MPET）類覆蓋材料易燃。覆蓋材料很可能是最先著火的材料，並且構成可燃材料的最大部分，最終導致火勢蔓延與加強。
- 事故航空器所使用的斷路器類型與一般航空器常用的相似，無法對所有類型的電線電弧事件提供保護，火災極有可能是由電線產生電弧引發。

複合材料

隨著科技持續進步，現代航空器大量採用複合材料建造，可獲得更輕量、彈性佳與高耐久度的部件。複合材料各有其特性，碳纖維燃燒溫度約 1,000°F（538°C），燃燒達 1400°F（760°C）時會發出紅光，在火焰熄滅後可繼續燃燒，最後分解為易碎纖維，灰燼用手壓即可化為粉塵。玻璃纖維在 1,550°F（843°C）熔化形成玻璃珠，在火焰中成白熾狀態。Kevlar 纖維燃燒溫度約 800-900°F（427-482°C），會產生有毒煙霧，火災後分解產生灰燼。這些複合材料可吸收液體（燃料、油等），而從燃料燃燒產生的煙灰，是煙灰來源最大占比。

複合材料的特性可能造成人員健康風險，例如燃燒後的複合材料結構，會將纖維釋放到該區域，某些材料亦會改變其導電度。在運送殘骸離開之前，調查人員須在事故現場對殘骸進行標記。塑膠會吸附鬆散的碳纖維，須在安全區域打開塑膠包裝，並戴上手套和長袖防護衣防止被鋸齒狀邊緣刺傷。此外燒焦的碎片也要防護，避免再接觸有機蒸氣污染。燃燒的樹脂會產生有毒氣體，如果安全區域是其他人的工作環境，須考慮燒焦的殘骸會散發出有害氣味。

調查人員處理複合材料時，如果材料未與火接觸，如同鋁材一樣在碎裂後無害，穿戴長袖衣物皮手套即可。如果材料曾與火接觸，樹脂燃燒後可釋放纖維，調查人員應配戴面罩式呼吸器、防護衣、護目鏡等個人防護裝備。

炸彈與爆炸

爆炸表示壓力或能量的瞬間釋放，當可燃蒸氣在有氧化劑的大氣中，且處於某種侷限狀態下被引燃時，就可能發生爆炸。需要牢記的是航空器與燃料相關的爆炸均為爆燃（亞音速），而非爆轟（超音速）。爆炸壓力在接近化學計量比時達到最大值，即使成分接近可燃性下限和上限，也會產生相當大的壓力。航空器油箱內的燃油蒸氣濃度通常不均勻，並且會隨著環境溫度和壓力下的燃油揮發性而改變，因此爆炸壓力低於均勻的蒸氣空氣混合物爆炸壓力，且在燃油溫度低於其閃點時最低。當燃油系統受到阻火裝置的保護時，混合氣體的爆炸壓力可能相對較低。一般而言，如果航空事故中發生爆轟則很可能與高爆炸藥有關，例如用於工業或軍事的產品。高爆炸藥因其高昇壓速度和極高的爆炸壓力，約為 6,900,000 kPa（1,000,000 psi），被設計用來產生破碎效果，衝擊波壓力會隨距離而變化。

爆炸案例回顧

2016 年 2 月 2 日上午 11 點，Daallo Airlines 159 航班客機從索馬利亞 Mogadishu 起飛前往 Ville de Djibouti，起飛 20 分鐘後在約 14,000 呎（4,300 公尺）的高度發生爆炸，導致 R2 艙門後方的機身炸開一個洞，機身蒙皮像花瓣向外翻出，如圖 4-9。爆炸位置很可能靠近 15/16F 座位，位於前翼根和油箱附近。事發時機上載有 74 名乘客和 7 名機組人員。由於飛機未失事，因此這是少數能夠有效調查的飛行中爆炸事件。伊斯蘭激進組織青年黨（al-Shabaab）之後表示策畫此爆炸事件，據稱 1 名乘客在安全區附近獲得 1 台含爆裂物的筆記型電腦上機。爆炸後 1 名乘客被吸出爆炸產生的破洞死亡，由於飛行高度以及洞口約 1 公尺左右，飛行員得以安全操作降落。



圖 4-9 機身蒙皮受爆炸開裂

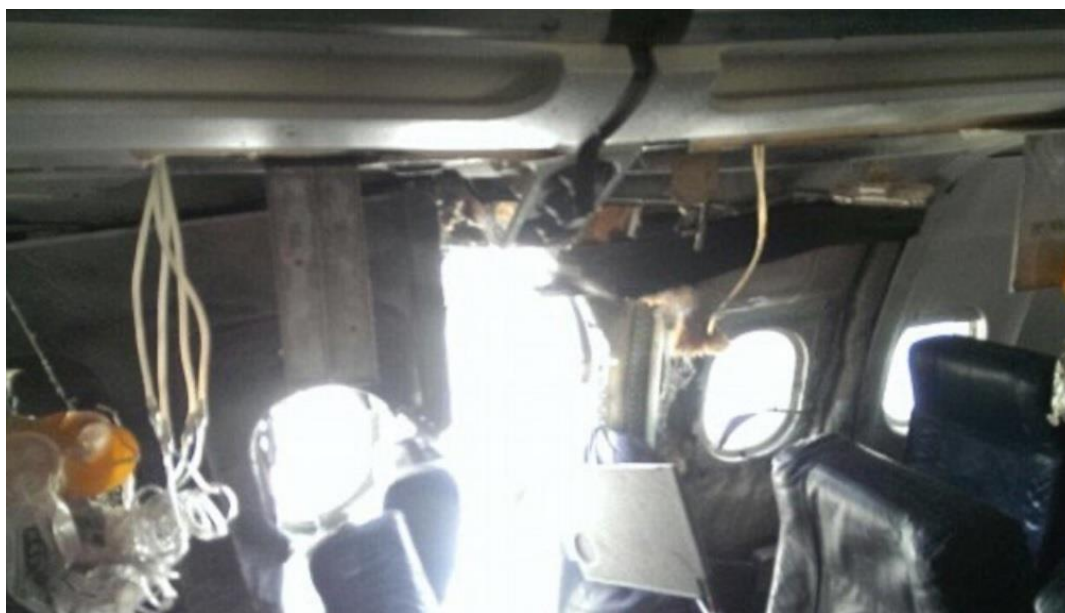


圖 4-10 受爆炸機身內部情形

俄羅斯 Metrojet flight 9268 號航班是一架國際包機客運航班，2015 年 10 月 31 日當地時間 0613 時，該航班從埃及沙姆沙伊赫國際機場起飛，前往俄羅斯聖彼得堡途中，在西奈半島北部上空解體。該客機為空中巴士 A321-231 型飛機，載有 217 名乘客和 7 名機組人員，機上所有人員均罹難。殘骸中發現客艙窗戶下方的機身蒙皮有破洞，如圖 4-11，有艙壓的飛機產生任何破洞會造成客艙失壓。伊斯蘭國(ISIS)之後聲稱製作了包含汽水罐、雷管及開關的爆裂物進行引爆，如圖 4-12，事故最終被認定為恐怖主義攻擊事件。



圖 4-11 蒙皮向外開裂處



圖 4-12 自製爆裂物組成示意圖

馬來西亞航空 17 號航班是從阿姆斯特丹飛往吉隆坡的定期國際客運航班，於 2014 年 7 月 17 日被擊落，機上 283 名乘客和 15 名機組人員全部罹難。這架波音 777-200ER 客機在距離烏俄邊境約 50 公里處失去聯繫，墜毀在烏克蘭 Donetsk 州 Torez 附近，距離邊境 40 公里，事故發生在 Donbass 戰爭期間。航空器殘骸顯示駕駛艙左前側

受到嚴重破壞，機身蒙皮有大量孔洞，如圖 4-13。駕駛艙地板及其部件也顯示有穿孔（以紅圈標示），孔洞是由地板上方向下刺穿形成，如圖 4-14。

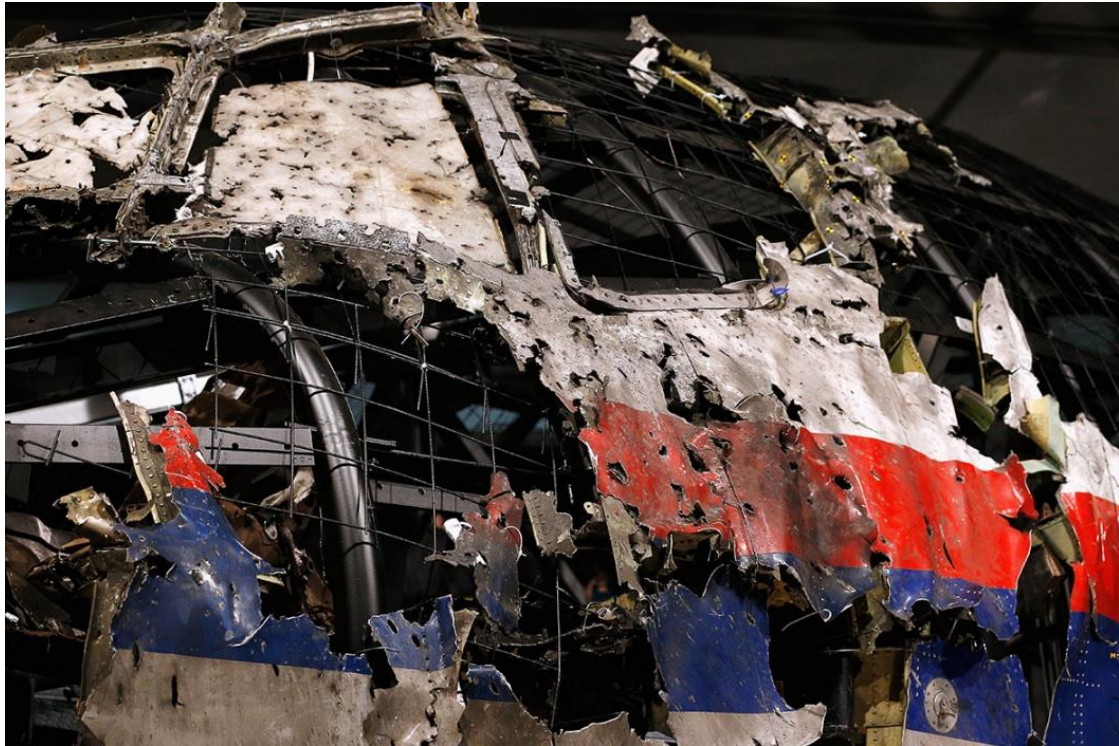


圖 4-13 駕駛艙左前側機身蒙皮

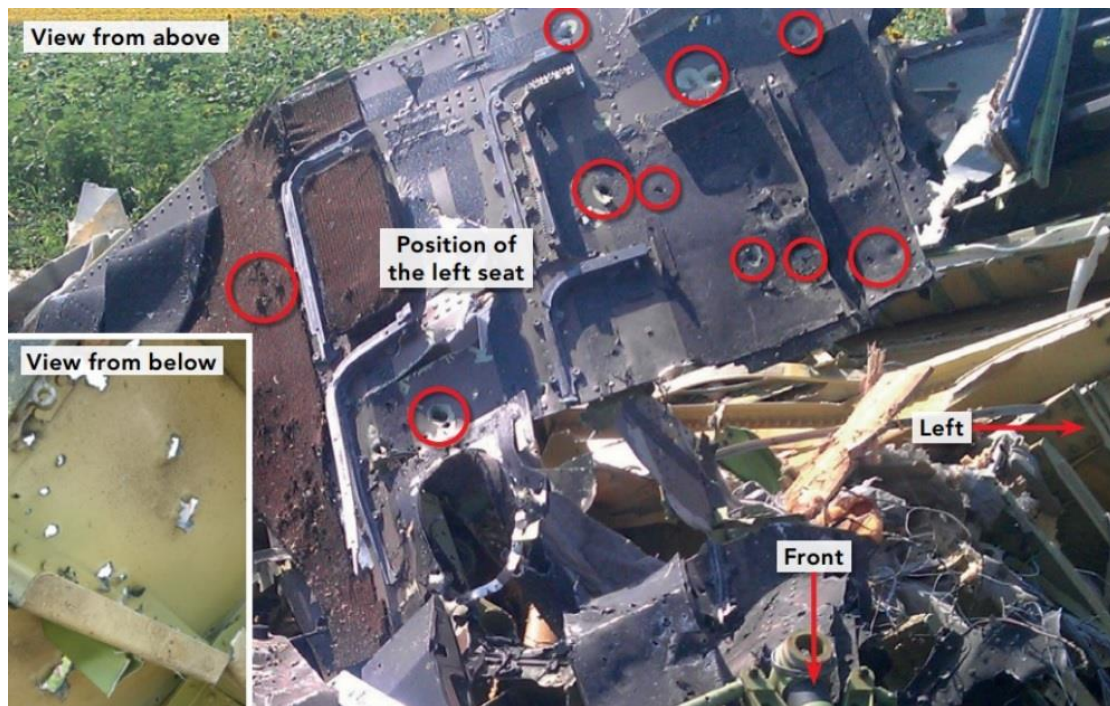


圖 4-14 駕駛艙地板穿孔

調查報告中指出，在航空器殘骸以及駕駛艙組員屍體中發現的領結形和立方體形預製破片，只存在某型號的飛彈戰鬥部中，可被安裝在山毛櫸（Buk）地對空飛彈系統上發射，如圖 4-15。

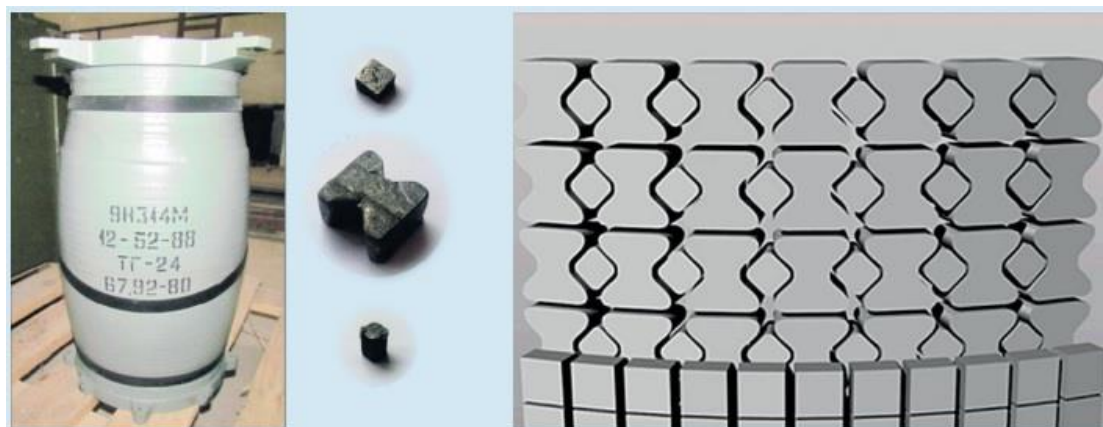


圖 4-15 預製破片形狀與排列

調查人員也利用機長、副駕駛、觀察員，以及駕駛艙區域 4 支麥克風收錄聲音的時間差定位爆炸聲音來源，時間差顯示聲波起源於飛機外部，位置在駕駛艙左側上方並由前向後傳播，如圖 4-16。根據事件持續時間極短的特徵，可判斷事件具有高能量性質。

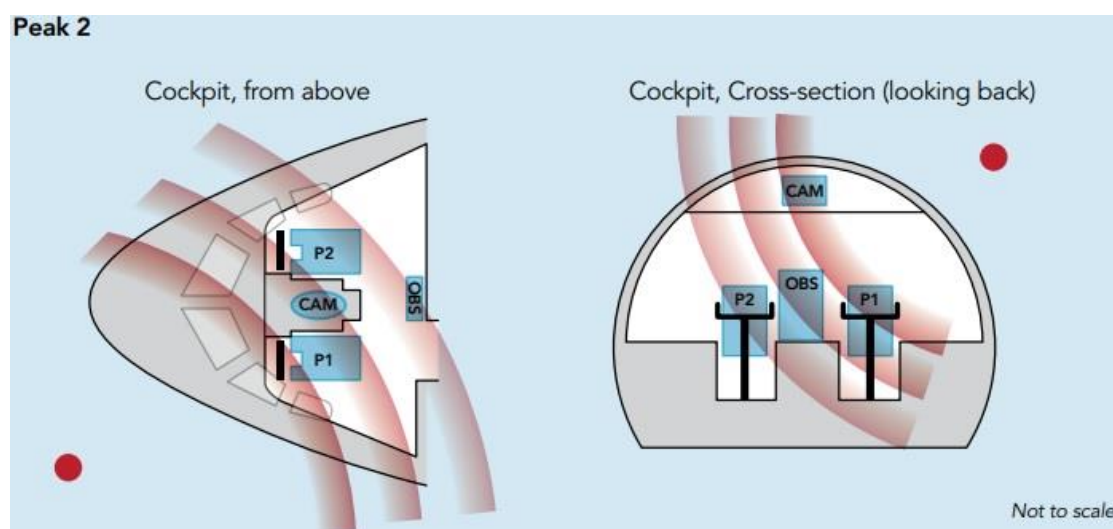


圖 4-16 爆炸聲波傳播示意圖

荷蘭安全委員會於 2015 年 10 月發表的調查報告指出，該飛機是遭到 1 枚俄羅斯製造的山毛櫸防空飛彈擊中後墜毀。2025 年 5 月 13 日，國際民航組織（ICAO）理事會裁定俄羅斯應對此航班的擊落承擔國際法責任。

火災調查證據

《Kirk 火災調查》提出「在法律程序中，證據是用來協助確認或推翻所指稱事實的任何手段」，而 NFPA 921《火災與爆炸調查指南》說明「物證是任何能夠證明或反駁特定事實或問題的實體或有形物品」。NFPA 921 將證據分為示範性證據、文件性證據、證言性證據 3 類。示範性證據是有形物品，物品必須經過鑑定，證人身分確認、物品有保管鏈。例如草圖、樣品、容器、火焰形式等實物證據。示範性證據用來對比材料或物品，在分析此類樣品特別是助燃劑殘留物時，須識別並盡量減少或消除干擾來源。文件性證據指任何書面形式的證據，例如維護記錄、日誌等，證言性證據包含訪談與錄音。

對證據的威脅，包含破壞火災模式的檢修活動、移動或移除潛在的物證、轉動旋鈕、開關和控制器，以及打撈活動。若要保護證據，設定限制不要過度滅火、檢修和打撈，記錄觀察結果、標記證據物品、遮蓋或隔離包含證據的物品或區域、保存易碎易變質證據，以及保全現場。記錄證據可採用不同方式，在筆記中記錄證據和位置、使用標記進行辨識、拍照錄影、繪製草圖，如果有易碎證據立即蒐集。調查人員視情況依照相關機構或部門的作業程序，記錄當下的蒐集活動。蒐集證物材料的容器，可使用全新乾淨的油漆罐或玻璃罐、全新未用的實驗室認可尼龍或聚酯纖維袋。也有採樣專用的 Kapak 無氣密封袋，外層為聚酯纖維，內層為聚乙烯，若盛裝含有尖銳物體的碎片樣本可能會撕裂，請諮詢實驗室以獲取建議。

蒐集證據的方法取決於證據的物理狀態、物理特性、易碎性及揮發性。易燃液體證據容易被吸收，遇到水漂浮其上，本身脆弱容易揮發，須利用適當材料吸收蒐集易燃液體。電氣類證據的蒐集，首先須切斷電源，小心處理脆弱的部分，瞭解蒐集內容與必要性，勿拔除接頭。

蒐集證據要採取預防措施防止污染，蒐集證據須注意細節維持完整性，確保證據蒐集人員辨識並妥善記錄、蒐集和保存證據。使用筆記、草圖、拍照攝影、日誌或標籤記錄證據位置。挖掘證據時，須提供額外的照片。在非意外火災發生區域，要特別注意蒐集證據，例如首次點燃的燃料與點火源。調查人員依照機構政策和程序包裝證據，將證據放入適當的容器，使用證據包裝膠帶密封容器，視情況加

上易碎警告。一旦發現應蒐集並送往實驗室鑑定的易燃液體證據，必須立即放入乾淨、未使用且密封的容器中傳送。

蒐集證據時為每個容器進行標示，確保其具有唯一的識別性。建議的標籤內容為調查人員姓名、蒐集日期時間、案件編號、樣本編號、基本描述、取得地點等。蒐集並保存適當的對照樣本，但須意識到此類樣本可能無法取得，若確認有其他物證，使用適當的保存和蒐集方法或尋求協助。

證據可能在移動或儲存過程中被損毀，甚至由調查人員本身造成。避免損毀證據，蒐集前要先記錄，蒐集過程保持謹慎小心。交叉污染指可燃液體殘留物，無意中從某個火災現場，或受可燃液體殘留物污染的地點，轉移到證據蒐集地點。潛在的交叉污染源主要有工具、工作服、證據容器、緊急設備等。須嚴格控制現場出入，記錄燃油驅動工具和設備的使用情況，若存在潛在污染源應避免使用。人員穿著清潔的防護衣及鞋靴。

某些機構沒有證據儲存設施，用來保存證物再轉送至實驗室。盡可能保持證物最佳狀態直至不再需要，避免高溫、陽光直射和潮濕，並且冷藏具揮發性證物。證物由專人送交可保護證據的完整性，由調查人員保管直到轉移至實驗室，可明確定義檢測的範圍。若是寄送須保護證據的完整性，選擇大小合適的容器，進行保護後裝箱運輸，附上送件函透過掛號或快遞寄送包裹。電氣類證據可能敏感易碎不適合運輸，應諮詢實驗室核實有關材料運輸的規定。液體樣品的儲存和運輸，須包裝好液體防止洩漏，並與其他證據分開運輸，應及時將所有揮發性樣品送往實驗室。

證據的價值與效力取決於可追溯證據的紀錄，如果無法證明證據如何從蒐集地點轉移到儲存地點，則證據無法使用。蒐集時維持證據的完整性，蒐集後維護證據的安全性，追溯證據從蒐集到儲存地點的完整過程，也追溯證據從儲存地點到實驗室的完整過程。處理證據須保存書面紀錄，內容包含證據編號、證據描述、發現日期和地點、蒐集者姓名、補充說明、記錄所有保管轉移、接收人姓名、轉移日期和方式，以及最終處置。

實驗室分析

適用於火災與爆炸調查的科學方法，包括氣相層析質譜分析（GC-MS）、傅立葉變換紅外線光譜（FT-IR）、高效液相層析（HPLC）、差示掃描量熱（DSC），以及熱重分析（TGA）。

實驗室分析最常見的問題是「這是什麼？」，大多數問題都歸結於找出未知物的成分。未知物可能本質上是純淨物，例如塑膠或金屬件。如果材料的主要成分不明確，無法對其適用性或功能提出說明或確認。未知物也可能是混合物，我們可能正在尋找與填充物、黏合劑或其他添加劑混合的活性成分。未知物也可能是微量成分，例如氣味或塑膠添加劑，樣品中的異味可能是由於萬億分之一濃度的成分造成的。

氣相層析質譜分析是一款連接的儀器，它使用氣相層析分離混合物中的成分，並使用質譜分析識別這些成分。氣相層析利用物質沸點的細微差異，無論物質是否具有高揮發性（如溶劑），即使是非常複雜的混合物，也可以使用氣相層析法進行分離。質譜分析的工作原理是將分子分解成更小的碎片，由於此過程以一致且可預測的方式進行，因此即使總分子量相同，透過查看碎片的重量並將碎片重新組合，也可以識別出其他分子。透過將氣相層析法與質譜分析法結合，可以將複雜的混合物分離成可識別的揮發性和半揮發性成分，藉由在不同時間點從氣相層析洗脫出的物質完整質譜進行分析比較。待測樣品與已知化合物進行比較，或與數十萬種物質的質譜圖進行比較，大多數物質都可以被識別。

傅立葉變換紅外線光譜透過測定材料與紅外線的相互作用來運作。某些紅外線頻率會造成材料分子鍵振動（共振）。由於不同類型的鍵以不同的頻率振動，可以透過觀察紅外線吸收模式（光譜）來確定許多材料的特性。這對於塑膠、油漆和藥物等有機成分尤其有用。透過將顯微鏡連接到傅立葉變換紅外線光譜，我們可以測量任何材料中單一微觀晶體的紅外光譜。

高效液相層析是一種色譜分析方法，它能夠根據化學物質之間溶解度的細微差異，分離複雜的混合物。此技術與氣相層析互補，當目標化合物不揮發或熱不穩定時非常有效。高效液相層析可根據極性、離子強度或分子大小，分離不同類型的目標分子。

差示掃描量熱測量的是將小鍋中的樣品與空鍋一起加熱時，兩者之間的溫差。隨著材料狀態的變化，溫差也會改變。例如當材料熔化（從固態變為液態）時，溫差會迅速變化。熔點和其他變化也可以測定。使用這項技術可以迅速地區分低密度和高密度聚乙烯以及混合物之間的差異。

熱重分析將小份樣品放入封閉在烘箱中的天平中，監測樣品加熱時的重量，並可以確定材料失重的溫度和確切的失重量。對於許多種類的複合材料例如橡膠，可以在一次分析中確定其成分。

火災與人體

航空器若發生火災或爆炸事故，很可能造成人員傷亡，調查人員也有必要瞭解火災對人體造成的影響。火災產生的燃燒產物種類繁多，它們對健康個體的影響各不相同。所有燃燒產物都具有毒性作用，吸入這些物質或物質接觸到皮膚或眼睛，可能會產生有害的反應，如立即刺激眼睛和呼吸道，或對其他身體功能產生影響。這些燃燒產物包括一氧化碳、氰化氫、二氧化碳、氮氧化物、鹵化氫（鹽酸、氫氟酸和氫溴酸）、丙烯醛、苯、顆粒物（灰燼、煙灰）和氣溶膠（熱解產物產生的複雜有機分子）等。幾乎每場火災都會產生一定量的一氧化碳，所有碳基燃料例如木材、紙類、塑膠都會因不完全燃燒而產生一氧化碳。有機燃料燃燒時，首先會形成一氧化碳，然後氧化為二氧化碳。在通風不足的火災，或燃燒的初始產物與較冷氣體混合的火災中（例如悶燒的火災），一氧化碳轉化為二氧化碳的過程可能會停止，而一氧化碳可能會成為燃燒的主要產物。一氧化碳是一種中樞神經系統抑制劑，被吸入後會與血液中的血紅素結合，形成碳氧血紅素（COHb）。一氧化碳對血紅素的親和力大約是氧氣對血紅素親和力的 240-250 倍。因此即使空氣中一氧化碳濃度很低，血液中也可能累積至危險水平的碳氧血紅素。

由於碳氧血紅蛋白非常穩定，即使在火災受害者死亡很久之後，也能在血液中檢測出來。血液中一氧化碳的平均致命濃度，廣泛被接受為 50%的碳氧血紅素。然而有些火災受害者死於一氧化碳中毒，他們血液的碳氧血紅素濃度低至 20%，高至 90%。血液中碳氧血紅素濃度低於 20%的受害者很可能死於其他原因，例如缺氧、心臟驟停或熱燒傷。相較之下，血液中碳氧血紅素濃度達到或超過 40%的受

害者很可能是死於一氧化碳，或是與其他因素例如年齡、酒精或心臟病共同作用的結果，又或僅因一氧化碳中毒而喪失行動能力，以至於無法逃離火災。

除一氧化碳之外，氫氰酸（HCN）是火災中產生的另一種主要毒物。氫氰酸氣體是在羊毛、尼龍和塑膠（例如聚氨酯和 ABS）燃燒過程中產生的，這些材料常見於家用家具和室內裝飾中。氫氰酸可以單獨作用或與一氧化碳結合，導致人員失能甚至死亡。氫氰酸會迅速使火災受害者喪失行動能力，從而阻止他們逃生，導致吸入煙霧死亡。

雖然氰化物最常在血液中被測量，但也存在從其他樣本，例如肝、腦、肺、腎和胃內容物中定量分析的技術。然而研究人員應該注意，氰化物在這些不同器官中的分佈及其穩定性各不相同，並非如一氧化碳穩定。氰化物致殘濃度在 2.0 至 2.5 $\mu\text{g/mL}$ 之間，全血中氰化物致死濃度為 3.0 $\mu\text{g/mL}$ 或更高。以百萬分率計算，約 280 ppm 的接觸會導致立即死亡，而 100 ppm 的接觸會在接觸一小時後導致死亡。此外由於維生素 B12 的代謝，正常健康成年人體內含有內源性氰化物，但濃度低於 0.26 mg/L。

當皮膚溫度達到約 45°C 時會引起疼痛，而溫度進一步升高會導致熱燒傷。熱燒傷可能由傳導、對流或輻射熱曝露所引起。研究人員發現，將 60°C 的黃銅塊接觸皮膚，會在接觸後 1 秒內引起疼痛，在 10 秒內造成皮膚部分厚度燒傷，在 100 秒內造成皮膚全厚度燒傷。人員穿著衣物，特別是丹寧或帆布等較厚的纖維素織物，即使沒有任何燃燒或燒焦的跡象，也能透過傳導傳遞足夠的熱量，導致皮膚燒傷。當皮膚曝露於對流熱中時，當空氣溫度高於 120°C 就會出現疼痛和燒傷。與爆炸的火焰前沿（而非隨後發生的火災，後者通常伴隨低階爆炸）相關的燒傷通常為一度或二度，因為其持續時間非常短。在這些情況下也可能出現三度燒傷但發生率要低得多，這樣的燒傷可能會致命。短暫曝露於高溫擴張的火焰前沿，會導致曝露的皮膚表面燒傷，通常即使是薄層衣物也能保護下方皮膚免受傷害，但合成纖維材質可能會因曝露於爆燃產生的火焰而被熔化，而棉質衣物可能只會燒焦。燒傷通常侷限於身體面向擴張的火焰前沿那一側，研究人員可以將此發現用作熱與火焰，或者爆炸動力學的向量指標。在某些情況下，屍體也是燃燒區域可燃物的一部分，應結合整體環境來考慮屍體的燒傷模式及其消耗，而不應單獨地看待。

曝露於火中會對人體及其組成部分產生可預測的影響，人體對熱有反應，因肌肉與韌帶的收縮或對抗力量被破壞，身體部位可能會出現可預測的移動反應。除衣物外，人體主要有 4 種可燃成分：皮膚、脂肪、肌肉和骨骼。這些成分之間的顯著差異在於水分含量。皮膚在受熱時會變色、起水泡、脫水和裂開，皮膚裂開不會延伸到肌肉，但會曝露出下面的脂肪層。皮膚與肌肉組織並非良好的燃料，但在脫水並曝露於足夠的高溫時燃燒。肌肉組織會因熱而脫水收縮，這種收縮會導致手指、手掌、手腕、手肘、肩膀、腳趾、腳踝、膝蓋和臀部發生屈曲，形成拳擊般的姿勢。如果沒有觀察到這種拳擊姿勢，可能是因為身體被壓在重物下導致肌肉無法收縮。手臂、腿部和手指屈曲的姿勢並非火災前身體活動，例如自衛或逃生的結果，而是火災的直接結果。骨折可能是肌肉收縮或長時間直接曝露於高溫和火焰中造成的，活體骨骼受熱時會收縮、斷裂並變色，雖然其表面會降解為片狀或粉狀，但不易氧化成氧化鈣。受損的骨骼可能很脆弱，在遺體找尋和運輸過程中可能會斷裂，頭骨通常沿著骨縫線破裂或受熱時崩解。在嚴重燒傷的屍體中，通常可見四肢燒傷以及顱骨部分或全部燒傷。

肆、建議

本次參與航空器火災和爆炸調查短期課程，內容充實獲益良多。建議應用本次訓練所得知識與技術於航空事故調查工作，部分共通之原理與方法亦適用於其他調查模組，並由本次派訓人員擔任種子教師與會內同仁分享。

參加「航空器火災和爆炸調查訓練課程」出國報告

服 務 機 關：國家運輸安全調查委員會

出 國 人 職 稱：運輸安全組副調查官

姓 名：蔡華生

出 國 地 區：美國洛杉磯南加州安全學院

出 國 期 間：民國 114 年 04 月 27 日至 05 月 04 日

報 告 日 期：民國 114 年 07 月 29 日

建議事項：

	建議項目	處理
1	針對本次訓練所得知識與技術，由本次派訓人員製作簡報與會內同仁分享。	☒ 已採行 ☐ 研議中 ☐ 未採行