



商用石墨粉抗紅外線效能測評分析

作者簡介



作者吳國輝老師，中正理工正 47 期畢業、國立師範大學碩士、中正理工化學博士；歷任排長、技術官、化參官、化研官、主任教官，現職為國防大學理工學院應化所教授。

提要

- 一、煙幕是一種應用較為廣泛的無源干擾手段，在對抗各類光電偵察和導引武器方面發揮著重要作用。煙幕遮蔽和干擾效能測評是評估光電對抗效能、進行戰術部署的重要依據，是煙幕技術的重要研究內容。
- 二、文中首先提出了商用石墨粉軍規化，使其適用於化學兵現役渦輪發煙機，並評估抗紅外光煙幕遮蔽效能的主要技術指標的方法。
- 三、抗紅外光煙幕的作用是遮蔽被保護目標發射或反射的紅外線訊號，以保證保護目標的安全，評估其效能的主要技術指標為消光係數和遮蔽率。
- 四、分析評估煙幕遮蔽效能的主要技術指標，一般在室內使用紅外線光譜儀(溴化鉀樣品片或煙幕箱)和熱影像儀(樣品膠片或煙幕箱)測試，而煙幕的遮蔽效能可在野外測量更為真實。

關鍵詞：煙幕遮蔽、石墨粉、消光係數、遮蔽率。

前言

紅外光導引具有精度高、隱蔽性好、性價比高、機動靈活等優點，經過半個世紀的發展，已廣泛成為反坦克導彈、空對地導彈、地對空導彈、空對空導彈以及巡航導彈等武器裝備的主要導引方式之一。隨著雷射和紅外光等精確導引武器的實戰化應用，與之相對應的煙幕無源干擾光電對抗技術得到迅速發展，在對抗各類光電偵察和光電導引裝置方面發揮著重要作用。煙幕遮蔽效能和干擾效果是評估光電對抗效能、進行戰術部署的重要依據，是煙幕技術的重要研究內容。

煙幕是一種由分散相(固體或液體微粒)與分散介質(大氣)共同組成的氣溶膠，它主要依靠煙幕粒子對入射光波的吸收和散射以及煙幕自身熱輻射，干擾光輻射的正常傳輸和光電系統的目標探測。圍繞煙幕干擾方面的研究最終目的是提



高戰場煙幕干擾效能，建立煙幕遮蔽和干擾效能評估，可以為煙幕材料研製、施放手段設計、戰術使用部署、訓練和作戰效果評估等提供重要依據。目前化學兵使用的抗紅外線煙幕系統與材料於 90 年軍售獲得，迄今面臨換代及軍規石墨粉用罄問題。本文提出了商用石墨粉軍規化，使其適用於化學兵現役及新一代渦輪發煙機使用，並評估抗紅外光煙幕遮蔽效能的技術指標方法。

從文獻資料評估煙幕遮蔽效能的主要技術指標可以看出，煙幕材料的消光係數、遮蔽率或穿透率是評估煙幕遮蔽效能的最重要技術指標，也是其它技術指標的基礎。煙幕形成的機理決定了煙幕的散布有一定的範圍，具有隨機性，其邊緣是不規則的，並隨著時間的延續不斷擴散和沉降，因此測量煙幕穿透率的關鍵是同時多點連續測量煙幕的穿透率。煙幕材料在欲干擾波段有較高導電率、磁導率和介電常數的材料對毫米波能量損耗較大；而煙幕材料的粒徑、形貌、缺陷度、孔隙及導電率等方面對其抗紅外光效能具有顯著影響。煙幕材料的紅外光吸收機理，即分子能階從低能態躍遷到高能態而表現出的吸收作用，吸收衰減在本質上是分子的內能狀態發生變化。通過實驗證明：使用溴化鉀(KBr)進行的固體壓片法或樹脂膠片法測得的紅外光穿透圖譜，主要反映了材料結構對紅外光的吸收作用。而煙幕材料的紅外光散射機理，即煙幕是一種氣溶膠，是光學不均勻介質；煙幕微粒的大小、形狀、孔隙不同，以及煙幕粒子群的隨機混亂運動，都將使紅外光進入煙幕以後，發生紅外光能量不同程度的損失，和光波產生不同程度畸變等現象，如反射、折射、繞射等。煙幕材料的消光機理即將材料經表面技術處理加以分散之懸浮物，能對入射之電磁波予以散射、反射與吸收，進而切斷光電偵測系統與目標間之信號傳輸，使得導引武器偵測系統受煙幕之遮蔽、干擾及迷盲等影響，而大大降低其精確度。因此，消光機理分析為抗紅外光煙幕材料設計和改性增效提供了理論支撐，也為材料優化、選擇和科學使用提供了必要依據。

目前文獻上模擬煙幕評估的方法中，比較常見的是實驗測定法。實驗測定法按照實驗環境條件可分為靜態(溴化鉀樣品片和樹脂膠片)和動態(煙箱和野外噴散)試驗法，煙幕性能評估最為常用的是煙幕箱試驗法和野外試驗法，而消光材料選擇則離不開壓片法。使用傅立葉轉換紅外線光譜儀(FTIR)採用 KBr 壓片法



測試材料在波長 3~5 和 8~14 μm 的紅外光穿透率，再根據比爾定律求出材料的消光係數。另外，使用紅外線熱影像儀採用樹脂膠片法測試材料在波長 8~12 μm 的紅外光遮蔽率。煙箱試驗具有樣品消耗量少、條件可控、試驗可重複等優點，廣泛用於煙幕材料對紅外光衰減和遮蔽特性研究。野外試驗廣泛用於煙幕材料最終使用性能評估，是所有抗紅外光煙幕材料研究和轉化應用的關鍵評估手段，也是發煙裝備器材評估、設計定型的必要環節。野外試驗可利用發煙罐、煙幕彈或發煙機結合野外目標，進行野外煙幕的消光和遮蔽效能試驗。消光性能研究離不開評估試驗結果支撐，但受氣象、地形等外在條件限制，目前採用的紅外光煙幕遮蔽野外試驗重複性較差，室內煙箱試驗煙幕氣溶膠濃度分布的均一性又難以保障，尤其是各種試驗方法之間的相互印證比較困難，壓片法、氣溶膠法、爆炸散布法和機械散布等方法之間測試結果偏差較大，相互之間同一個樣品用不同方法得到的結果差別也較大，如何統一或者對試驗結果進行科學轉換，須要進一步研究。

石墨材料大多具有良好的紅外光消光性能，能夠形成相對穩定的抗紅外光煙幕氣溶膠，在光電對抗領域具有良好的應用前景，但美規軍售石墨成本較高且取得不易。因此，本文研究由國內獲得商用石墨經由研磨得到所需顆粒大小及分析孔隙和微結構，並測試材料紅外光消光性能，篩選出符合軍規石墨使用，以拓展煙幕材料來源。

實驗材料及儀器

一、本研究從國內數十家販售石墨粉的廠商中，篩選出海X公司和泓X科技公司的石墨粉，分別命名為HH-FG和HM-FG;石墨粉規格:

(一)HH-FG 鱗片狀，平均粒徑 6.3 μm ，振實密度 0.4 mg/cm^3 。

(二)HM-FG 鱗片狀，平均粒徑 5.4 μm ，振實密度 0.3 mg/cm^3 。

(三)美規軍售石墨粉(MS-FG)，陸軍提供，鱗片狀，平均粒徑 4.9 μm (研磨後)，振實密度 0.9 mg/cm^3 。

二、傅立葉轉換紅外線光譜儀(FTIR):使用PerkinElmer Spectrum 100，KBr壓片法，掃描範圍為4,000~400 cm^{-1} ，測試石墨粉3~5 μm 和8~12 μm 穿透率 $T(\%)$ 。熱像儀：Thermo GEAR G100遠紅外線熱像儀，波段範圍8~14 μm 。粒徑分析儀：PSA 990 雷射粒徑分析儀。電熱壓縮成型機：HT-8122B



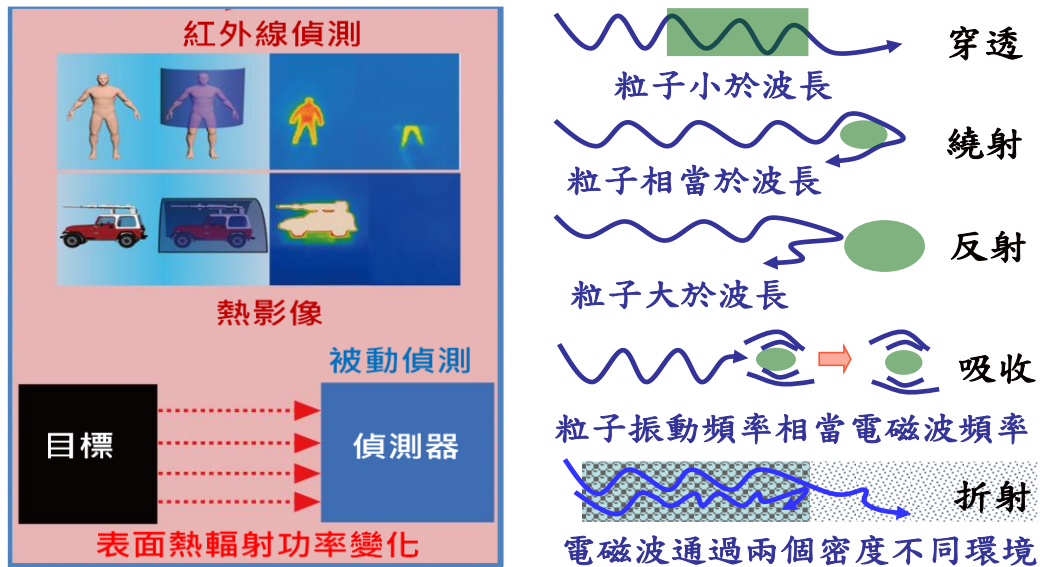
，將石墨粉與聚乙烯(PE)混合，加入乙醇攪拌，使材料均勻分散後倒入模具(長、寬各15 cm，厚度0.1 cm)，電熱壓縮成型製成樹脂膠片，用以靜態量測石墨對遠紅外線(8~14 μm)遮蔽效果。煙箱：長、寬、高各30 cm之壓克力正方體，前後蓋板中間切割出直徑約5公分的鹽片視窗(紅外線測試用)，底部放置四個風扇，模擬實際煙幕施放效果。煙幕彈：使用現役M76式防紅外光煙幕彈彈體，將石墨材料約300公克仿照現行製備煙幕彈製程，將材料裝填於煙幕彈彈筒內。測試時，採電擊發彈射方式引爆，並於爆炸點後方擺置一具持續發動之發電機，當作背景溫度熱源(79.5°C)，當煙幕彈引炸後，利用紅外線攝影機捕抓溫度變化，以評估該材料成煙散布情形與對遠紅外線波段之遮蔽效能。

研究方法

紅外光和微波遮蔽材料一直是煙幕技術發展的重點，與之相應的消光機制和評估試驗方法等方面研究也取得了長足進展。本文針對紅外光匿蹤技術(如圖1)、消光試驗、評估技術等方面研究進行簡要回顧，並結合新的軍事需求對抗紅外光煙幕材料及消光性能研究方面進行了分析。降低煙幕自身的熱輻射，有利於紅外匿蹤，尤其是隨著發煙機和爆炸施放技術的成熟，各種煙幕材料的研發得到快速發展。石墨煙幕是目前很多國家裝備的一種制式煙幕，文獻資料經常使用壓片、煙箱、野外噴灑、熱像儀和 FTIR 光譜儀等測定煙幕材料的遮蔽效能和消光係數。紅外光消光試驗方法常用的實測法主要包括壓片法、煙箱試驗法和野外試驗法，本文運用上述實測法評估商用石墨的紅外光遮蔽性能。實驗設計架構如圖 2。



圖 1 紅外光匿蹤技術示意圖



資料來源:作者設計自繪。

圖 2 使用壓片法、煙箱試驗法和野外試驗法測試紅外光遮蔽效能



資料來源:作者設計自繪。

所有溫度高於絕對零度的物質都會不斷發出熱輻射，這種熱輻射就是紅外線輻射，有時稱為紅外光，頻段涵蓋 $0.76\sim 1,000\ \mu\text{m}$ 的範圍，除了 $3\sim 5$ 和 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 範圍，大部分均被大氣層吸收，故點源和成像是兩種主流的偵測紅外光方法，透過比較背景與目標發出的熱輻射能量的差異測量材料對紅外光遮蔽效果。一

般來說，物體由於發射率高，很容易暴露在紅外光探測器下。為了實現紅外光隱身，背景與目標物體之間的紅外線發射強度差異足夠接近，可以忽略不計，使其盡可能與背景相似，將「目標和背景」的組合識別為「與背景相似的物體和背景」的組合有利於欺騙偵測器。根據普朗克黑體輻射定律可以得到史蒂芬-波茲曼定律： $E = \epsilon \sigma T^4$ ； E 為物體熱輻射能量淨值(W/cm^2)， σ 是史蒂芬-波茲曼常數， ϵ 是物體的紅外光放射率， T 是物體的絕對溫度。紅外光探測器主要透過比較 E 值來搜尋與周圍環境不同的紅外線輻射特性的目標，因此，若要在環境中偵測不到物體的紅外熱輻射，其方法有三種：降低物體放射率、減少物體與環境間溫度的差距、以及改變輻射形式，而煙幕屬第三種遮蔽效應。

由於煙幕是由懸浮在空氣中的大量固體或液體顆粒形成的具有特定運動規律的氣溶膠系統，可透過「改變輻射傳遞形式」達成遮蔽效應，其原理為電磁波入射到煙幕時，輻射能量會被煙幕微粒吸收(Absorption)、反射(Reflection)、散射(Scattering)而造成能量衰減(Attenuation)，又稱為消光效應(Extinction)。紅外線熱成像技術並不是利用目標的紅外輻射溫度，而是對目標與周圍環境之間所造成的紅外輻射溫度差異來進行對比分析，若紅外輻射溫度的差異小於熱像儀的解析程度，則熱像儀就不能從周圍環境中區別出目標的紅外圖像。從煙幕本身的遮蔽性能評估，穿透率計算法能夠反映煙幕干擾前後輻射衰減特性，根據衰減強弱，將穿透率 T 的大小分為 4 個等級 (如表 1 所示)。因此，在探討抗紅外光煙幕干擾技術中，煙幕能讓熱像儀接收不到目標與背景的紅外輻射溫度差，或破壞目標的紅外圖像，而達到遮蔽或干擾的作用。

表 1 煙幕遮蔽效果的評估等級

穿透率	評估效果	評估等級
$T \leq 5\%$	目標與背景無法區分	較好的
$5\% < T \leq 20\%$	很難區分目標和背景	好的
$20\% < T \leq 50\%$	目標模糊但可檢測	差的
$T > 50\%$	目標很容易被檢測	較差的



一、溴化鉀壓片法

運用 FTIR 對石墨粉進行紅外光遮蔽性能的測定，採取壓片法進行測試。準確稱量 0.20 mg 石墨和 200 mg KBr 在瑪瑙研鉢中充分混合，稱取 20 mg 混合物均勻地放入固體壓片模具，置於壓力機中使用 15 MPa 壓力保持 2 分鐘即可得到均勻半透明的錠片，取出錠片後裝入 FTIR 測試架上掃描 3~5 μm 和 8~14 μm 紅外光穿透譜圖。對 FTIR 測得的資料從 3~5 μm 、8~14 μm 波段分別積分，再除以這個波段的寬度，即為其平均穿透率(T ; %)，並根據衰減率(ρ) = 1- T 計算其紅外光衰減率(%），進而計算消光係數。消光係數可藉由比爾-朗伯定律推算出來：

$$\alpha = \frac{1}{CL} \ln \frac{1}{T}$$

其中 α 為消光係數， L 為材料厚度(m)， C 為材料與溴化鉀之濃度(g/m^3)， T 為 3~5 μm (中紅外線) 或 8~12 μm (遠紅外線) 之平均穿透率。

二、聚乙烯壓片法

(一)依照不同遮蔽膠片濃度(1~5 mg/cm^3)，將石墨與聚乙烯粉末混合，加入 100 ml 乙醇，以直流攪拌器攪拌 2 小時，轉速 400~500 rpm，使材料均勻分散。將微濕潤狀態的樣品倒入模具(長、寬 15 cm，厚度 1 mm)中以刮刀鋪平，用電熱壓縮成型機製成不同濃度遮蔽膠片(上、下板溫度 150°C、壓力 35 kgf/cm^2 、熱壓 4 小時關機靜置冷卻 8 小時後取出)，用熱像儀量測石墨材料對遠紅外線(8~14 μm)的遮蔽效能。

(二)紅外線熱像儀利用煙幕施放前後環境與目標的溫度變化來顯示紅外輻射能量密度分布(如圖 3)。紅外光穿透率(T)可以通過測量煙幕施放前後背景和目標的平均溫度來計算，衰減率(ρ)為 1- T 。將 T_0 、 T_0' 定義為煙幕施放前後目標物的溫度(K)； T_1 、 T_1' 為煙幕施放前後目標物周圍的平均溫度(K)，如方程式所示：

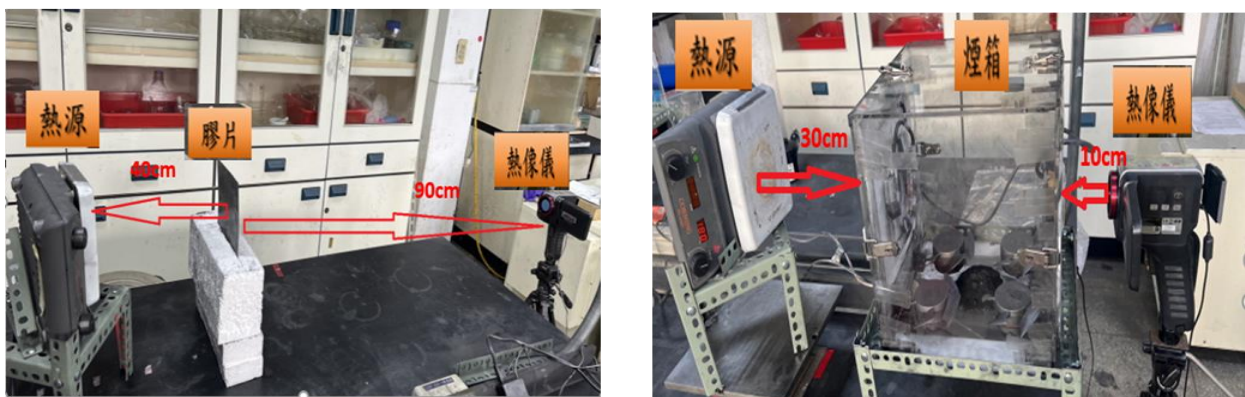
$$T = \frac{T_0'^4 - T_1'^4}{T_0^4 - T_1^4} \times 100\% = 1 - \rho$$

三、煙箱試驗法

分別將石墨材料以濃度 0.1、0.3、0.5 及 0.7 mg/cm^3 置於煙箱中進行動態擾動測試，利用內部風扇使氣流擾動(如圖 3)，讓樣品在空間中均勻分散，模擬

材料在實際大氣環境中噴灑情形，並開啟熱源，將起始溫度設置約 64~65℃，以紅外線熱像儀紀錄開始靜止 15 秒，打開煙箱中的風扇擾動 60 秒，使材料分布均勻，隨即關閉風扇後再持續記錄 65 秒。煙箱進行動態擾動測試，全程 140 秒量測溫度變化，再根據上述公式計算出穿透率 T (%)和衰減率 ρ (%)。每項樣品均經三次檢測，求平均值找出最佳濃度，以評估商用石墨動態遮蔽效能。

圖 3 膠片(左)和煙箱測試(右)紅外線熱成像實驗配置圖



資料來源:作者設計自繪。

圖 4 煙幕彈製備材料與製程



資料來源:作者設計自繪。

四、野外試驗法

將石墨材料裝入 M76 式防紅外光煙幕彈彈筒，製成戰車用煙幕彈，煙幕彈製備材料與製程如圖 4。以單發發射器投射煙幕彈，利用遠紅外線攝影機(範圍



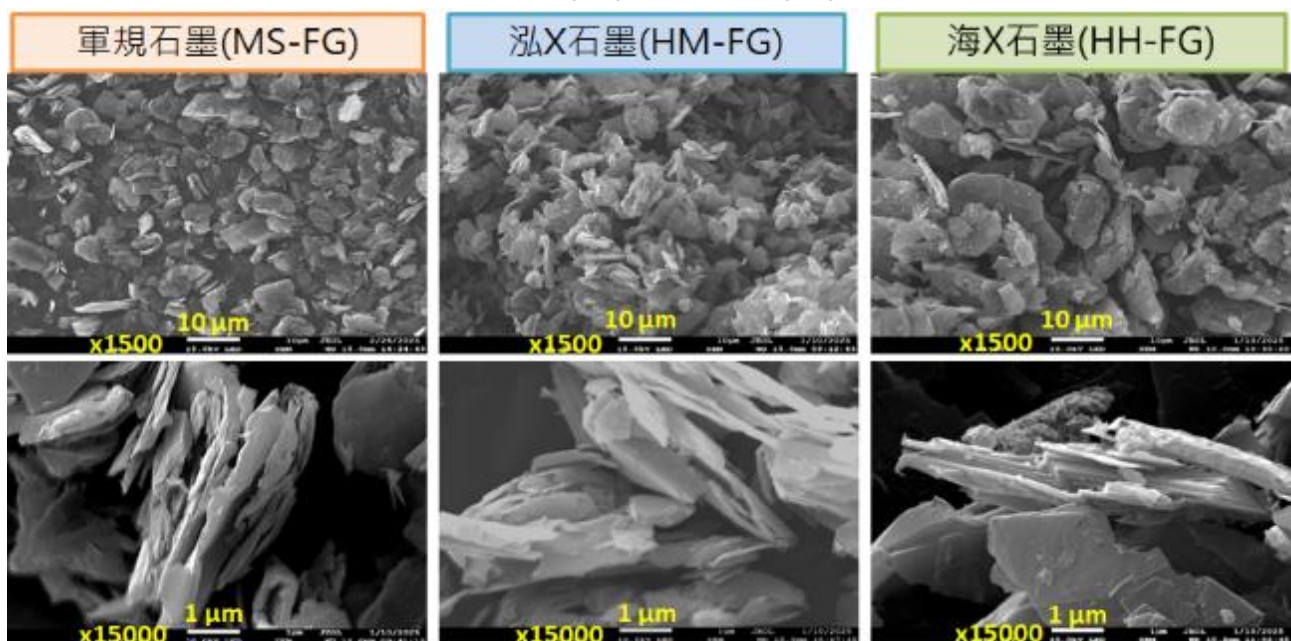
7.5 ~ 14 μ m)測量熱源遮蔽前後的溫度變化。以發電機作為輻射熱源，利用引擎運轉產生熱源，溫度概約為 80°C，距離熱源 150 m，而煙幕彈引爆後，中心炸點距離熱源約 120 m，量測石墨材料布幕分散效果與紅外熱成像的溫度變化。

紅外消光性能測試結果與討論

一、商用石墨材料特性分析

依據文獻記載，材料粒徑大小對紅外光的遮蔽性能影響甚大，石墨微粒的紅外消光作用主要取決於它對紅外光的吸收和散射理論，石墨微粒的散射作用大於吸收作用。在石墨微粒不產生凝聚的前提下，粒徑越小其紅外光遮蔽效能最為顯著，但再考慮空氣中懸浮效果時，石墨微粒粒徑不能過於細小，美軍準則規範認為石墨平均粒徑約 5 μ m 時有最佳的抗紅外光與懸浮效果。本研究依據粒徑分析儀及掃描式電子顯微鏡分析結果，MS-FG、HM-FG 及 HH-FG 的平均粒徑約 5 ~ 6 μ m，粒徑大小差異不大且顆粒形貌亦相似。圖 5 為 MS-FG、HM-FG 及 HH-FG 的電子顯微鏡圖，由放大 1,00 和 15,00 倍的電子顯微鏡圖觀察到，軍規石墨及兩種商用石墨呈層狀結構、大小相似均有破碎，層與層之間均有空隙，缺陷度相似。

圖 5 石墨材料放大 1500(上)和 15000(下)倍的電子顯微鏡圖



資料來源:作者實驗自繪。

另從比表面積分析儀測定數值分析(表 2)，得到 MS-FG 比表面積 15.30



m^2/g ，平均孔隙 29.97 nm；HM-FG 比表面積 $14.06 \text{ m}^2/\text{g}$ ，平均孔隙 25.53 nm；HH-FG 比表面積 $18.85 \text{ m}^2/\text{g}$ ，平均孔隙 22.50 nm。總孔隙體積三者差異不大介於 $0.09\sim 0.11 \text{ cm}^3/\text{g}$ 。石墨的孔隙對電磁波吸收至關重要，孔隙使其傳播路徑變長，進而提升吸收效率及反射次數，但如果孔隙太小（如小於 2 nm 的微孔），電磁波可能較難進入，使電磁波更容易反射而非被吸收，降低吸收效果，過小的孔隙可能導致材料介電常數過高，使電磁波更容易反射而非被吸收。過大的孔隙(>100 nm)可能導致透射效應，使部分電磁波穿透而無法有效吸收，最佳情況是孔隙位於介孔(2~50 nm)，能更有效地吸收電磁波。石墨主要是透過反射與多次散射方式衰減紅外光波，鱗片狀石墨堆疊的孔隙介於 10~40 nm，有利於紅外光波多次反射及折射，有效衰減紅外光能量，根據三種石墨材料的平均孔隙分析，均介於 20~30 nm 之間，代表它們衰減紅外線的程度是相似的。

表 2 鱗片石墨比表面積分析儀測定數值分析表

樣品	比表面積 (m^2/g)	平均孔隙 (nm)	總孔隙體積 (cm^3/g)
軍規石墨(MS-FG)	15.30	29.97	0.11
泓 X 石墨(HM-FG)	14.06	25.53	0.09
海 X 石墨(HH-FG)	18.85	22.50	0.11

資料來源:作者實驗成果繪製。

二、紅外線遮蔽效能分析

(一)溴化鉀壓片法量測

因石墨與 KBr 的混合比例影響光譜穿透率，若石墨比例過高紅外光穿透率降低；若石墨比例過低可能導致吸收峰信號過弱。因此，依據文獻資料本次樣品石墨含量控制在 0.1%，以石墨 0.2 mg 與 KBr 200 mg 之重量比做穿透率測試，每項樣品均經三次檢測，求平均穿透率。圖 6 為石墨材料在 3~5 μm 和 8~14 μm 的紅外光穿透率，再依據比爾-朗伯定律計算石墨材料的消光係數，各項參數如表 3 所述。

由圖 6 結果得到三種石墨材料的紅外線穿透率非常穩定，MS-FG、

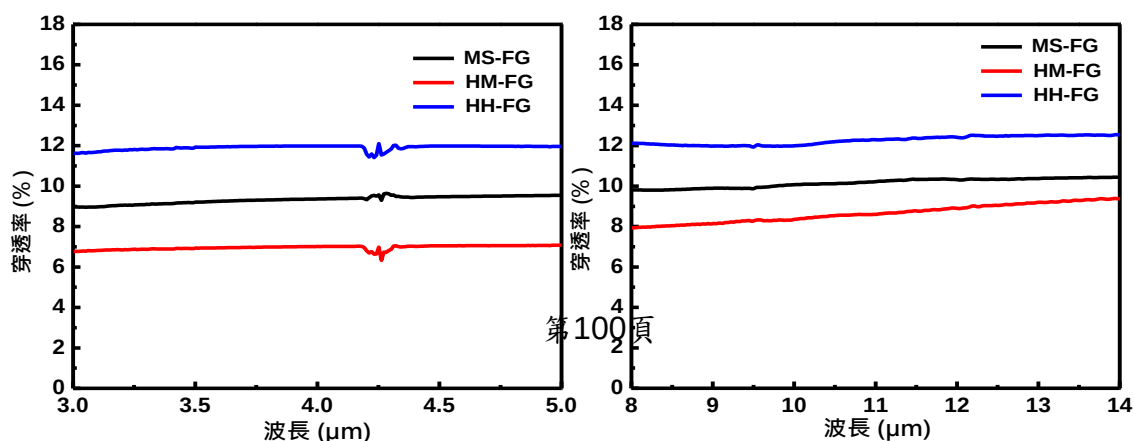


HM-FG 及 HH-FG 在 3~5 和 8~14 μm 的平均穿透率分別為 9.33、6.96、11.90% 和 10.62、8.65、12.26%，平均穿透率以 HM-FG 最低(最佳)，MS-FG 次之，HH-FG 再次之。表 3 計算所得 MS-FG、HM-FG 及 HH-FG 在 3~5 和 8~14 μm 的消光係數分別為 4.56、5.13、4.10 m^2/g 和 4.31、4.71、4.04 m^2/g ，消光係數以 HM-FG 最高(最佳)，MS-FG 次之，HH-FG 再次之。從紅外光平均穿透率及消光係數來看，三種鱗片石墨的差異性不大，都有非常好的紅外光遮蔽效能，主要是三種石墨的平均孔隙和總孔隙體積相似。

(二) 聚乙烯壓片法量測

將不同濃度之軍規石墨 MS-FG (1、2、3、4 及 5 mg/cm^3) 摻入聚乙烯膠片中，利用紅外線熱像儀測量遮蔽效能，熱源設定 120°C，圖 7 為 MS-FG 於 1~5 mg/cm^3 濃度時的靜態膠片紅外線熱像儀測試結果。結果顯示空白膠片紅外線輻射溫度在 60.5°C，隨著摻入 MS-FG 濃度 1~5 mg/cm^3 後，熱源輻射溫度下降變化越大，下降 26.7~36.3°C，在濃度 4~5 mg/cm^3 時下降之溫度已趨向室溫(24~25°C)，因此以最適濃度 4 mg/cm^3 測試 HM-FG 及 HH-FG 遮蔽效能 (如圖 8)，比較三種石墨材料遮蔽效能依序為 HM-FG(下降 38.7°C)、MS-FG(下降 36.7°C)、HH-FG (下降 35.9°C)，三種石墨材料的紅外光遮蔽效能已無法從背景中區別目標熱源位置，具有非常理想的遮蔽效能，其中又以 HM-FG(下降 38.7°C) 遮蔽效能最佳，並利用計算公式估算紅外線穿透率 T (%) 及衰減率 ρ (%)。表 4 為三種石墨材料在濃度 4 mg/cm^3 時的 8~14 μm 紅外線穿透率及衰減率分析表，發現 MS-FG、HM-FG 及 HH-FG 之穿透率及紅外線衰減率分別為 7.63、3.80、9.30% 及 92.37、96.20、90.70%，穿透率越低，代表紅外光衰減率越高，遮蔽效能越好，三種石墨材料線衰減率均達 90% 以上，具有非常優異的遮蔽效能可當煙幕材料使用。

圖 6 石墨材料在 3~5 和 8~14 μm 的紅外光穿透率



資料來源:作者實驗成果繪製。

圖 7 MS-FG 於 1~5 mg/cm³ 濃度時的靜態膠片紅外線熱像儀測試圖

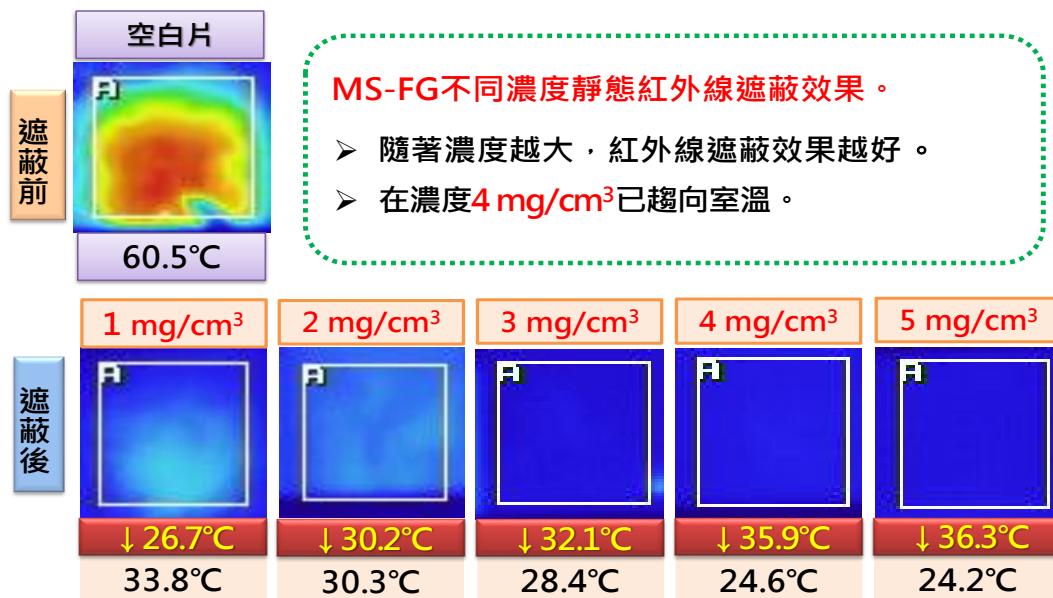
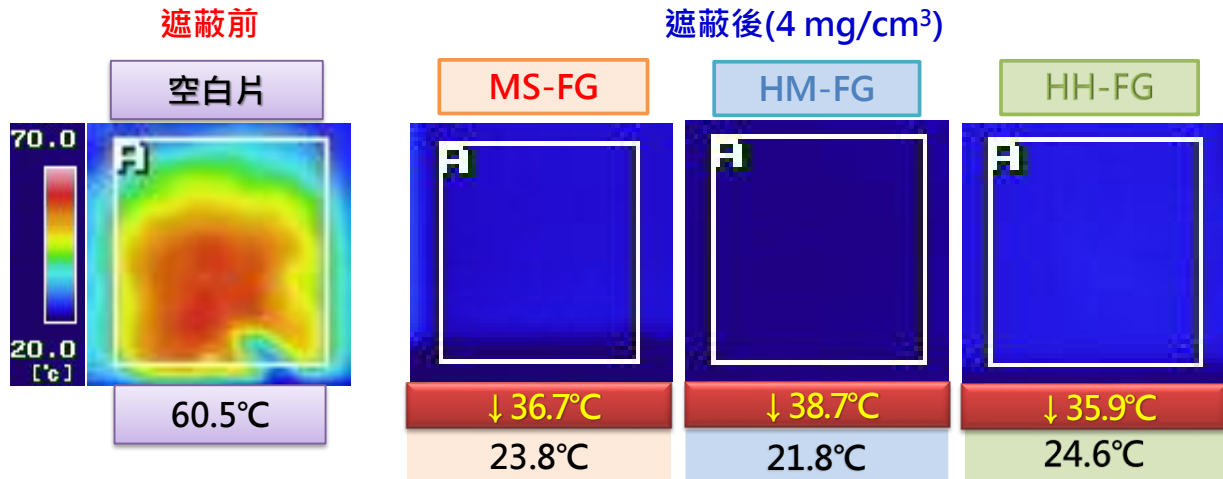


表 3 石墨在 3~5 和 8~14 μm 的紅外光平均穿透率及消光係數

石墨	厚度 L (m)	濃度 C (g/m ³)	平均穿透率 T (%) 3~5/8~14μm	消光係數 α (m ² /g) 3~5/8~14μm
軍規石墨(MS-FG)	2.8×10^{-4}	1856.98	9.33/10.62	4.56/4.31
泓 X 石墨(HM-FG)	2.8×10^{-4}	1856.98	6.96/8.65	5.13/4.71
海 X 石墨(HH-FG)	2.8×10^{-4}	1856.98	11.90/12.26	4.10/4.04

資料來源:作者實驗成果繪製。

圖 8 石墨材料於濃度 4 mg/cm³ 時的靜態膠片紅外線熱像儀測試圖

表4 石墨材料在濃度 4 mg/cm³時的 8~14 μm 紅外光穿透率及衰減率

石墨	T_0 (K)	T_0' (K)	T_1 (K)	T_1' (K)	穿透率 T (%)	衰減率 ρ (%)
MS-FG	333.65	296.95	293.35	293.25	7.63	92.37
HM-FG	333.65	294.95	293.35	293.25	3.80	96.20
HH-FG	333.65	297.75	293.35	293.25	9.30	90.70

(三)煙箱試驗法量測

煙箱測試是模擬煙幕材料於一定空間內大氣環境中擾動的現象，藉由紅外線熱像儀觀察溫度變化，本實驗以 MS-FG 當對照組，分別將濃度(0.1、0.3、0.5 及 0.7 mg/cm³)置於煙箱內擾動 60 秒。圖 9 為 MS-FG 於 0.1~0.7 mg/cm³濃度時的煙箱擾動 60 秒平均紅外線熱像溫度測試圖，隨著濃度越大，紅外光遮蔽效能越好，溫度分別下降 20.3°C、27.4°C、30.4°C及 31.2°C，在濃度 0.5 mg/cm³下降之溫度已趨近室溫並趨緩。因此以濃度 0.5 mg/cm³測試 HM-FG 及 HH-FG 遮蔽效能並與 MS-FG 做比較(如圖 10)，在背景溫度為 65~66°C測試煙箱擾動 60 秒平均紅外線熱像溫度變化，遮蔽紅外光效能依序為 HM-FG (下降 37.6°C)、MS-FG (下降 30.4°C)、HH-FG (下降 26.5°C)，並利用計算公式估算紅外光穿透率 T (%)及衰減率 ρ (%)。表 5 為三種石墨材料在煙箱測試，濃度 0.5 mg/cm³時的 8~14 μm 紅外光穿透率及衰減率分析表，結果 MS-FG、HM-FG 及 HH-FG 之紅外光穿透率及衰減率分別為 27.73、13.00、29.00%及 72.27、87.00、71.00%，其中以 HM-FG 之紅外光穿透率最低及衰減率最高，與靜態膠片測試結果趨勢一致，表示 HM-FG 有最佳的紅外光遮蔽效能，但三種石墨材料動態衰減率均達 70%以上，具有

非常優異的紅外光遮蔽效能可當煙幕材料使用。

圖9 MS-FG 於0.1~0.7 mg/cm³ 濃度時的煙箱擾動紅外線熱像儀測試圖

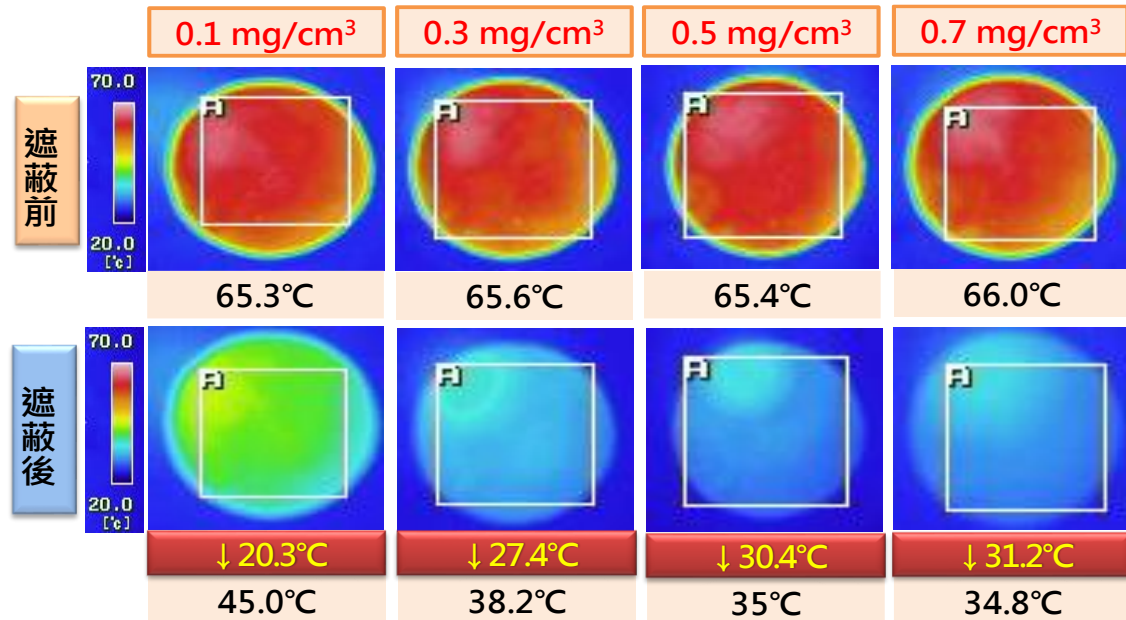
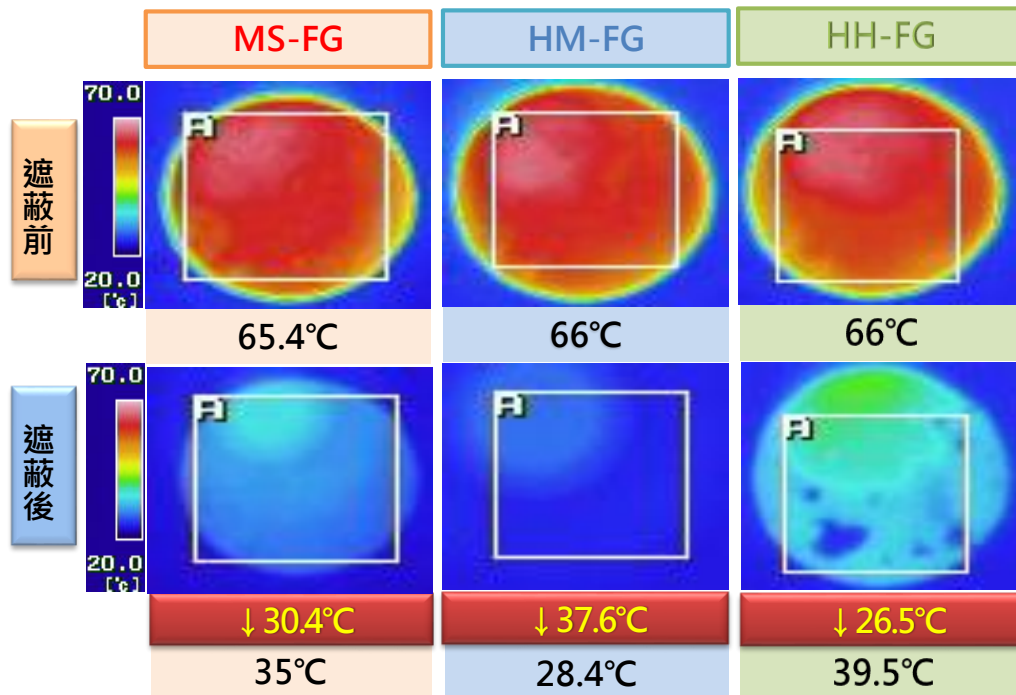


圖10 石墨材料於濃度0.5 mg/cm³ 時的煙箱擾動紅外線熱像儀測試圖



資料來源:作者實驗成果繪製。

表5 石墨材料在煙箱測試濃度0.5 mg/cm³ 時的8~14 μm 紅外光穿透率及衰減率

石墨	T_0 (K)	T_0' (K)	T_1 (K)	T_1' (K)	穿透率 T (%)	衰減率 ρ (%)
MS-FG	338.55	308.15	293.65	293.65	27.73	72.27



HM-FG	339.15	301.63	294.65	294.65	13.00	87.00
HH-FG	338.35	309.36	294.75	294.75	29.00	71.00

圖 11 為三種石墨材料在 0.5 mg/cm^3 濃度時，全程煙箱測試過程的紅外線熱像溫度變化圖。首先將石墨分散靜置於煙箱中 15 秒，再啟動風扇擾動 60 秒(時間第 15~75 秒)，然後時間第 75 秒後關閉風扇，觀察紅外線熱像溫度變化及懸浮狀況(時間第 75~140 秒)。從圖 11 可看出靜置時，紅外線熱像溫度約 65°C 即為背景熱源溫度，啟動風扇擾動後熱像溫度迅速下降至 29°C 左右，隨後三種石墨材料溫度開始產生差異，其中 HM-FG 的溫度變化較為穩定，維持在 29°C 左右一直到第 75 秒風扇停止為止，表示 HM-FG 材料有很穩定的懸浮效果，可能跟其粒徑和孔隙大小有關。MS-FG 於 40 秒後及 HH-FG 於 30 秒後溫度漸漸上升，研判因 MS-FG 材料粒徑較小，靜電吸引力較大，故容易吸附於壓克力壁上，導致濃度變小因而紅外線熱像溫度上升；當第 75~140 秒停止風扇擾動時，三種石墨材料的紅外線熱像溫度緩慢上升而後趨於穩定，顯示三種石墨材料有很好的懸浮效果。石墨材料懸浮於空氣中，因重力作用而向下沉降稱為沉降速度，用以探討石墨材料噴散於大氣懸浮後的滯留狀況。依據斯托克斯定律(Stokes' law)計算沉降速度， $V = \rho_p D_e^2 g / 18 \eta$ ；其中 ρ_p 為鱗片石墨密度 2.3 g/cm^3 、 D_e 為石墨平均粒徑、 g 為重力加速度 9.81 m/s^2 、 η 為空氣黏度，室內條件下為 $1.85 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ 。以 Stokes 定律計算沉降速度如表 6 結果，MS-FG、HM-FG 及 HH-FG 之沉降速度分別為 0.0016 、 0.0020 及 0.0027 m/s ，三種石墨材料的沉降速度緩慢且差異不大，有助於石墨滯空懸浮時間，提升紅外光遮蔽效能。

圖 11 石墨材料在濃度 0.5 mg/cm³ 時的煙箱測試溫度變化圖

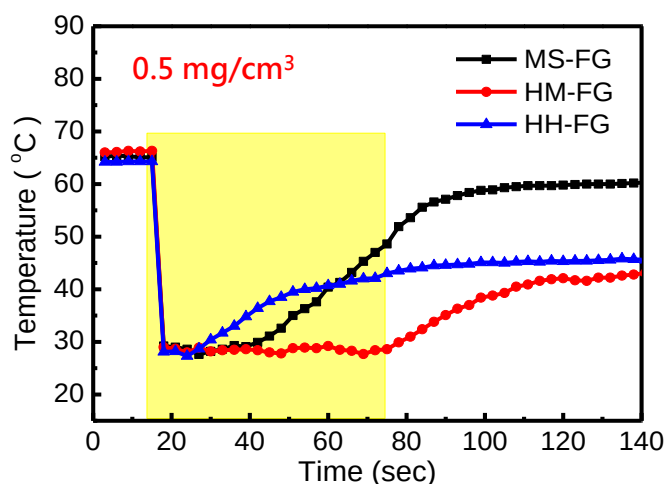


表 6 石墨材料在濃度 0.5 mg/cm³ 時煙箱擾動後的沉降速度分析

材料	ρ_p (kg/m ³)	D_e (m)	η (kg/m·s)	V (m/s)
軍規石墨(MS-FG)	2.3×10^3	4.872×10^{-6}	1.85×10^{-5}	0.0016
泓 X 石墨(HM-FG)	2.3×10^3	5.380×10^{-6}	1.85×10^{-5}	0.0020
海 X 石墨(HH-FG)	2.3×10^3	6.339×10^{-6}	1.85×10^{-5}	0.0027

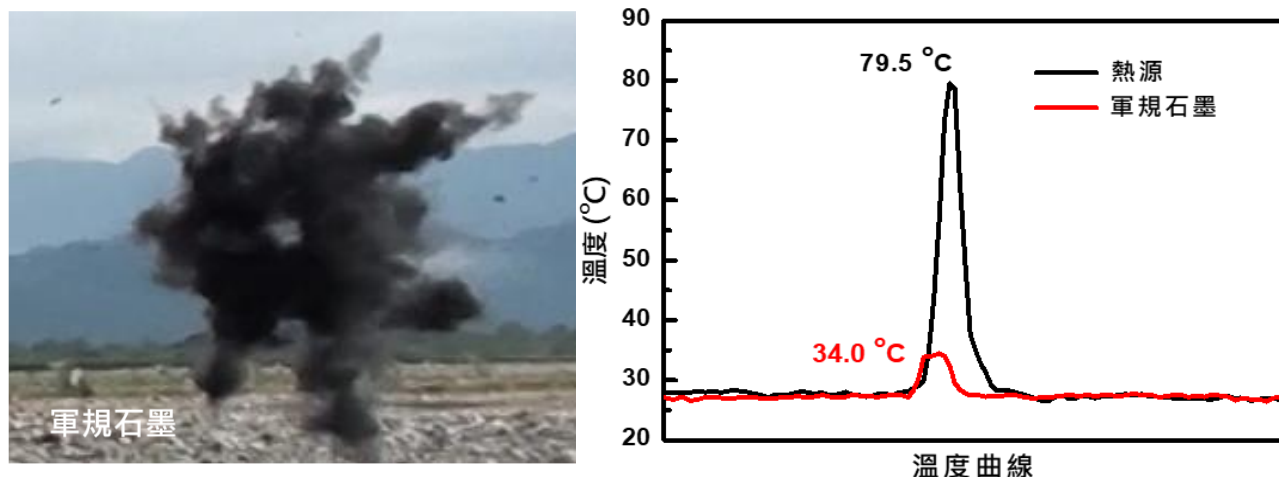
(四)野外試驗法量測

基於上述驗證結果，我們將軍規石墨材料裝入現役煙幕彈彈筒中，製成戰車用煙幕彈，以單發發射器投射遮蔽 150 公尺外的發電機熱源(79.5°C)。圖 12 為軍規石墨裝填的煙幕彈發射爆破觀測圖，利用紅外線攝影機測量熱源遮蔽前後的溫度變化，評估石墨材料取代銅鋅合金粉做為煙幕彈材料的可行性驗證。銅鋅合金粉是目前現役戰車用煙幕彈的紅外光遮蔽材料，裝填量是 1800 公克，石墨煙幕彈的裝填量是 300 公克，布幕後可將熱源溫度從 79.5°C 降至 34.0°C，單發石墨煙幕彈遮蔽面積不如銅鋅合金煙幕彈，主要是石墨材料密度小裝填量少，但是爆開的形狀和遮蔽紅外光的效能都還不錯，遮蔽後的熱像溫度與煙箱試驗結果相似，證明研究數據具有可信度和再現性。石墨煙幕彈與銅鋅合金煙幕彈有相近的紅外光遮蔽效能，但是比銅鋅合金煙幕彈便宜，且對人員及環境有較小的危害性。因此石墨可考慮做為新一代遮蔽



紅外光煙幕彈的材料，但是須壓實裝填石墨或重新設計煙幕彈的彈體讓石墨有足夠的填充量，才能增加遮蔽面積和發揮較佳遮蔽效能。野外試驗對紅外光煙幕遮蔽效能測量與評估涉及到的因素很多，如何科學的評價其遮蔽效能，須要隨著煙幕的研究而不斷深入。

圖 12 軍規石墨煙幕彈發射爆破觀測圖及紅外線熱像溫度測量



資料來源:作者實驗成果繪製。

結語與建議

煙幕是對抗光學偵察和制導武器的重要手設之一，其原理是利用汽溶膠顆粒對光波的散射和吸收，有效遮蔽目標的光學特徵，增加敵方光學偵察和制導系統探測目標的難度，從而提高目標的生存能力。它具有使用方便、成本低廉、效果顯著等優點，在對抗偵察和精確制導武器方面有著不可替代的優勢。因此，煙幕雖然是一種傳統的技術，卻一直能保持強大的生命力，在現代高技術戰爭中仍然被廣泛使用。隨著紅外光偵察和制導技術的發展，用煙幕來對抗紅外光的需求越來越迫切，而煙幕的紅外光遮蔽性能在很大程度上取決於煙幕材料本身的特性，因此，對煙幕材料的紅外光遮蔽性能研究始終是一個熱點，也是煙幕裝備研製中必不可少的一個環節。新時期，戰場環境和公眾對煙幕材料的紅外光消光性能、環保性和性價比提出了更高要求，研究以紅外光干擾為中心，相容可見光遮蔽和干擾毫米波功能，突破材料複合技術限制，進一步完善試驗方法，實現消光性能研究的統一與可重複驗證，實現各種評價結果相互印證，都將成為今後一定時期的研究熱點。



本研究透過儀器分析比較軍規石墨及商用石墨的粒徑、孔隙和微形貌特性，使用壓片、煙箱、野外噴灑、熱像儀和 FTIR 光譜儀等測定煙幕材料的遮蔽效能和消光係數，成功建立商用石墨對紅外光遮蔽性能分析技術和評估標準，提供國軍煙幕遮蔽材料選用參考。就石墨的粒徑、孔隙和微形貌特性而言，三種石墨材料規格差異不大，因此亦具有相當的紅外光遮蔽效能，本次分析結果以 HM-FG 具有最適當的平均粒徑和孔隙大小，因而表現出最佳的紅外光遮蔽效能。本次少量採購商用鱗片石墨屬國內商源供貨穩定，產地有大陸及日本，單價介於 300~600 元/公斤，商用鱗片石墨再經造粒後可供現有渦輪發煙機使用。綜合上述分析，兩款商用石墨之紅外光遮蔽效能均可達軍規石墨標準，石墨材料測評方式可選用儀器分析及壓片法測量，遮蔽驗證方式可選用煙箱及野外試驗法量測，建議化訓中心可建立上述分析技術和測評驗證能量，作為爾後煙幕系統研發、煙幕材料採購規格訂定及驗收、準則編撰及教育訓練提供專業技術輔助。

參考文獻

- 一、Wang, X., Dong, W., Pang, M., Bai, H., Hu, R., Granular Characteristics and Infrared Extinction Coefficients of Graphite Aerosol, *Procedia Engineering*, Vol. 102, 2015.
- 二、Hu, J., Hu, Y., Ye, Y., & Shen, R., 2023, Unique applications of carbon materials in infrared stealth: A review, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 452.
- 三、Shen, Y.L., Li, C.H., Guo, S.Y., Chen, R., 2021, Research development of infrared stealth materials, *Infrared Technology*, Vol. 43.
- 四、Ma, Y., Liu, J., Chen, N., Gao, H., Xiong, X., 2018, Determination of the boundary value of the aerosol extinction coefficient and its effects on the extinction coefficient profile of aerosol in lower atmosphere, *Optik*, Vol. 160.
- 五、Chang, Y.C., Wu, K.H., Huang, W.C., Yang, T.H., 2025, Study on anti-infrared/millimeter wave smoke material and its attenuation performance, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 148.
- 六、Sun, Y.Y., Wang, X.Y., Yao, W.Z., Li, H.Y., 2021, Research progress on composite interference of infrared/millimeter smoke material and its



extinction performance, in: Proceedings of the SPIE 11780.

- 七、Shen, Y., Li, C., Guo, S., Chen, R., 2021, Research Development of Infrared Stealth Materials, Infrar. Technol. 43, 312–323.
- 八、李慧瑩，王玄玉，劉志龍，孫淑寶，董文傑，2023，〈石墨烯遠紅外消光性能測試研究〉《紅外與激光工程》，第 52 卷，第 2 期。
- 九、蔡文彬、王乃岩、宋東明、張世才，〈石墨粒徑對紅外消光特性的影響〉《紅外技術》，第 25 卷，第 5 期，2003。
- 十、楊國棟、苑高千、張竟哲、吳金波、李發亮、張海軍，〈多孔電磁波吸收材料〉《化學進展》，第 35 卷，第 3 期，2023。
- 十一、王玄玉，2020，〈抗紅外煙幕材料及消光性能研究進展〉《外與鐳射工程》，49 卷，第 7 期。
- 十二、陳柳瑩、李曉霞、王曉農、解博，2023，〈煙幕遮蔽和干擾效果評價方法研究〉《鐳射與光電子學進展》，第 60 卷，第 22 期。
- 十三、時家明、李志剛、陳宗勝，〈典型氣溶膠粉體紅外消光性能研究〉《紅外與激光工程》，第 49 卷，第 7 期，2020。
- 十四、歐亭均，〈抗紅外線/毫米波煙幕彈製備與測試〉《國防大學理工學院化學及材料工程學系碩士班碩士論文》，101。
- 十五、劉吉益，102，〈抗紅外線/毫米波煙幕材料製備與應用〉《國防大學理工學院國防科學研究所博士論文》。
- 十六、林慶瑋，114，〈民用石墨粉軍規化性能分析與測評研究〉《國防大學理工學院化學及材料工程學系碩士班碩士論文》。