

遮蔽紅外線/毫米波煙幕材料量產與驗證

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、為了促進遮蔽紅外線/毫米波煙幕材料研究和應用轉化，從材料研製、小批量產、消光性能研究和野外應用等方面進行了系統分析。
- 二、研究結果證明：磁性膨脹石墨複合材料以改進配方研究為主，層狀複合材料在結構設計、合成技術、消光性能測試、實務驗證等方面取得顯著成果，磁性膨脹石墨煙幕材料可同時抗紅外線/毫米波達 90% 以上的消光性能。
- 三、持續研究環境友善的抗紅外線/毫米波煙幕材料、可量產及適用於現有煙幕武器裝備如煙幕(罐)彈、渦輪發煙機等將成為國軍煙幕技術發展重點。

關鍵詞：煙幕材料、抗紅外線/毫米波、消光性能

前言

自民國 102 年我國《國防報告書》將「創新/不對稱作戰」納為國防方略，迄今對我建軍備戰影響甚巨，為使國軍部隊能在未來的聯合國土防衛作戰中發揮最大戰力，化學兵煙幕在「創新/不對稱」作戰發展，可朝「先進遮蔽材料科技」及「多元發煙裝備整備」等方向發展，發揮化學兵煙幕在「創新/不對稱」作戰的角色和地位。科索沃戰爭和波灣戰爭是典型的不對稱戰爭，南斯拉夫及伊拉克以落後的裝備與技術對抗現代尖端武器的北約和西方聯軍，為現代戰法譜下劣勢對優勢的新篇章。其中，南軍及伊軍對於煙幕運用的表現，凸顯煙幕在戰場上反制及干擾精準導引武器的重要性，尤其是紅外線導引武器，令現代精準導引武器與煙幕的不對稱抗衡產生了新的思維，這提供了化學兵在聯合作戰中的角色及存在的價值。若將科索沃和波灣戰爭的時空轉入臺海，我們將如何面對現在達到巔峰的共軍，針對未來共軍在海、空軍及電磁權的優勢，就化學兵而言，如何以戰史為師，運用正規及非正規煙幕戰力，確保我方戰力完整，實有其研究價值。

美國網媒專欄「The War Zone」報導，美國陸軍觀察俄烏戰事實證後，已著手在 AH-64E「阿帕契」攻擊直升機上加裝反紅外線保護系統(CIRCM)，以對抗單兵操作的便攜式防空導彈、熱追蹤短程地對空飛彈。根據了解，CIRCM 系統由一個中央控制單元和一對追蹤器組成，外觀是玻璃圓頂砲塔組件(如圖 1)，作用時，CIRCM 的雷射光可使用紅外線尋標導引的來襲飛彈「失明」或「迷惑」，使飛彈偏離原設定攻擊航線，使攻擊失效，此技術屬光電干擾手段。俄烏戰爭凸顯了短程熱追蹤導彈，尤其是便攜式防空系統以及其他防空系統對現代戰場上的直升機和其他飛機構成嚴重的威脅。例如美製刺針 FIM-92 人員攜行式防空飛彈在戰場上對俄羅斯直升機的重創，在「以子之矛，攻子之盾」的反向思考下，美軍為阿帕契機隊加裝反紅外線保護系統，讓攻擊直升機防禦升級。反紅外線保護系統類似煙幕材料遮蔽紅外線/毫米波作用原理，此類系統適合攻擊直升機或戰艦在接戰紅外線尋標導引的來襲飛彈時，還能快速運動及即時啟動反紅外線保護系統，但對於戰車、砲車、固定設施等則會來不及反應，只能利用煙幕遮蔽來防護保存生機。

圖 1 AH-64E 攻擊直升機上反紅外線保護系統



資料來源：US Army National Guard。

依據共軍編「高技術局部戰爭中登陸作戰」所強調，其在先期作戰階段以爭取「制電磁權、制空、制海」為首要，研判共軍於登陸前幾日，即開始以飛彈打擊我重要指、管、通、資、情、監、偵設施、防空陣地、海空基地、後勤設施及重要交通，癱瘓我防衛作戰整體運作，故反制共軍空中的威脅應列為第一優先考量。共軍在獲得海、空及制電磁權優勢後，以大規模登陸方式對我實施進犯，勢必持續以直接火力，打擊我淺近縱深之飛彈陣地、砲兵陣地、指揮

所、雷達站及兵力集結地區等目標，為登陸部隊突擊上岸開創有利機勢，此時各級指揮所多已轉換為具機動力設施，依據此類型作業任務之需求，應運用煙幕戰力特有之機動性，以直接支援即時掩護作業方式，即時滿足作戰部隊所需之煙幕掩護，有效保存各作戰部隊完整有生戰力。機動作戰為陸上作戰主流，為能有效遂行煙幕遮蔽作業，除持續採購新型渦輪發煙機外，亦應積極研改現用發煙裝備，以提升整體煙幕作業戰力；另研製新型煙幕材料能同時遮蔽紅外線及毫米波，並能大量生產滿足現有各式發煙裝備所需，設置多層煙幕遮蔽網，使共軍「精密制導武器」無法有效鎖定攻擊目標。¹

美國陸軍的現代化策略是由 2018 年陸軍策略延伸而來，目標在使陸軍於 2028 年具備多領域作戰（Multi-Domain Operations, MDO），於 2035 年能發揮各能力以遂行 MDO 作戰。欲達此目標，其中有六個現代化優先項目，包括遠距精準火力、次世代戰鬥車輛、垂直起降戰機、網路、防空及士兵致命力等，而防空係指空中及飛彈防禦系統，是由六個防禦層所組成，由內至外，第一層：接戰低空無人機，針對第一至五類無人機實施反制。第二層：多重任務高能量雷射武器，於排級單位配賦小型、機動力高的雷射武器，對來襲之彈藥及無人機實施反制。第三層：機動防空技術，指強化既有的短距離防空系統，現有系統架設於布萊德雷步兵戰鬥車上，未來將增加短程防空飛彈或是雷射武器，以增強防空能力。第四層：次世代雷達，目標是建構具備多目標追蹤及發射多種頻譜功率的主動電子掃描陣列雷達，並藉由整合紅外線偵照衛星及網際網路，提升整體防空情監偵能力。第五層：高能量雷射戰術車輛，目標是在中型軍用輪車上發射 100 千瓦以上等級的雷射光速，殲滅進犯的空中目標，系統配備有紅外線觀測器及發電機組，僅需兩人即可操作。第六層：低成本增程防空飛彈攔截技術，有別於愛國者系列，雖然系統戰力較小，但能防禦次音速飛彈級別空中威脅，包含無人機，能減輕愛國者系統的任務，使其投入威脅更大的作戰地區。²

從美軍多領域作戰的六個現代化優先項目來看，飛彈防禦系統是現代科技戰爭重中之重，這其中包括了飛彈反制、雷射武器反制、光電反制等，這些是

1. 辛毓民，〈煙幕在創新/不對稱作戰發展之研究〉《化生放核防護半年刊》，第 109 期，頁 71。

2. 鄧瑞軒，〈美反制小型無人機籌建防禦能量〉《青年日報》，2022.12.9。

國軍部隊在未來的聯合國土防衛作戰中重要課題。對化學兵而言，讓煙幕反制做為飛彈防禦系統的一個選項尤其重要，因此開發和驗證遮蔽紅外線/毫米波煙幕系統，接戰從其他介入的指揮和紅外線/毫米波導引飛彈威脅，整合車輛反紅外線保護系統，完成車載雙頻譜遮蔽模組系統和煙幕材料展示確認，作為化學兵煙幕在「創新/不對稱」作戰發展的重點方向。

煙幕材料類型與製備

煙幕材料根據其形成煙幕的過程中是否伴有化學反應而出現放熱現象，可以分為熱煙材料和冷煙材料。熱煙材料如赤磷的多組分煙幕材料，冷煙材料如石墨、銅鋅合金粉和碳纖維等。在煙幕材料發展歷程，熱煙材料以改進配方研究為主，冷煙材料則在材料加工、複合材料結構設計、材料表面改質方面不斷創新發展。熱煙材料主要採用燃燒型配方設計，隨著紅外線偵察和制導武器的出現，國內外對干擾紅外線的熱煙材料研究大多從傳統配方的改進研究起步並發展為赤磷型抗紅外線發煙劑，或是以鎂、特氟龍、氟橡膠的混合物，又或者高氯酸銨和赤磷等發展為紅外線誘餌彈。

冷煙材料可降低煙幕自身的熱輻射更有利於紅外線隱身，尤其是隨著發煙機和爆炸燃放技術的成熟，各種冷煙幕材料的研發得到快速發展，主要包括層狀複合材料、超細陶瓷粉體、改質碳纖維、石墨烯、磁性膨脹石墨等材料的開發與應用，其中碳纖維及其插層碳纖維與鍍銅碳纖維複合物對 35 GHz 的毫米波有很好的消光性能。氧化還原法製備的石墨烯兼具奈米和微米級材料的優異特性，干擾性能明顯優於現有紅外線干擾煙幕材料，是一種新型紅外線干擾煙幕材料，但是製備成本較高。膨脹石墨被視為極具開發前景的新型多波段干擾材料，許多研究對可膨脹石墨進行了摻雜鐵氧體和化學鍍銅技術改質，測得改質膨脹石墨對 3~5 μm 、8~12 μm 波段的紅外線消光性能和 35 GHz 的毫米波干擾效果有不錯的綜合效能，在干擾紅外線/毫米波領域具有廣闊的應用前景。³

本研究磁性膨脹石墨煙幕材料則是使用強酸插層石墨製得膨脹石墨(EG)，再將四氧化三鐵(Fe_3O_4)或羰基鐵粉($\text{Fe}(\text{CO})_5$; CIP)等磁性粉體摻雜至層狀膨脹石墨中，獲得膨脹石墨/四氧化三鐵($\text{EG}/\text{Fe}_3\text{O}_4$)和膨脹石墨/羰基鐵粉(EG/CIP)，

3.王玄玉，〈抗紅外煙幕材料及消光性能研究進展〉《紅外與激光工程》，第 49 卷第 7 期。

稱為磁性膨脹石墨複合材料，同時利用中型攪拌器批次量產 10 公斤供消光性能測試研究。^{4,5}

煙幕材料消光性能研究

單兵操作的便攜式導彈主要以紅外線導引(如響尾蛇導彈)或以 35 GHz 的毫米波導引(如中共紅纓 5 導彈)，因此煙幕材料消光性能測試以紅外線和 35 GHz 的毫米波為主。本研究使用紅外線熱像儀(8-12 μm)測定了赤磷、銅鋅合金粉、磁性膨脹石墨等煙幕材料的紅外線消光性能。其中赤磷和銅鋅合金粉製備成煙幕彈形式測試；磁性膨脹石墨則分別添加在橡膠中製成膠片做靜態測試、添加在煙箱中做動態測試、添加在煙幕彈中做爆炸測試、添加在動力噴灑器中做動態測試等。

毫米波消光性能研究則使用向量網路分析儀，測定了磁性膨脹石墨煙幕材料在 35 GHz 的毫米波消光性能，將磁性膨脹石墨添加在煙箱中，以氣流擾動形成煙幕做穿透損失動態測試。穿透損失值用來評估毫米波消光性能，其定義為 -10dB 表示有 90%的穿透毫米波被損耗掉，包括被材料折射、散射、吸收等損耗，僅剩 10%的穿透毫米波強度被偵測到，因此國際標準均以-10dB 為重要參考值，低於-10dB 才能被認證有效遮蔽毫米波；-20dB 表示有 99%的穿透波被損耗掉。

抗紅外線/毫米波測試結果與討論

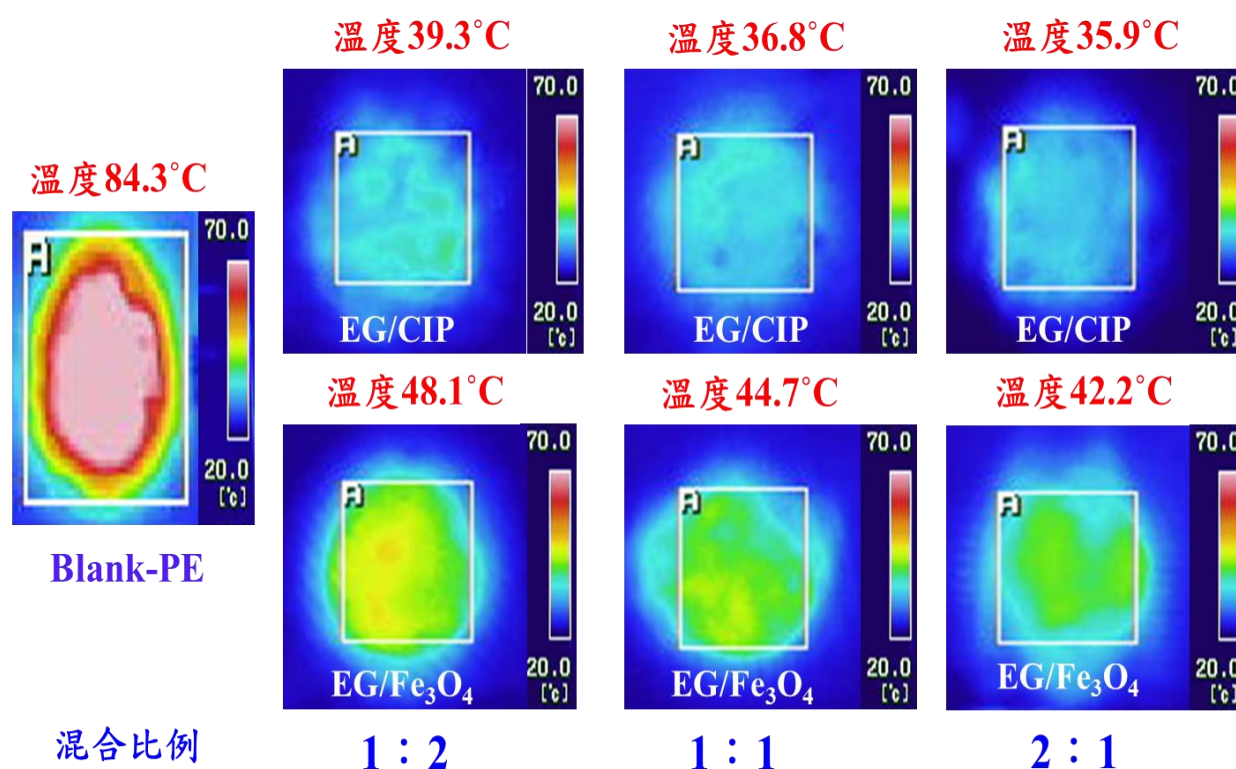
圖 2 為磁性膨脹石墨材料在每立方公分 2 毫克的含量(2 mg/cm^3)添加到橡膠中，改變膨脹石墨(EG)和磁性粉體(CIP 和 Fe_3O_4)的比例，背景熱源為 84.3°C 的烘箱，含磁性膨脹石墨材料的橡膠片置於烘箱前 1 公尺處，使用紅外線(8-12 μm)熱像儀，置於橡膠片前 1.5 公尺處測試其熱成像溫度變化。含磁性膨脹石墨材料的橡膠片假設為煙幕層，結果得到在 EG/CIP 材料能將背景熱源 84.3°C 降低至 $35.9\text{-}39.3^\circ\text{C}$ ，在 EG/ Fe_3O_4 材料則將背景熱源 84.3°C 降低至 $42.2\text{-}48.1^\circ\text{C}$ ，兩組材料均能有效的降低熱源溫度，尤其以 EG/CIP(2:1)材料更佳，降低溫度達

4.吳國輝等，〈Preparation and infrared/millimeter wave attenuation properties of magnetic expanded graphite by explosive combustion〉《Material Express》，6 (2016) 53-60。

5.吳國輝等，〈Preparation of magnetic expanded graphite with microwave absorption and infrared stealth characteristics〉《Material Express》，7 (2017) 500-508。

48.4℃，主要是磁性膨脹石墨複合材料能將紅外線有效的散射和吸收，尤其是蜂窩層狀的膨脹石墨能讓入射的紅外線產生多次折射和散射，造成多次損耗而降低紅外線能量，磁性膨脹石墨材料對紅外線的損耗能力主要來自於膨脹石墨，少部分來自於磁性粉體。⁶

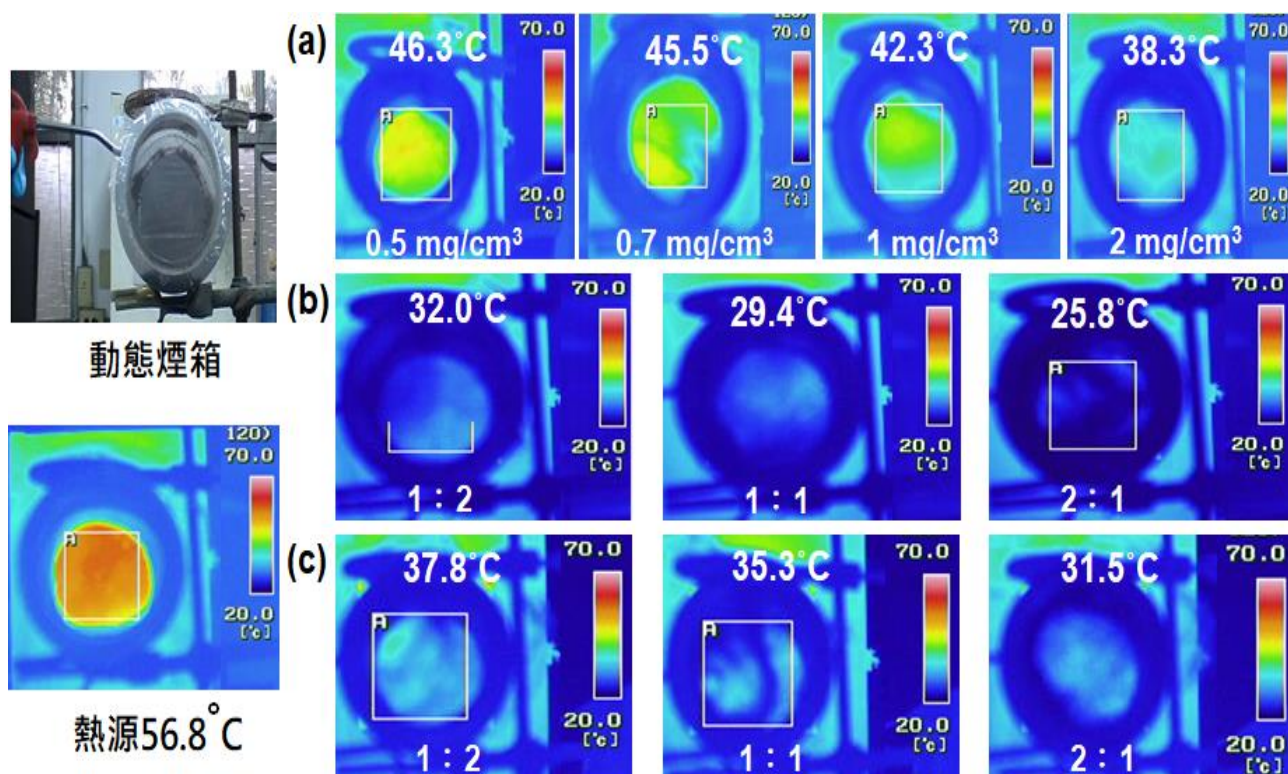
圖 2 磁性膨脹石墨材料(2 mg/cm³)在不同混摻比例的靜態膠片中的紅外線(8-12um)熱成像溫度變化。



資料來源:作者實驗所得。

圖 3 為磁性膨脹石墨材料添加到煙箱中，利用氣流擾動模擬煙幕，(a)改變膨脹石墨/四氧化三鐵(1:1)的含量 0.5-2 mg/cm³; (b)和(c)不同摻雜比例的膨脹石墨/炭基鐵粉和膨脹石墨/四氧化三鐵，背景熱源為 56.8℃的烘箱，含磁性膨脹石墨材料的煙箱擾動後，使用紅外線(8-12 um)熱像儀測試其熱成像溫度變化。結果得到磁性膨脹石墨材料在 2 mg/cm³ 含量下能將背景熱源 56.8℃降至 25.8-38.3℃，綜合靜態和動態測試結果，兩組材料均能有效的降低熱源溫度，且膨脹石墨/炭基鐵粉的紅外線消光效能優於膨脹石墨/四氧化三鐵。

6. 藍志祥，磁性膨脹石墨複合材料製備與干擾紅外線/毫米波效能研究，國防大學理工學院化學工程研究所碩士學位論文，103 年。

圖 3 磁性膨脹石墨材料(2 mg/cm³) 在動態煙箱中的紅外線(8-12um)熱像圖

說明:(a)不同含量的膨脹石墨/四氧化三鐵(1:1);
 (b)不同摻雜比例的膨脹石墨/碳基鐵粉;
 (c)不同摻雜比例的膨脹石墨/四氧化三鐵。

圖 4 磁性膨脹石墨材料利用動力噴灑器噴灑前後的紅外線(8-12um)熱像圖。

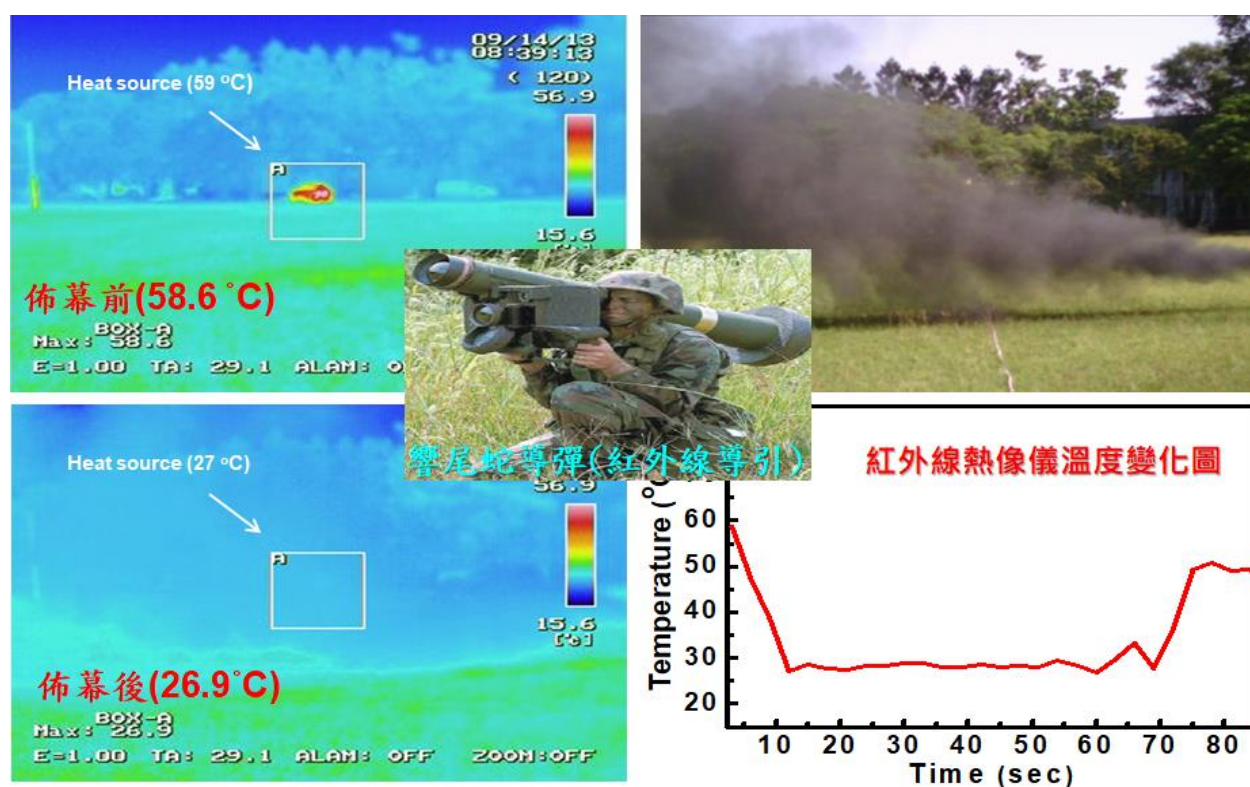


圖 4 為磁性膨脹石墨材料添加到動力噴灑器中噴灑出來，模擬發煙機噴灑煙幕遮蔽車輛熱源(58.6°C)，磁性膨脹石墨材料順暢地從動力噴灑器中噴出，不會產生間斷，推論亦能適用於 M56 渦輪發煙機噴灑。煙幕材料噴灑遮蔽後熱源溫度由 58.6°C 降低至 26.9°C ，煙幕材料噴灑遮蔽期間(第 12-70 秒)熱源紅點完全不見，且持續穩定的維持在背景溫度，這表示煙幕遮蔽期間的目標溫度完全消失，將可使熱追蹤武器「失明」或「迷惑」，結果證明磁性膨脹石墨材料優異的紅外線消光效能，應可有效的干擾肩射式紅外線導引武器如響尾蛇導彈。由以上的實驗驗證結果，磁性膨脹石墨材料確實具有做為 M56 渦輪發煙機遮蔽紅外線煙幕材料的應用潛能。

圖 5 磁性膨脹石墨在擾動煙箱中的毫米波穿透損失(26-40 GHz)測試結果

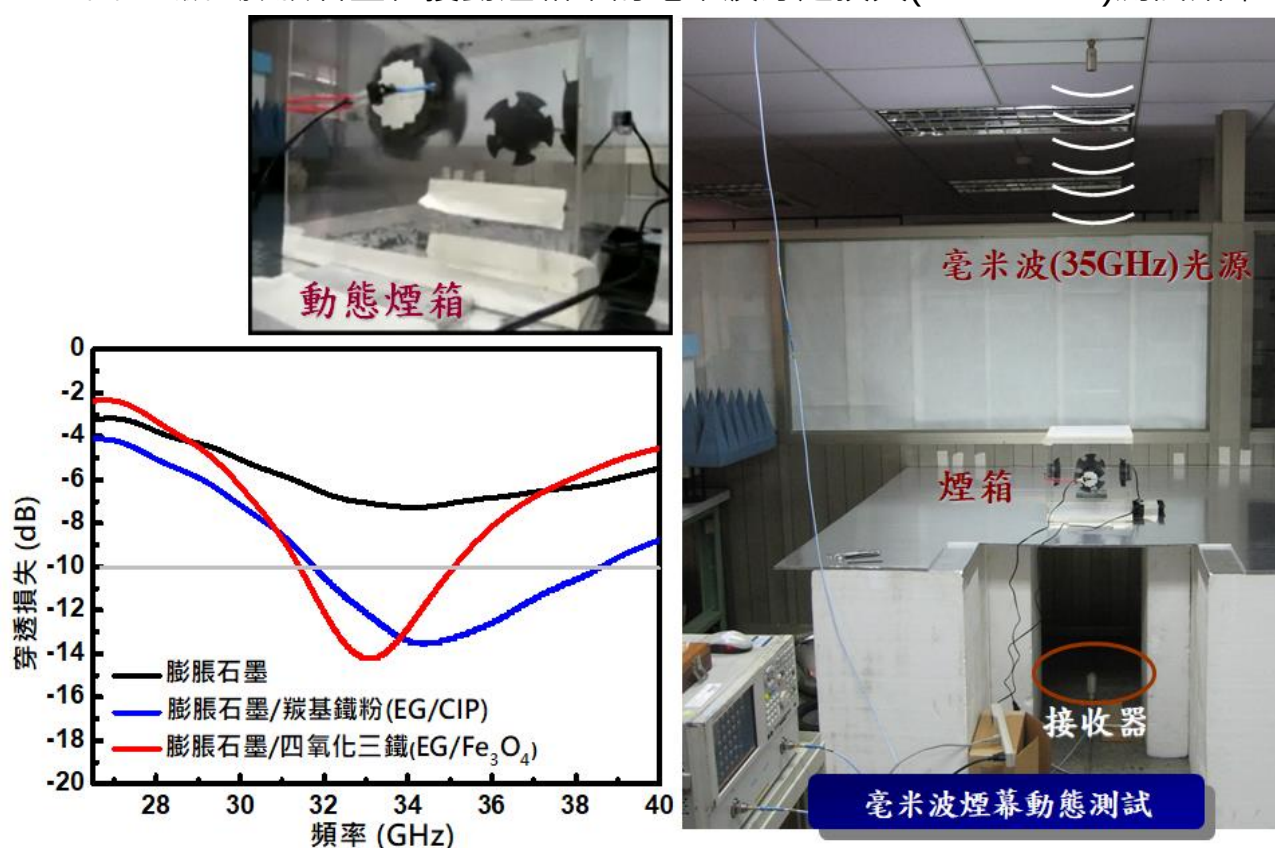


圖 5 為磁性膨脹石墨在擾動煙箱中，利用向量網路分析儀測試材料的毫米波穿透損失(26-40 GHz)變化，擾動煙箱模擬材料在大氣中形成的煙幕層，當毫米波穿過磁性膨脹石墨煙幕層後，接收器會感測穿過煙幕層後的毫米波強度。結果得到膨脹石墨/羰基鐵粉和膨脹石墨/四氧化三鐵在 35GHz 的穿透損失分別為 -11dB 和 -14dB 左右，表示約有 91%和 94%的毫米波被損耗掉，僅有 9%和 6%的毫米波被接收器感測到，證明磁性膨脹石墨材料可有效的遮蔽以 35 GHz

毫米波導引的武器系統。由以上的抗紅外線/毫米波測試結果顯示，磁性膨脹石墨材料確實具有抗紅外線/毫米波效能，可同時遮蔽紅外線和毫米波，主要是紅外線和毫米波進入磁性膨脹石墨材料後，在層狀膨脹石墨中產生多次折射和反射，同時被材料中的磁性粉體吸收轉換成其它能量，而能有效的削弱紅外線和毫米波，因此預期磁性膨脹石墨材料可做為 M56 渦輪發煙機煙幕材料。

煙幕技術發展與應用

基於上述驗證結果，我們將磁性膨脹石墨材料裝入現役煙幕彈殼中，製成戰車用煙幕彈，以單發發射器投射遮蔽 100 公尺外的發電機熱源(79.5℃)。圖 6 為磁性膨脹石墨材料裝填的煙幕彈發射爆破觀測圖，利用紅外線熱像儀測量熱源遮蔽前後的溫度變化，同時以相同方式裝填赤磷及銅鋅合金粉材料，比較三種不同材料煙幕彈的爆破佈幕情況及紅外線遮蔽效能，評估磁性膨脹石墨材料取代赤磷或銅鋅合金粉做為煙幕彈材料的可行性驗證。赤磷及銅鋅合金粉是目前現役戰車用煙幕彈的紅外線遮蔽材料。

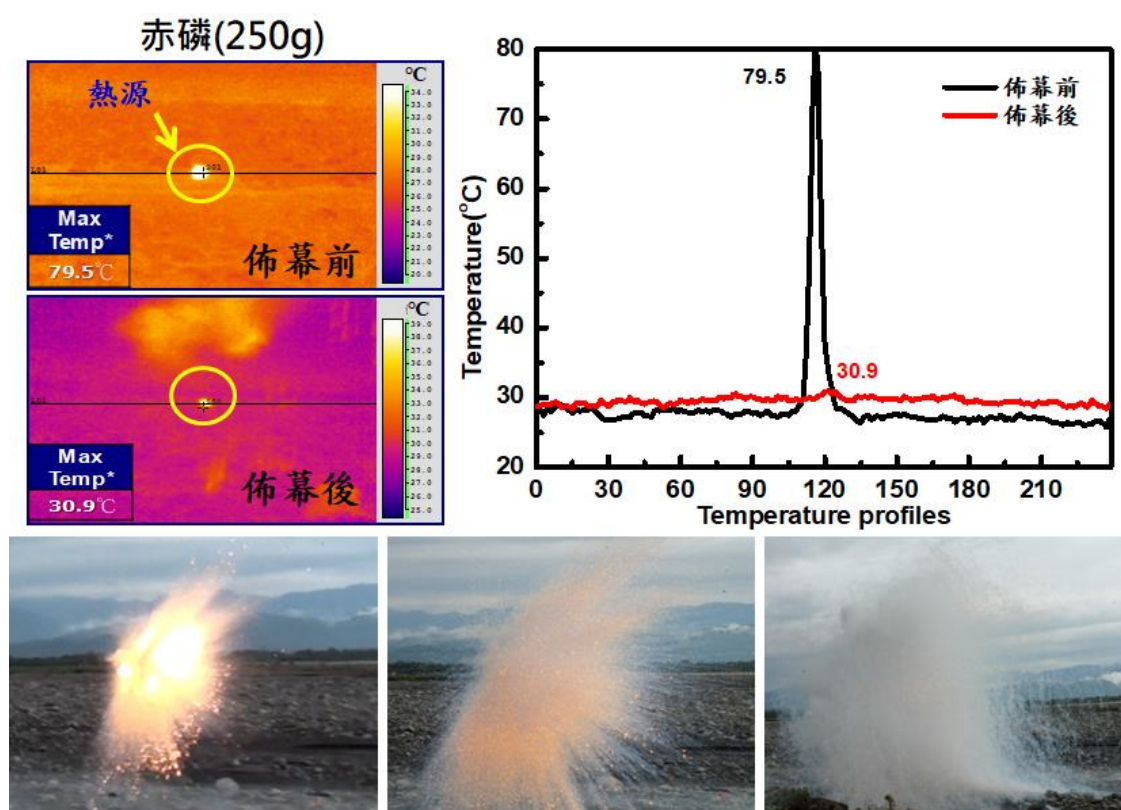
圖 6 磁性膨脹石墨煙幕彈發射爆破觀測圖及紅外線熱像儀測量



圖 7 及圖 8 分別為赤磷及銅鋅合金粉裝填的煙幕彈發射爆破觀測圖及利用紅外線熱像儀測量熱源遮蔽前後的溫度變化。赤磷煙幕彈的裝填量是 250 公克，

佈幕後可將熱源溫度從 79.5°C 降至 30.9°C ，且有不錯的遮蔽面積，赤磷煙幕彈爆炸後會燃燒產生高溫可引誘熱追蹤武器攻擊，且能有效遮蔽紅外線追蹤，但是對人員及環境有較大的危害性。銅鋅合金粉煙幕彈的裝填量是 1,800 公克，佈幕後可將熱源溫度從 79.5°C 降至 29.5°C ，同樣有不錯的遮蔽面積，能有效遮蔽紅外線追蹤，是目前現役中最佳的煙幕彈材料，但因銅鋅合金有很好的熱傳導性，火藥爆炸後的熱量會傳導給銅鋅合金粉產生高溫，對人員及環境亦有較大的危害性。^{7、8}

圖 7 赤磷煙幕彈發射爆破觀測圖及紅外線熱像儀測量結果



7.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工程研究所碩士學位論文，101 年。

8.劉吉益，抗紅外線/毫米波煙幕材料製備與應用研究，國防大學理工學院國防科學研究所博士學位論文，102 年。

圖 8 銅鋅合金粉煙幕彈發射爆破觀測圖及紅外線熱像儀測量結果

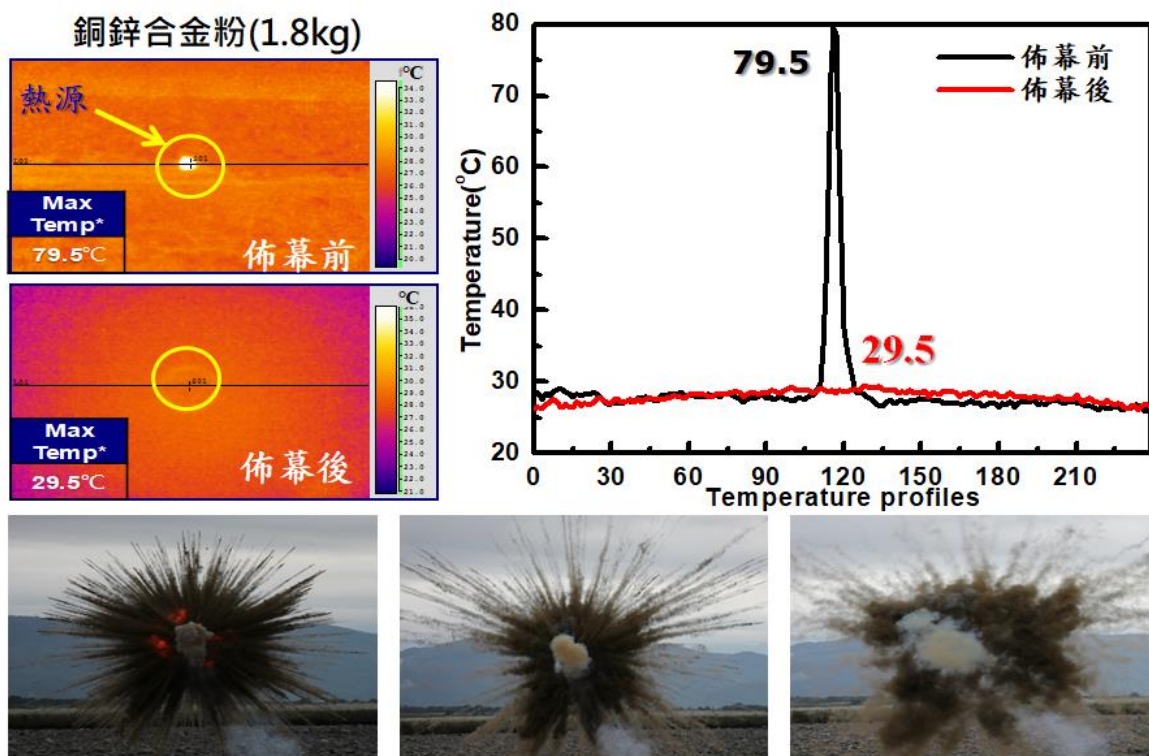


圖 9 磁性膨脹石墨煙幕彈發射爆破觀測圖及紅外線熱像儀測量結果

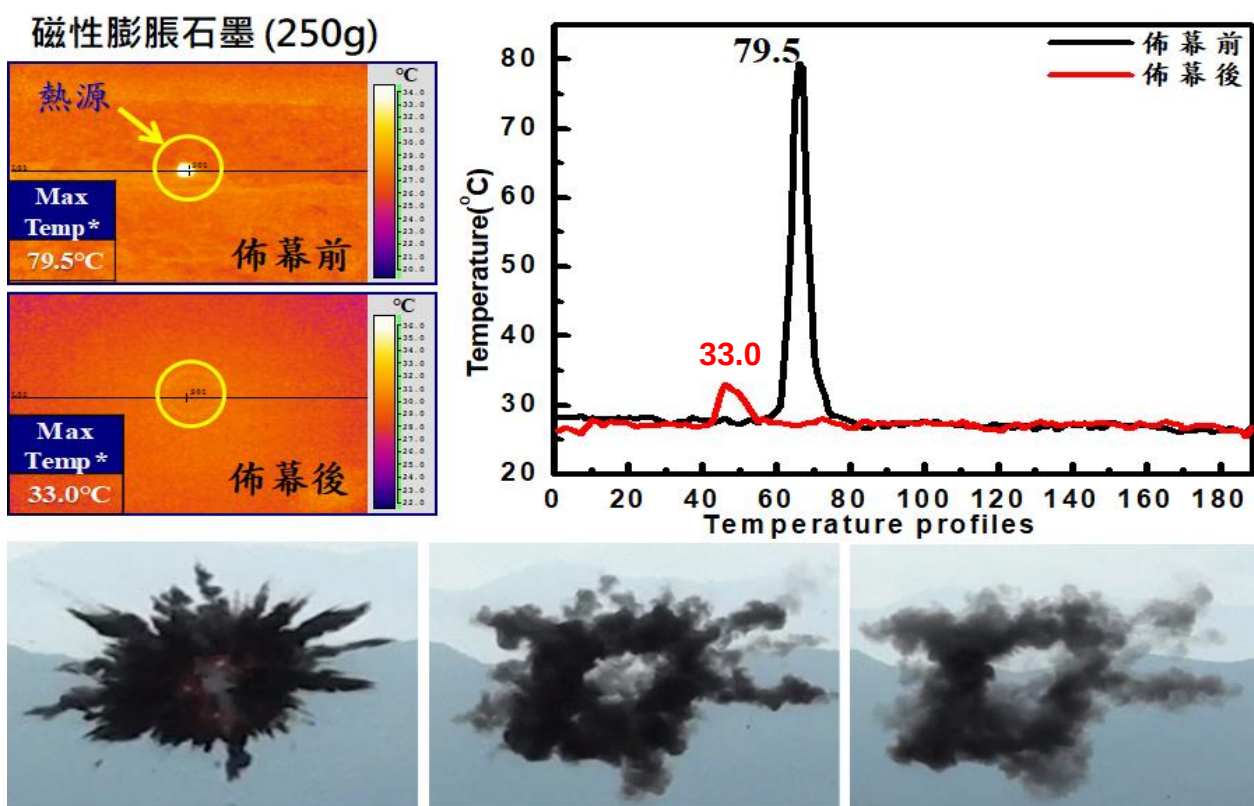
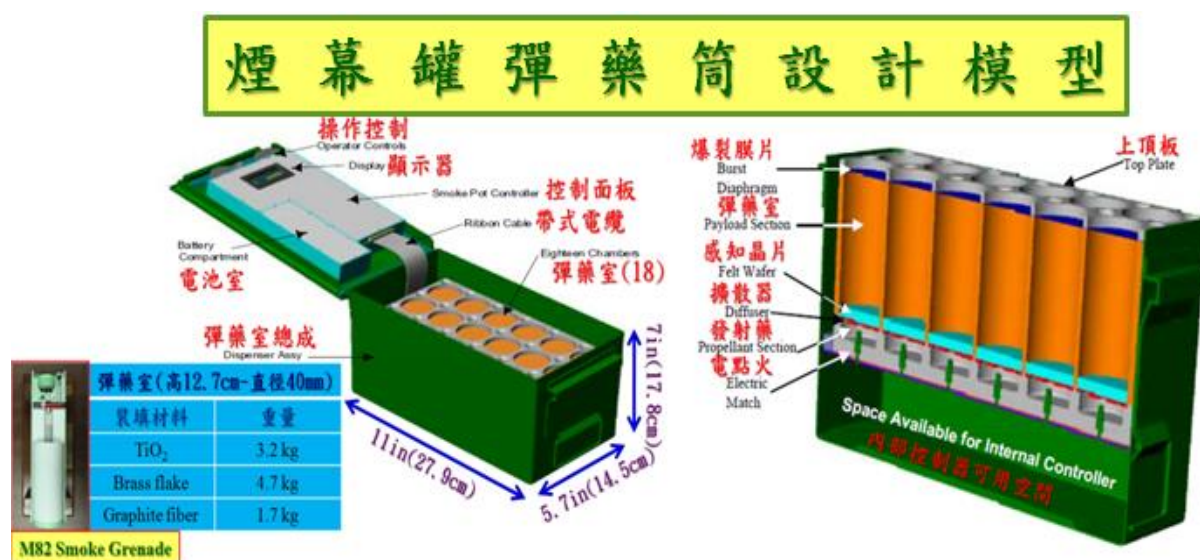


圖 9 為磁性膨脹石墨材料裝填的煙幕彈發射爆破觀測圖及利用紅外線熱像儀測量熱源遮蔽前後的溫度變化。磁性膨脹石墨煙幕彈的裝填量是 250 公克，

佈幕後可將熱源溫度從 79.5℃ 降至 33.0℃，單發遮蔽面積不如赤磷及銅鋅合金粉，主要是磁性膨脹石墨材料密度小，在現有煙幕彈的彈體只能裝填 250 公克不如銅鋅合金粉的裝填量是 1 800 公克，也無法像赤磷可以燃燒形成較大的煙幕，但是爆開的形狀和遮蔽紅外線的效果都還不錯，所以磁性膨脹石墨煙幕彈與赤磷及銅鋅合金煙幕彈有相同的紅外線遮蔽效能，但是比赤磷煙幕彈安全，比銅鋅合金煙幕彈便宜，且對人員及環境有較小的危害性。另外，磁性膨脹石墨煙幕彈可提升煙幕彈遮蔽毫米波的效能，這是現役煙幕彈赤磷及銅鋅合金粉所沒有的功能，因此磁性膨脹石墨可考慮做為新一代遮蔽紅外線/毫米波煙幕彈的材料，但是須壓實裝填磁性膨脹石墨或重新設計煙幕彈的彈體讓磁性膨脹石墨有足夠的填充量，才能發揮較佳的遮蔽面積和遮蔽效果。

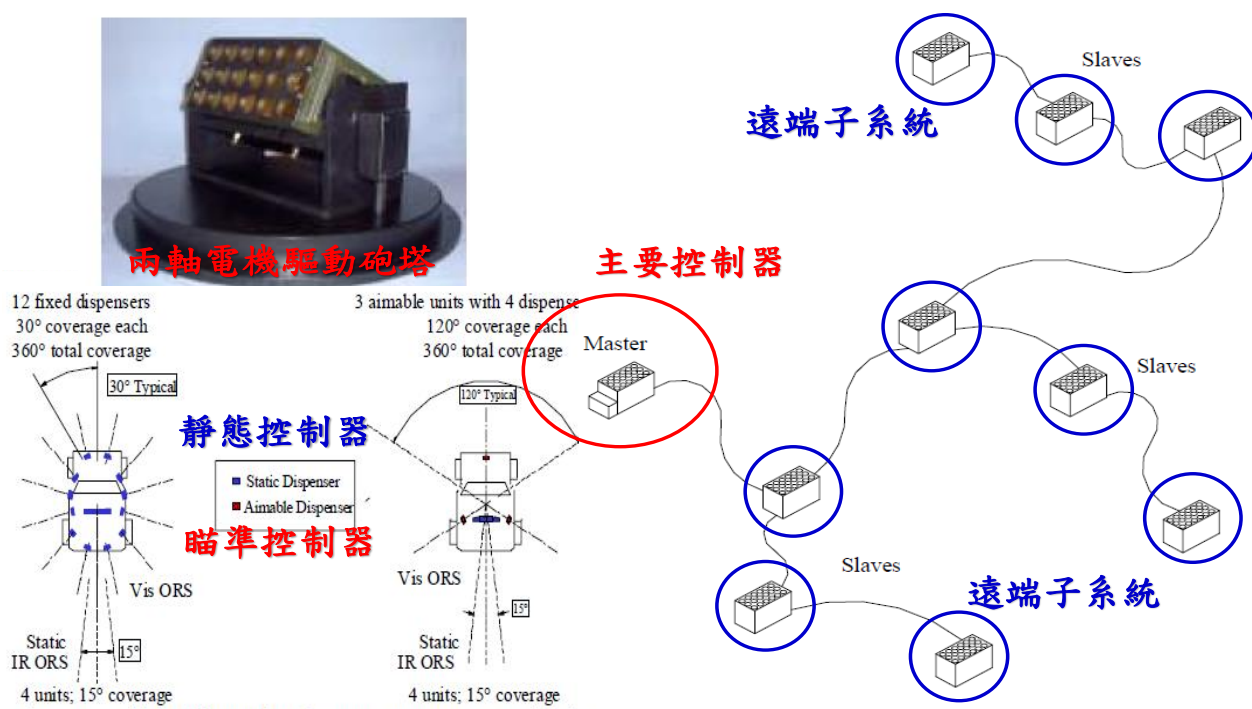
圖 10 組合型煙幕罐彈藥筒設計模型



另外參考美軍曾經展示的改良 M82 煙幕手榴彈組裝成煙幕罐(彈)箱設計模型如圖 10，⁹填充材料為二氧化鈦(TiO_2)、黃銅和石墨纖維，一箱可裝填 18 發煙幕彈(三種材料各 6 發或其他組合)，利用電點火可單發、多發或一次發射 18 發，形成不同遮蔽面積的煙幕，可單獨遮蔽或同時遮蔽可見光(二氧化鈦)、紅外線(黃銅)和毫米波(石墨纖維)，此煙幕罐(彈)箱可預先擺置在預定地點，不受天候及地形影響，遙控操作具有便利性。

9 TM43-0001-29 Grenades •

圖 11 組合型煙幕罐(彈)箱應用及佈置示意圖



另外此煙幕罐(彈)箱的應用構想如圖 11 所示，其可裝置在機動車輛上使用可旋轉驅動砲塔，形成多面向多角度可發射的煙幕彈，也可串聯多個煙幕罐(彈)箱，由遠端控制梯次點火或同時點火形成點、線、面多功能大面積的煙幕佈陣，這些應用構想可安置在指揮所、砲陣地、飛彈發射基地、重要設施及橋樑等，這些煙幕罐(彈)箱的安置佈陣可由作戰單位依作戰任務需求自行操作不需化學兵支援，可達到即時煙幕支援作戰的效果。尤其作戰想定若解放軍以巡弋飛彈低空沿淡水河進入台北市攻擊政軍要點，在淡水河兩岸火力攔截的同時或化學兵煙幕支援來不及的情況下，可在所有淡水河橋樑上事先預置煙幕罐(彈)箱，一但雷達偵測到巡弋飛彈進入淡水河口，負責單位可分批遙控點火，在淡水河上形成多重的阻障煙幕，干擾巡弋飛彈終端導引的紅外線尋標器，使得紅外線導引的巡弋飛彈無法鎖定攻擊目標而造成偏航，形成創新/不對稱作戰的效果。同樣的作戰想定亦可套用在指揮所、砲陣地、飛彈發射基地、佳山基地、機場跑道、重要道路橋樑等，戰時這些場所化學兵都無法隨時在旁支援，需要煙幕支援掩護時，這些煙幕罐(彈)箱就能扮演重要角色，讓作戰部隊可及時運用煙幕干擾作為飛彈防禦的重要手段，讓正規及非正規煙幕戰力都能充分發揮，才能凸顯化學兵煙幕創新/不對稱作戰的重要性。本研究開發的磁性膨脹石墨就是設計構想可應用在 M56 渦輪發煙機、戰車煙幕彈或電點火的煙幕罐(彈)箱上，未來

將研究量產做為新一代可同時遮蔽可見光、紅外線和毫米波的煙幕材料。

結論與建議

本研究製備膨脹石墨/四氧化三鐵(EG/Fe₃O₄)和膨脹石墨/羰基鐵粉(EG/CIP)等二種磁性膨脹石墨複合材料，驗證其是否同時具有紅外線和毫米波的消光性能。驗證區分三個部分，第一部份為靜態膠片測試；第二部份為動態煙箱和動力噴灑器擾動煙幕測試；第三部份為煙幕彈爆炸實測，利用紅外線熱像儀及向量網路分析儀量測。研究結果證明：磁性膨脹石墨複合材料在層狀結構設計、合成技術、紅外線和毫米波消光性能評價等方面取得顯著成果，磁性膨脹石墨煙幕材料可同時抗紅外線/毫米波達當 90%以上的消光性能，可應用在 M56 渦輪發煙機、戰車煙幕彈或電點火的煙幕罐(彈)箱上，做為新一代環境友善可同時遮蔽可見光、紅外線和毫米波的煙幕材料，未來將持續研究量產磁性膨脹石墨煙幕材料降低成本，能提供中科院新研發的渦輪發煙機噴灑測試及測評使用，另外建議軍備局研發遙控電點火煙幕罐(彈)箱，搭配磁性膨脹石墨煙幕材料使用作系統性的研發，朝「先進遮蔽材料科技」及「多元發煙裝備整備」等方向發展做為國軍煙幕技術發展重點。

參考文獻

1. 傅璦厚，〈戰力保存階段—煙幕運用之研究〉，《鼎盛中華論壇》。
2. 辛毓民，〈煙幕在創新/不對稱作戰發展之研究〉，《化生放核防護半年刊第》，109 期，民國 107 年。
3. 藍志祥，〈磁性膨脹石墨複合材料製備與干擾紅外線/毫米波效能研究〉，《國防大學理工學院化學工程研究所碩士學位論文》，民國 103 年。
4. 劉吉益，〈抗紅外線/毫米波煙幕材料製備與應用研究〉，《國防大學理工學院國防科學研究所博士學位論文》，102 年。
5. 吳國輝，〈Preparation of magnetic expanded graphite with microwave absorption and infrared stealth characteristics〉，《Material Express》，7 (2017) 500-508。