

攻船飛彈武器系統 熱防護材料之應用

王百祿 博士

提 要：

- 一、攻船飛彈武器系統熱防護材料之應用，無論是飛彈推進器內部結構與電子零組件的熱隔絕，或者是飛彈發射載台的熱阻絕，均攸關武器系統性能的良窳，為一項關鍵性國防材料科技。
- 二、一般攻船飛彈武器系統熱防護材料可概分為有機燒蝕性高分子複合材料，以及無機多孔性陶瓷複合材料等兩大類。我國海軍最近正式換裝成軍的光華六號飛彈快艇，艦上主要配備國產雄風二型飛彈武器系統，其固體燃料推進器噴嘴絕熱層與飛彈發射區船舷甲板防焰塗料即屬燒蝕性高分子材料，而液體燃油渦輪引擎尾管隔熱罩即屬多孔性陶瓷超微粒材料。
- 三、中山科學研究院第五研究所積累40餘年軍用複合材料研製技術能量，已成功開發一系列國內自製的攻船飛彈武器系統熱防護複合材料，可取代國外同級產品，滿足國軍自主性國防戰備任務需求。

關鍵詞：攻船飛彈、熱防護複材、燒蝕性高分子、多孔性陶瓷微粒

The applications of Thermal Protection Materials
on Anti-ship Missile Systems

Materials & Electro-Optics Research Division

CHUNG-SHAN INSTITUTE OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Wang, Pai-Lu Ph. D.

ABSTRACT

1. The thermal protection materials are essential components within navy anti-ship missile systems. These materials play a key role in the heat shielding of electronic packages within missiles and keeping structure integrity of propulsion rockets as well as the

safety of navy ship missile launching deck.

2. The thermal protection materials can be categorized into organic ablative composite materials and inorganic porous ceramic composite materials. The newly commission Kwung-Hwa IV fast missile boats equipped with SF-II anti-ship missiles which install the organic ablative composite materials for booster rocket nozzles. For the SF-II missile turbo engine, the heat insulation blankets, made of stainless foil jackets containing nano silica particles, is a typical example of inorganic porous ceramic composite materials in thermal protection engineering.
3. The Materials & Electro-Optics Research Division of CSIST has accumulated the research and application capability of armament composite materials for more than 40 years. The CSIST has successfully developed a series of thermal protection materials for the applications of anti-ship weapon systems, which meet the indigenous defense demand.

Key words : anti-ship missile、thermal protection material、ablative polymer material、porous nano particle ceramic material

壹、前言

我國海軍首支「光華六號飛彈快艇」中隊已於2010年5月18日正式換裝成軍，由國人研發自製的光六飛彈快艇配備4枚射程150公里的雄風二型攻船飛彈，由於噸位小、速度快的機動特性，加上參考拉法葉艦船體設計而達到的匿蹤效果，不僅不易遭敵鎖定，更能擔任海上快速反應兵力，對來犯之敵軍艦艇實施攻船飛彈攻擊，並可分散配置進駐台澎各戰備水域，結合艦隊作戰行動，及時調整戰術位置，遂行制海作戰任務，有效提

升我國海軍捍衛海疆之戰力，確保台海安全〔註一〕。

排水量僅50噸的海鷗級飛彈快艇配備兩枚射程40公里的雄一飛彈，是海軍過去數十年來的快艇主力，由於艦身小、耐波性差，國軍早有汰換規劃，光六計畫因此應運而生。光六飛彈快艇排水量達171噸，順流狀態下最大航速為34節，與海鷗飛彈快艇相比，航速高出8節以上，又因採用多具俾葉推進方式，航行亦比舊艇靈敏，加上雄二飛彈射程是雄一飛彈的3倍以上，光六快艇戰場存活率將遠高於海鷗快艇〔註二〕。

註一：〈海軍首支光六飛彈快艇中隊成軍〉，《青年日報》，民國99年5月19日。

註二：〈首批匿蹤飛彈快艇成軍〉，《自由時報》，民國99年5月19日。



圖一 光六飛彈快艇編隊航行英姿

資料來源：<http://www.nnews.pd.csist.mil.tw/supware.92003/>，軍聞社攝影

圖一所示為光華六號飛彈快艇出海以20節航速進行海上編隊航行的英姿〔註三〕，其配備的雄風二型攻船飛彈是由中山科學研究院量產，飛彈發射載台的熱防護材料也是由中山科學研究院生產供應。

對一個飛行載具之熱防護系統(Thermal Protection System, TPS)而言，可概分為外部熱防護及內部熱防護兩大領域。除少數如太空梭可重複使用(Reusable)之飛行載具，大量應用陶瓷磚以及陶瓷毯等無機材料外，一般軍事武器系統，尤其是一次使用(One Shot)的火箭或飛彈，大都採用硬質或軟質之有機燒蝕性高分子複合材料(Ablative Composites)來進行外部熱防護。另一方面，飛行載具之內部熱防護也可區分為有機與無機兩種材料系統。就固體燃料或液體燃料推進器來說，發動機燃燒室及噴嘴金屬結構組件內壁大多應用硬質或軟質之有機燒蝕性高分子複合材料絕熱層；但對火箭或飛彈的彈體結構而言，熱防護措施主要是阻隔熱能

由外壁傳導到內部電子控制元件，有些場合可以利用有機高分子黏著劑將低熱傳導率材料，例如軟木片，貼覆於彈體內壁，但在高速度、長期間的飛行條件下，則只有無機材料系統才能滿足整體隔熱功能需求。

貳、有機燒蝕性高分子複合材料

燒蝕性材料常應用於一次使用飛行載具之推進器噴嘴內絕熱層以及結構體外絕熱層，是一種在高溫環境下藉由自我犧牲而保護金屬結構件的軍事用途材料。燒蝕性材料除了必須具備良好的耐燒蝕性能外，亦須兼有一定程度的隔熱作用，還必須具有適當的力學性能與熱物理性能，使其在高熱負荷環境下仍能保持結構體的承載能力與氣動力外形的完整性。以上各種性能，都需要根據使用環境的具體要求，進行綜合性材料配方設計，因此，大多以高分子複合材料之型式應用。

燒蝕性材料可概分為裂解碳化型、非碳化相變型及昇華型等三種形態，以最常見的裂解碳化型為例，當燒蝕性材料暴露於高溫環境下，剛開始係以材料本身的熱容(Heat Capacity)吸收熱能，通常表面溫度會急速上升，材料表層樹脂開始熱裂解(Pyrolysis)，揮發物逸失，形成熱裂解層，然後產生碳化現象並殘留多孔性碳化層，此類反應會吸收外界傳入的熱量；材料表層纖維(如玻璃纖維、矽纖維、石英纖維…等)亦開始吸熱熔化，並在碳化層表面形成液態玻璃層，具有保護碳化層的作用；材料內部同時生成氫氣、一氧化碳、水汽、甲烷…等大量氣

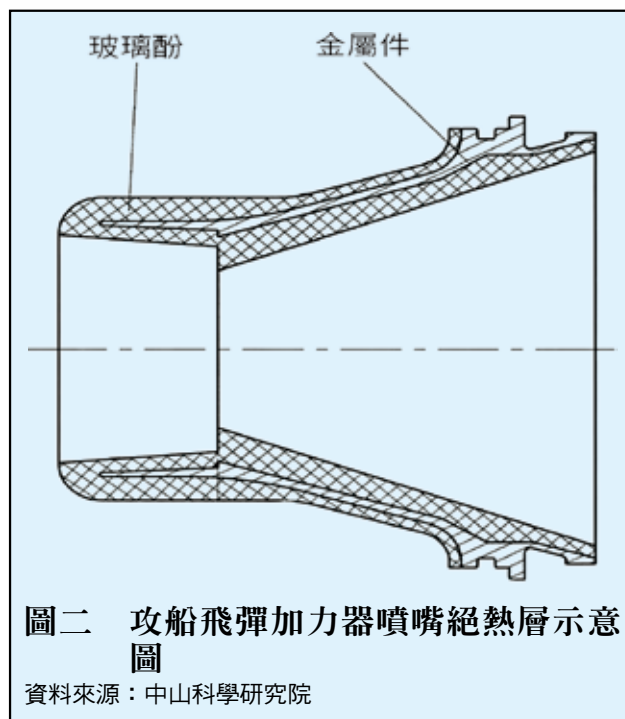
註三：〈海軍首個光華六號快艇中隊換裝成軍！增添新制海戰力〉，《尖端科技軍事電子報》，民國99年5月19日。

體，氣體穿透碳化層及液態玻璃層注入邊界層，一方面與碳和玻璃進行化學反應並帶走熱量，另一方面也進一步阻隔了邊界層內的氧氣，避免碳化層發生燃燒反應；此外，材料表面也將熱能輻射出去。隨著作用時間的增加，液態玻璃層與碳化層逐漸被氧化、氣化、昇華或被機械力所剝蝕，最後露出內層新鮮材料再重複上述反應機制，而達到絕熱效果。就裂解碳化型燒蝕性材料來說，主要有碳酚、矽酚、玻璃酚、石英酚、棉布酚、石棉酚和其他以不同樹脂如矽橡膠、環氧樹脂等為基材的低密度燒蝕材料。其中酚醛樹脂由於成碳率(Char Yielding)高達60%以上，熱裂解時可生成環型結構中間產物，與纖維之匹配性良好；完全碳化後，碳化層質地堅硬，且氣孔分布均勻，高溫耐沖刷性能優異，所以成為燒蝕性絕熱材料高分子基材之大宗。

一、固體燃料推進器絕熱材料

早期配備於海鷗飛彈快艇的雄一攻船飛彈，其推進器內部絕熱材料係以石棉酚為主，中山科學研究院第五研究所利用模壓製程(Compression Molding)將石棉酚材料固化成型，製作各式管件，最後組裝於固體燃料推進器，滿足武器系統穩定推力的功能需求。

近期配備於光六飛彈快艇的雄二攻船飛彈，其推進系統分為固體燃料加力器(Booster)與液體燃料續航器(Sustainer)兩大部分，固體燃料加力器提供大衝量使飛彈短時間內加速達到一定的初速度，以利液體燃料續航器渦輪引擎承接啟動，進行長距離之續航飛行。加力器噴嘴絕熱材料係以



圖二 攻船飛彈加力器噴嘴絕熱層示意圖

資料來源：中山科學研究院

玻璃酚為主，中科院第五所開發模壓製程，將玻璃酚短纖模造材料(Bulk Molding Compound, BMC)、玻璃酚預浸料(Prepreg)固化成型，製作包括金屬件一體成型噴嘴絕熱層、噴嘴座絕熱層、點火器絕熱層等各式加力器絕熱複材零組件。原先玻璃酚短纖模造材料係國外進口，近兩年，中科院自力完成國產玻璃酚短纖模造材料製造技術開發，預期通過系統測試驗證之後，即可取代進口材料，除降低生產成本之外，亦完全排除關鍵物料受制於外國的風險。另一方面，中科院也透過軍品釋商機制，將金屬件一體成型噴嘴絕熱層製作技術技轉國內合適業者，厚植我國國防工業民間戰備能量。圖二所示為攻船飛彈加力器噴嘴絕熱層示意圖，藉由金屬結構件沒入絕熱材料一體成型設計，符合武器系統推力需求規格。

二、飛彈發射載台防焰塗料

光華六號飛彈快艇的雄風二型攻船飛彈發射載台甲板，為避免遭到加力器具有金屬微粒之固體燃料噴焰高溫、高壓快速沖蝕而造成損毀，必須在載台甲板表面使用耐燒蝕的高性能阻燃防焰材料進行塗裝處理，以維持系統正常運作。

以往我國曾使用美國生產的耐燒蝕防焰塗料，對海軍艦艇之飛彈發射系統進行熱防護。此種防焰塗料不含溶劑、具撓曲性，可塗覆於結構外型上同時進行熟化，形成一緊密黏合於結構外型的燒蝕性絕熱塗層，在高溫熱沖蝕環境下具有良好之熱防護效果。惟近年來，該項材料遭受美國國務院輸出許可嚴格管制，國軍已無法順利採購獲得。為突破我國軍品研發受制於國外不可抗力因素，中山科學研究院第四研究所已完成同等級防焰塗料之研製與測試驗證，成功取代國外材料，應用於光華六號飛彈快艇雄風二型攻船飛彈武器系統。

同一時期，中山科學研究院第五研究所也投入同等級但施工條件不同的耐燒蝕防焰塗料之研製，完成CS-605防焰塗料自製能量籌建，所生產的防焰塗料陸續解繳海軍戰鬥系統工廠運用，並應用於海軍艦艇之甲板熱防護。此外，CS-605防焰塗料亦應用於地對空飛彈發射箱架承座/後檔框、陸基飛彈發射陣地基台排煙道、機動性飛彈發射車防焰罩組/尾焰防護座、風洞吹試支架等相關設施組件之熱防護。

一般所謂耐燃或耐火焰(Flame Resistant)材料，意指該材料與火焰接觸時，材

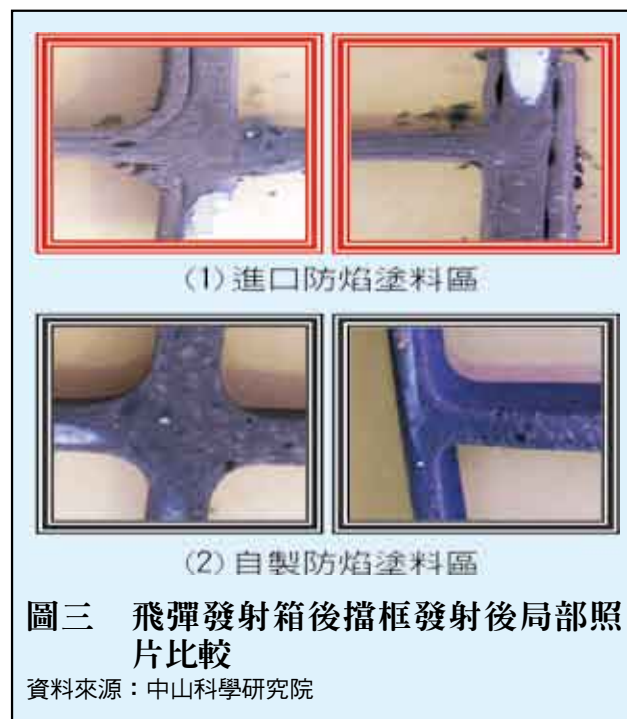
料本身不燃燒，或是材料燃燒時，火焰不會傳播蔓延，例如無機陶瓷材料及大部分之金屬材料。雖然金屬基及陶瓷基材料具有良好之耐燃特性，但因金屬基材料另有比重大、易氧化及不耐腐蝕等缺點，而陶瓷基材料亦有耐熱衝擊性等相關技術問題尚待克服，目前應用實例較少；而所謂阻燃或阻焰(Flame Retardant)材料，意指該材料暴露於火焰中，一旦引燃發火時，其傳播火焰之速度非常緩慢，例如大部分的合成高分子材料。高分子基複合材料因具有低熱傳導、低密度、高比熱及受熱可分解生成低分子量氣體產物等諸多特性，是一種相當適合的阻燃絕熱材料。

市場上商用絕熱塗裝材料中，高分子樹脂基材主要以矽橡膠、環氧樹脂、PU樹脂或氟碳彈性體為主。一般而言，矽橡膠價格比較昂貴，且無法同時滿足絕熱與耐沖刷之性能；環氧樹脂通常硬度太高，且樹脂的熱應變性與大部分基材之相容性不佳；PU樹脂除熱穩定性較差外，亦會熱分解產生毒性物質；氟碳彈性體不但價格昂貴，亦必須添加溶劑形成低固含量之溶液後才可進行塗裝，不利於大厚度塗裝材料之施工。中科院第五所複合材料組選用環氧樹脂為高分子基材，同時選用胺類硬化劑做為自製防焰塗料的主要配方之一，唯為改善環氧樹脂硬度過高現象，另外添加液態橡膠進行改質，以提高其柔軟性與韌性，使其容易塗覆於複雜結構外型，且具有較佳的受熱應變特性。

中科院第五所亦選用碳纖維做為防焰塗料之補強材，在250℃以下環境中，碳纖維係屬熱收縮材料，可有效降低複材整體熱膨

脹係數，使塗料在施作完成後之尺寸安定性提高。此外，碳纖維也具有良好耐熱、耐衝蝕特性，在燒蝕過程中會提升防焰塗料的耐燒蝕性能。而阻燃劑是一種能阻止燃燒、降低燃速或提高著火點的物質，其成份通常是由元素週期表中第III、V或VII族元素的化合物所組成。其最主要作用係藉由分解產物的脫水作用，使有機物碳化並形成一層不具揮發性的保護膜，阻止或延緩燃燒的速率。依阻燃劑的效果而言，以鹵素化合物及含磷化合物為最顯著，但此兩種化合物不利於地球環境保護，目前較常應用之阻燃劑多以硼化合物或無機阻燃劑為主。另一方面，考量艦艇甲板防焰塗料的使用環境，由於海上的紫外線特別強烈，同時亦有海水氯化物等腐蝕性因素，必須額外對高分子基材之耐候性能進行強化，所以也可添加光安定劑等助劑。

中科院第五所綜合考量防焰塗料之施工性以及製作成本等因素，最後完成AB平面使用型及TH垂直面使用型(防垂流型)兩種配方開發，並通過一系列地面風洞吹試測評以及飛彈發射驗證。中科院第五所曾於飛彈發射箱後擋框對稱部位分別塗佈美國進口防焰塗料及自製防焰塗料，執行飛彈實彈發射驗證，結果美製防焰塗料經飛彈噴嘴尾焰燒蝕沖刷後，約有25%區域產生剝離現象，並有多處發現裂開及鼓起，而自製防焰塗料則全無剝蝕現象，證明其防焰功能可通過實彈發射驗證，圖三所示為飛彈發射箱後擋框發射後局部照片，顯示中科院第五所自製CS-605防焰塗料性能不亞於美國進口產品，可列為進口防焰塗料之同級品。



參、無機多孔性陶瓷複合材料

無機陶瓷隔熱複合材料之基本原理係以氧化鋁或二氧化矽等高熔點材料，運用燒結(Sintering)或熱壓(Hot Pressing)方式製成多孔性結構(Micro-porous Structure)，利用其耐高溫及低熱傳導性質進行隔熱。例如美國NASA太空梭使用的陶瓷磚，就是純度99.8%二氧化矽纖維以高溫燒結方式製造的多孔性低密度熱防護材料，其孔隙率約90%，可將環境溫度由1260℃隔絕到180℃以下。

有些巡弋飛彈武器系統，如美國魚叉(Harpoon)系列、法國飛魚(Exocet III)系列等，以渦輪引擎提供飛行動力，其發動機引擎之尾管溫度高達1000℃以上，在窄小的空間限制下，傳統有機隔熱材料無法完全符合功能需求，因此必須以陶瓷微粒粉末(例

如Microtherm材料)做為渦輪引擎尾管之主體熱防護材料。Microtherm無機陶瓷超微粒材料係英國Micropore Insulation公司生產，其主要成分由二氧化矽(約65%)、氧化鈦(約32%)及氧化鋁(約2.4%)複合組成。除陶瓷材料本身熱傳導率低之外，Microtherm材料主要是利用粒徑約 $0.1\mu\text{m}$ 之微細粉末形成特殊的多孔性結構，以尺寸小於空氣分子振動之平均自由徑(Mean Free Path)的孔隙來阻隔空氣熱對流，並抑制空氣分子間的熱傳導；同時內部亦添加了約0.3%的金屬氧化物粒子如三氧化二鐵，以加強高溫熱輻射之隔絕性能。

陶瓷超微粒材料外面常包覆玻璃纖維布，並車縫成矩形片板或方格片板，如此可初步避免因陶瓷微粒四處飄散而造成環境污染的疑慮，同時也便利於隔熱施工作業之進行。實務上亦可配合工件特殊形狀，準備不銹鋼蒙皮，內置適量長條片板或方格片板，鈹金製成模組化金屬隔熱罩，再利用金屬扣片或金屬線帶，以機械固定方式將金屬隔熱罩固裝於工件隔熱部位，此種方法工序繁複，必須耗費較多工時，但材料之儲存、運輸、組裝均相當簡易，亦完全解決粉塵污染之問題。現今各國廣泛使用之美製魚叉攻船飛彈，其引擎隔熱罩即是將陶瓷材料膠合或機械固定於超合金或不銹鋼金屬框架，做成一個隔熱模組，再以機械固定方式完成組裝。我國光六雄二攻船飛彈亦採用類似熱防護設計，由中科院第五所產製不銹鋼隔熱罩組件，安裝於續航器渦輪引擎外部，滿足武器系統隔熱功能規格需求。

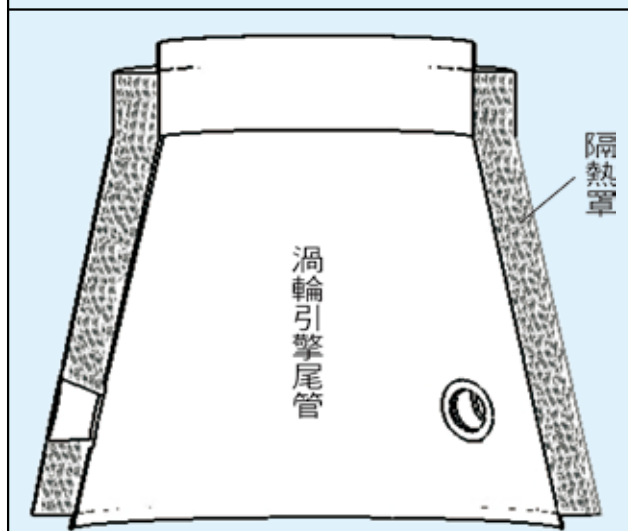
對火箭或飛彈武器系統而言，無機陶瓷隔熱複合材料或可採取化學黏著固裝方式，膠合面使用二氧化矽粉末與少量有機溶劑混合之無機陶瓷黏著劑，並配合結構件外型尺寸，以片狀或塊狀組合方式黏著固定。由於無機陶瓷黏著劑之黏著強度普遍不高，可能會因結構件之飛行振動而導致隔熱材料脫落現象，因此若能輔以機械方式固裝，則可大幅增加整體熱防護可靠度。有鑑於此，中科院第五所已完成無機陶瓷超微粒隔熱複合材料機械固裝技術之開發，近兩年並陸續協助國內業者建立不銹鋼隔熱罩組件生產技術能力，厚植我國國防工業民間戰備能量。

含陶瓷超微粒隔熱材料之金屬隔熱罩製造方法主要包括：不銹鋼箔片壓花成型、超微粒陶瓷片板材料積層、以及組合點焊封裝等三大步驟。不銹鋼箔片壓花成型係採用簡易兩道次輥壓成型方式，讓不銹鋼箔片表面產生大量規則性凹凸變化，形成壓花效果，增加不銹鋼箔片本身的表面積與粗糙度，如此可有效地增強金屬隔熱罩對各個角度輻射熱之散射效果，同時不銹鋼箔片之金屬鏡面也提高了隔熱罩對輻射熱之反射能力。此外，不銹鋼箔片之壓花構造使得隔熱罩表面與高溫熱源結構體之間呈現點接觸，由於接觸面積大幅減少，在接觸點以外的區塊，因為空氣的存在而降低了熱傳導速率，導致整體隔熱性能的提升。另一方面，以兩道次輥壓方式壓花，替代傳統沖壓式製程，可以節省沖壓機具和模具的設備投資，而壓花設計更提高了不銹鋼箔片之結構剛性，因此可選用厚度較薄的不銹鋼箔片，達到不銹鋼材料成



圖四 兩件式圓錐型隔熱罩組合示意圖

資料來源：強塑複材廣用新知季刊，第106/107卷



圖五 兩件式圓錐型隔熱罩組裝示意圖

資料來源：強塑複材廣用新知季刊，第106/107卷

本降低，以及隔熱罩重量減輕的雙重效益。超微粒陶瓷片板材料積層係配合所製造金屬隔熱罩之外型與尺寸設計，剪裁超微粒陶瓷長條片板或方格片板，製成超微粒陶瓷材料

裁片，經適當密封處理後，依一定方式手續疊層於金屬隔熱罩內部，做為隔熱罩的主要核心材料。組合點焊封裝係將超微粒陶瓷片板材料和不銹鋼壓花箔片組裝定位，並利用點焊設備完成金屬隔熱罩之外型封裝。其中不銹鋼壓花箔片須先以鈹金模具與油壓成型機鈹金成設計外型，再以陶瓷膠黏結超微粒陶瓷片板材料和不銹鋼壓花箔片，最後利用點焊機使內外層不銹鋼壓花箔片結合為一體。圖四、圖五所示為一具有貫穿孔位及固定鉗件之兩件式圓錐型隔熱罩應用示意〔註四〕，一般常以不銹鋼絲網綁固定鉗件完成組裝。

另一方面，氧化鋯(ZrO_2)亦為一個典型的無機陶瓷隔熱材料。以電漿噴塗(Plasma Spraying)之氧化鋯塗層，係於電漿高溫中讓氧化鋯粉末表面產生熔化狀態，同時在高溫、高速下，以衝擊方式黏附於金屬表面，冷卻後產生一層硬度高，且能長時間承受 $1500^{\circ}C$ 至 $1700^{\circ}C$ 高溫之耐熱層。氧化鋯塗層之噴塗厚度一般不超過3 mm至4 mm，做為長時間耐熱塗層，常應用於衝壓引擎飛彈液體燃燒室及噴嘴耐熱塗層及抗輻射層。

肆、結語

中山科學研究院第五研究所成功開發一系列國內自製的攻船飛彈武器系統熱防護複合材料，可取代國外同級產品，滿足國軍自主性國防戰備任務需求。近幾年並遵循中科院軍品釋商機制，將部分熱防護複材零組件

註四：王百祿、徐修硯、葛光祥，〈超微粒材料隔熱罩製作技術〉，《強塑複材廣用新知季刊》，第106期，第107卷，中華民國強化塑膠協進會，民國95年6月，頁68-74。

製作技術技轉國內合適業者，陸續協助國內廠商建立軍品生產技術能力，厚植我國國防工業民間戰備能量，以逐步排除國外不可抗力因素，降低軍用物資籌獲風險。



作者簡介：

王百祿先生，國立成功大學機械工程系，國立中山大學機械工程博士，現服務於中山科學研究院第五研究所。

老軍艦的故事

沅江軍艦 PC-110

沅江軍艦係由美國Florida州之 Gibbs Gas, Engine公司所建造之巡邏艦，編號PC-1182，1943年7月14日下水成軍，在美服役期間曾參加第二次世界大戰。

民國43年7月2日美國依據中美共同防禦協定，將該艦移交我國，我海軍接收後立即成軍，並命名為「沅江」軍艦，編號PC-110，隸屬巡防艦隊。沅江軍艦自成軍後除擔任海防巡弋任務外，曾先後參加多次戰役，其中較重要的戰役計有：民國46年5月16日四姆嶼海戰、民國46年6月20日閩江口海戰及民國47年8月14日海壇島海戰等，服役期間戰功彪炳。該艦於民國54年2月1日，因艦內裝備老舊且已不堪修復，奉命除役。(取材自老軍艦的故事)

