



淺談複合裝甲材料

筆者/黃譯模

提要

- 一、戰車裝甲防護力來自於材料，防護等級也隨著材質的密度，角度與力學，而區分不同等級，早期認為如龜卵形的鑄造圓弧砲塔抗彈性最佳，同時傾斜角度也可以增加抗彈強度，均質鋼剛性再強也到材料極限，也不能一直加厚以強化防護力，過重的砲塔會讓底盤無法負荷。
- 二、鑿穿裝甲板主要來自於動能(KE)與熱能(HEAT)穿甲彈兩種，高速動能穿甲彈(只能由戰車砲發射)現以大口徑火砲發射次口徑穿甲蕊(現今 105-125 公厘戰車砲)，所發射的翼穩脫殼穿甲彈，彈蕊直徑為 30-35 公厘之間，一般採取鎢鋼合金製造，穿甲力可達 450-700 公厘，部分擁有衰變鈾合金製造能力國家，甚至可到 850 公厘侵澈力，反制方法為複合材料最強之乏鈾夾層。
- 三、純陶瓷並不具備抗彈性，以現今工業用精密陶瓷，適用於機械加工與抗彈材料為加入「氧化鋁」的機械用陶瓷，在 1961 年已裝置在 UH-1H 直升機駕駛座椅可抵抗 7.62 公厘槍彈射擊，氧化鋁(礬土)與瓷坯土混合後，可製造出高硬度、強度(可做機械原件)及耐高溫(2,075°C)與耐酸蝕，同時也是現今戰車複合裝甲陶瓷層。
- 四、現今冶金技術與複合材料再進步，也只能用於砲塔及引擎蓋板及車底(加裝)防護，戰車底盤仍是以均質鋼材製作，因為它需承受砲塔重量、銑孔以鎖上避震與傳動機構，迄今各戰車製造國均採相同作法，將防護複材用以製造砲塔，因此複合材料表裏層均質鋼如何取得適當比例，以過去戰車製造經驗，砲塔佔全車重不得超過 2/5(總重 40%)最為理想，過重砲塔將使戰車配重失衡，有翻車之虞。

關鍵詞：裝甲防護力，複合裝甲，錐孔裝藥，反應式裝甲

前言

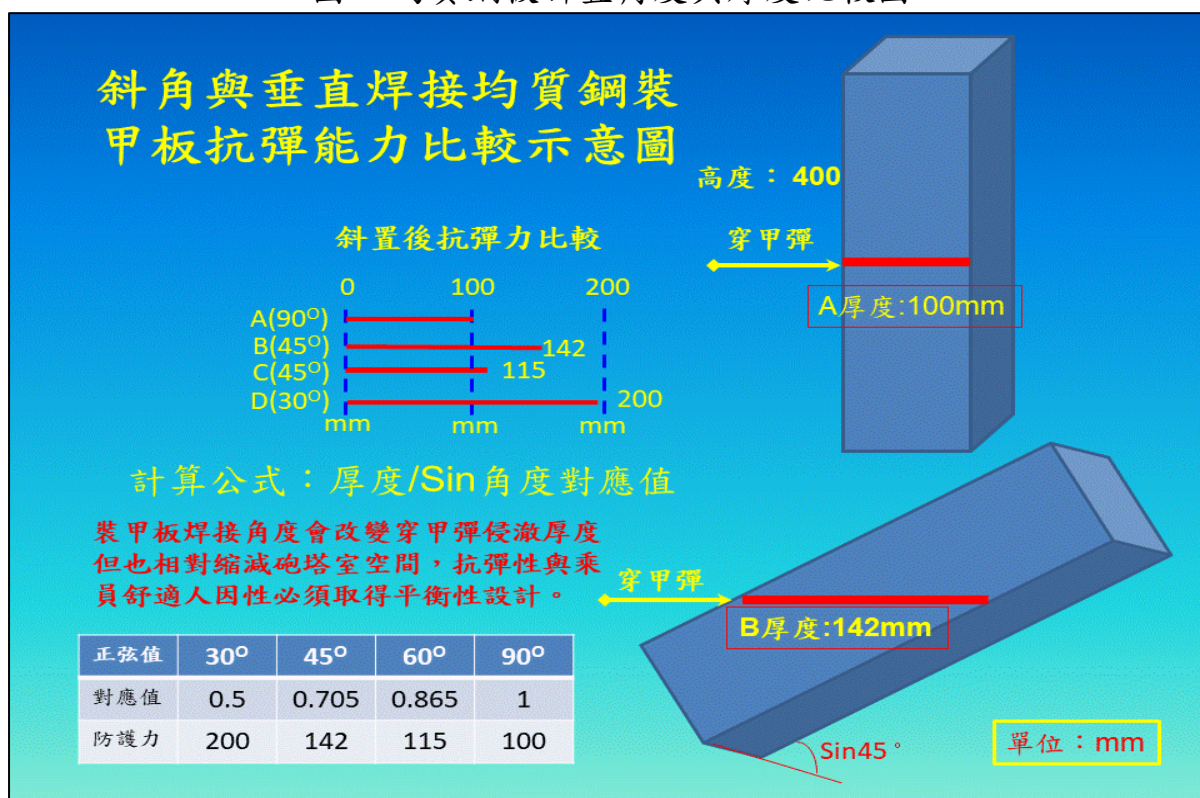
戰車裝甲防護力來自於材料，防護等級也隨著材質的密度，角度與力學，而區分不同等級，早期認為如龜卵形的鑄造圓弧砲塔抗彈性最佳，同時傾斜角度也可以增加厚度(如圖 1)，¹然而均質鋼剛性再強也到材料極限，也不能一直加厚以強化防護力，過重的砲塔會讓底盤無法負荷，因此研發防護材質者，如早年鋼盔而言都以鋼材製造，要作到完全保護，不可能，在纖維合成材料發明後，「鋼盔」已經易名為「防護頭盔」，做到輕量，防護力更佳，減輕士兵負擔，如

¹獨島刀也，《地表最強戰車!M1 艾布蘭戰車徹底追蹤》，(新北市，瑞昇文化事業股份有限公司，2010 年 10 月)，頁 87，當等厚度裝甲板斜置至 SIN30° 裝甲厚度會增加 1 倍。

同防護背心內鑲抗彈板，幾乎已不見鋼材，可見複合材料，是戰車裝甲防護力強化的希望與未來，國軍在戰鬥個裝上，已大量運用複合材料，包含陶瓷與合成纖維，這些產能在國內，具備相當潛能與產能，只待我們提出需求規格，相信協力業者廠商，也可以同步實驗與開發相關產品。

鑿穿裝甲板主要來自於動能(KE)與熱能(HEAT)穿甲彈兩種，高速動能穿甲彈(只能由戰車砲發射)現在多以大口徑火砲發射次口徑穿甲蕊(現今 105-125 公厘戰車砲)，所發射的翼穩脫殼穿甲彈，彈蕊直徑為 30-35 公厘之間，一般採取鎢鋼合金製造，穿甲力可達 450-700 公厘，部分擁有衰變鈾合金製造能力國家，甚至可到 850 公厘侵澈力，反制方法為複合材料最強為乏鈾夾層；熱能穿甲彈(戰車砲、反裝甲火箭與飛彈)運用較為廣泛，其穿甲力與彈頭直徑成正比，因為它可以裝置更多火藥與反置銅片，可以產生多量高溫噴流以熔穿裝甲板，反制方法除複合裝甲外，以反應、中空及柵欄式裝甲，均可達到一定程度抵抗熱能穿甲彈的熔穿。

圖 1-均質鋼板斜置角度與厚度比較圖



資料來源：筆者整理繪製

壹、複合式裝甲的材質

一、均質鋼裝甲層 (Rolled Homogenous Steel Armor, 以下簡稱, RHA)

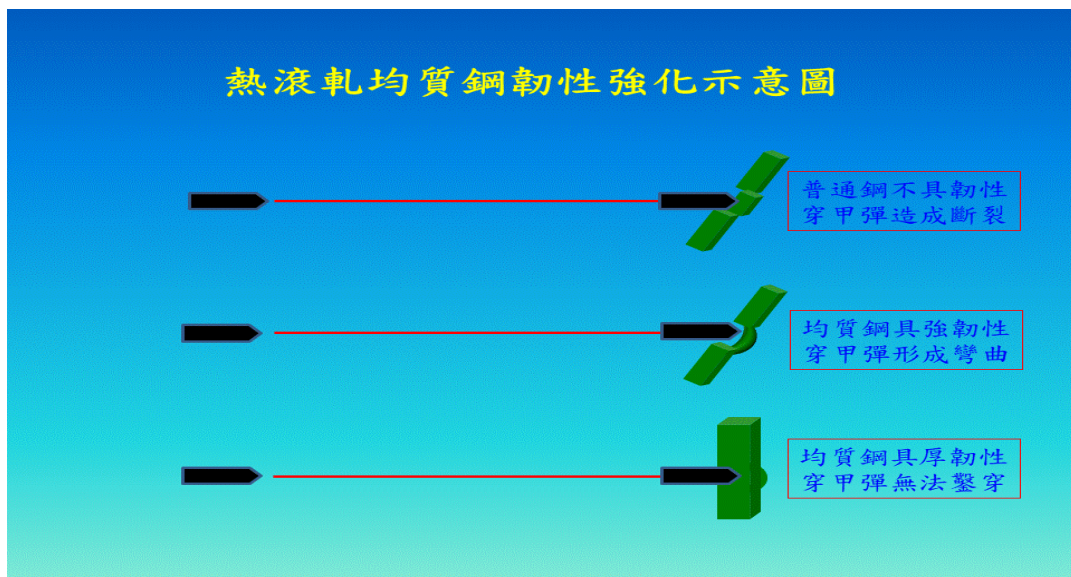
(一)金屬材質：

鋼鐵材質繼銅之後，成為兵器與甲冑最主要材料，當人類知道經過熱處理



與鍛造，可以將鐵變為更堅硬的鋼，古代許多「名劍」製造傳聞以人殉爐，才能製造出鋒利劍刃，²可達「削鐵如泥」之效，當然現在煉鋼技術以非昔日可比，除傳統高爐，現在可利用電子化處理，加上熱處理與軋壓技術發達，製造出來的鋼材硬度與韌度均可作為裝甲的底裡層，但是鋼的比重，製造出來主力戰車往往達 50 公噸以上，這對部分需求能輕量甚至空運與浮游的戰鬥載具，另一項的選擇是鋁，鋁、鐵在地球上儲量豐富，加上回收廢材，可以再加工，所以不論新材或再生，除部分醫療與食材容具不准使用再生鋼外，另一個大家最近常聽到的是鈦，但純鈦及純鋼不與其他材料合成，成為合金，強度不會增加，如鋼加入比例鎢之後，熔點與強度立即上升(如圖 2)，鋁(25-36%)加入鈦成為鈦合金，其強度超過鋼，但也可加入鎂，成為鋁鎂合金等等，但一般就成本與原料取得便利性，均質鋼成為裝甲防護力的首選，³因為砲塔的表裏層，為裝設附加設備，會以焊接，鑽銑孔洞，攻牙，鎖上螺絲，做成支架或固定裝備之用。

圖 2-熱滾軋均質鋼板韌性強化示意圖



資料來源：筆者整理繪製

(二)材料製程：

金屬加工過程首先為熱熔解，使固態金屬液化(600° - $1,700^{\circ}\text{C}$)，開始去除雜質與添加物，一般稱之為「爐渣」，現代再加上電解，使液化金屬純度更高，冷卻成形(熱處理加熱曲線與冷卻方式，各金屬加工廠商均列為機密)，

²閑眠草堂編，中國十大名劍，< <http://muohsien.pixnet.net>>item-china，2008 年 5 月 28 日，(2022 年 1 月 5 日)。

³同註 1，頁 84，均質熱軋鋼板(RHA)以美軍 MIL-A-12560 合金鋼規格，作為測試標準，例如：A 彈藥可以穿透 30mmRHA，穿甲力即為 30mm。

再加熱至可鍛造溫度，以重力軋製，過去需靠工匠的強壯手臂反覆加熱與敲打，而後製成各種形狀如圓管，塊狀，請注意這些成形原材不是以鑄造加工，因為太脆弱，不適合再加工，而均質鋼抗彈鋼板，及以多層軋製而成，若以顯微鏡來觀察，會發現鋼材有如千層蛋糕般充滿細密緊湊的細紋，其他各類金屬也大致以此成為材料，接下來就要進入再加工程序，製作鋁門窗、腳踏車架、建築鋼樑(筋)，而本章節為描述是如何加工製成均質鋼抗彈鋼板。

(三)材料加工

1.材料成形：(如圖 3)

過去工作母機，以車床、銑床、刨床、鉗工及研磨與切割，使鋼鐵廠送達原料，經成形程序，預行製造出所需形狀，抗彈鋼板在出廠前，會與建築的預鑄混凝土一樣，先完成成形，並預留加工所需孔洞與刻槽，一般會省去成形程序可立即進入加工程序。

2.加工方法：

(1)焊接：

包含電弧(導電材質)、氣體(絕緣與導電材質)焊接，熱熔接續(氧氣及乙炔)，能讓金屬板材組合而成所需形狀，焊接的好處在於可同時生產大量成形金屬板材，不似鑄造需等待冷卻脫模，但必須有技能成熟的工匠完成接續與固定，且經實驗焊接成形強度比預鑄來的高，⁴現代製造更可以藉由自動機械手臂，進行預製均質鋼板焊接，為部分細節或難以自動加工仍需藉由人工補強。

(2)鉚接：

本項工法已不適用於現代抗彈鋼板加工，過去船身、早期裝甲車輛、鐵橋及鋼樑曾經使用，如舊西螺大橋即以此法施工。

(3)榫接：(如圖 4)

本項工法可能使用於部分國家裝甲複材製作，惟接榫部位需精準定位，過去成熟木工師傅，可不用釘、鉤完成木構建築主要樑架建構，金屬榫接精準度更高，⁵因金屬不似木料具有壓縮性，且接續縫仍需經過焊接程序，一般會將複材層以金屬網箱包覆，使其具備壓縮與封閉性，遭穿甲彈擊中後，在異質層內，消退其侵澈動能與熱能。

⁴陳憲政，鑄造與焊接成形鋼鐵強度比較說明，〈[Http://www.xuite.net.tw](http://www.xuite.net.tw)>awscwis>，2017 年 7 月 31 日，(2022 年 1 月 24 日)。

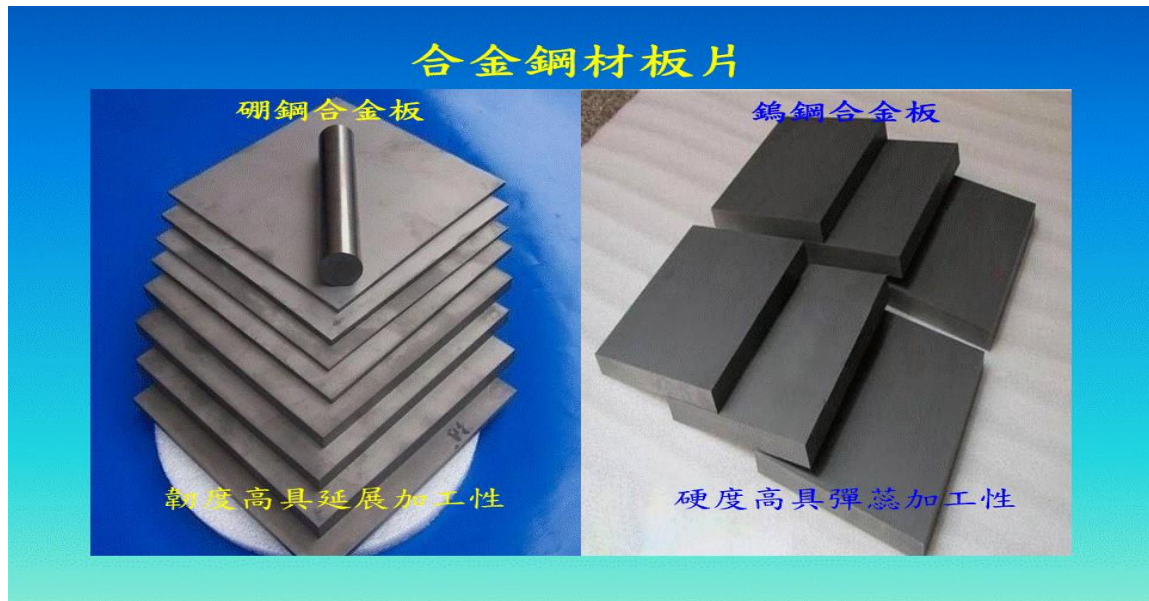
⁵Pelle，金屬榫接精度為 1/1000 英吋(0.025mm)，〈[Http://mag.addmaker.tw](http://mag.addmaker.tw)>金屬榫接，(2020 年 2 月 17 日)，(2022 年 2 月 9 日)。



(4)鎖接：

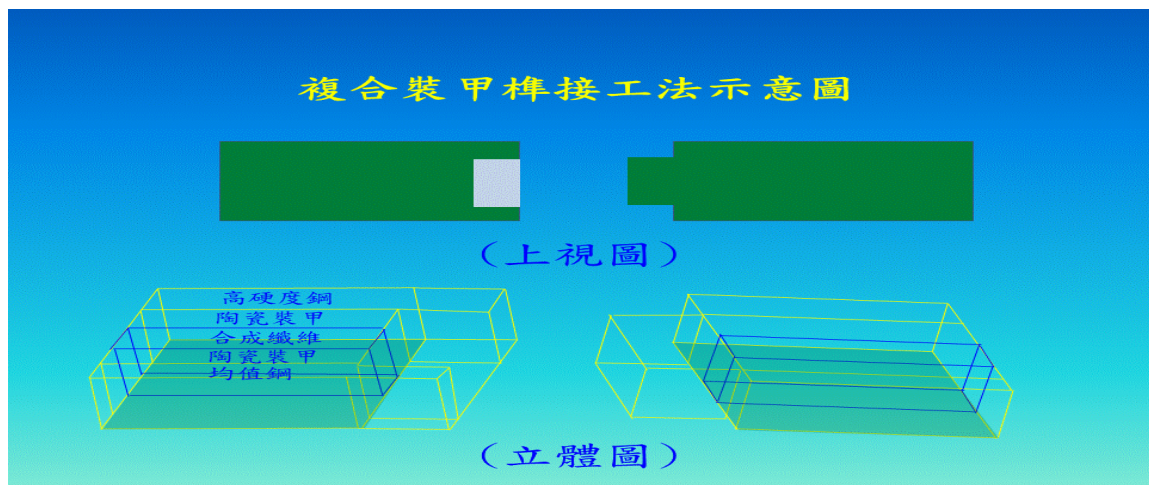
一般以螺絲固定，可用於附掛式裝甲或抗彈鋼板接續，惟過多螺孔與外露螺絲，在戰鬥間若遭穿甲彈攻擊，易形成脆弱破口，使抗彈力降低，惟現代部分戰鬥載具，仍以保留預鎖孔，以便於戰時視威脅狀況加裝反應式裝甲或抗彈鋼板，以增強防護力。

圖 3-合金鋼材板片



資料來源：<http://www.tlmetal.com.tw>，檢索時間：111 年 2 月 15 日

圖 4-複合裝甲樺接示意圖



資料來源：筆者整理繪製

二、精密陶瓷裝甲層(Ceramic Armor,以下簡稱 CA)

(一)陶瓷材質：

陶與瓷室是由兩種不同坯土與窯燒溫度製成，一般民間用於餐具與儲存容器，陶的發明時間較早，人類在取得黏土，利用塑型與柴燒即能製成，而瓷器需在人類能夠以更高溫控制窯溫及彩釉獲得後，才能廣泛使用，其主要分類，而精密陶瓷裝甲式以全瓷化作為主要加工材料，並採壓縮鑄模方式取代轉動式拉坯，經現代奈米技術導入，使精密瓷化板可以做得更輕且更硬，可取代更多機械加工品(如表 1)。

表 1-陶器與瓷器比較表

區分 項次	陶器	瓷器
吸水性	>3	<3
透光性	×	○
胎體特性	未玻化，斷面粗糙	全玻化，斷面細緻
敲擊聲	混濁	清脆
燒製溫度	800°-1,100°C	1200°-1,400°C
坯土材質	黏土(超過 1,200°C 不會瓷化)	高嶺土、長石及石英土 ⁶

資料來源：Https://kknews.cc>文化，檢索時間：111.01.24

純陶瓷並不具備抗彈性，以現今工業用精密陶瓷，適用於機械加工與抗彈材料為加入「氧化鋁」的機械用陶瓷，⁷在 1961 年已裝置在 UH-1H 直升機駕駛座椅可抵抗 7.62 公厘槍彈射擊，氧化鋁(礬土)與瓷坯土混合後，可製造出高硬度、強度(可做機械原件)及耐高溫(2,075°C)與耐酸蝕，同時也是現今戰車複合裝甲陶瓷層，現代戰車不論是旋(滑)膛砲所發射高速穿甲彈(KE)，不以高速旋轉貫穿，而是以次械彈幾乎不旋轉，有如弓所射出之箭，筆直朝目標而去，以均質鋼構成的裝甲體，已無法抵禦 500mmRHA 貫穿

⁶ 瓷器原料一覽表

區分 內容	中文名稱	英文名稱	化學式	比例
高嶺土	觀音土	Kaolintie	Al ₂ SiO ₅ lOH ₄	50%
長石	矽化氧鉀	Feldspar	KAlSi ₃ O ₈	25%
石英	矽酸鹽	Quartz	SiO ₂	25%

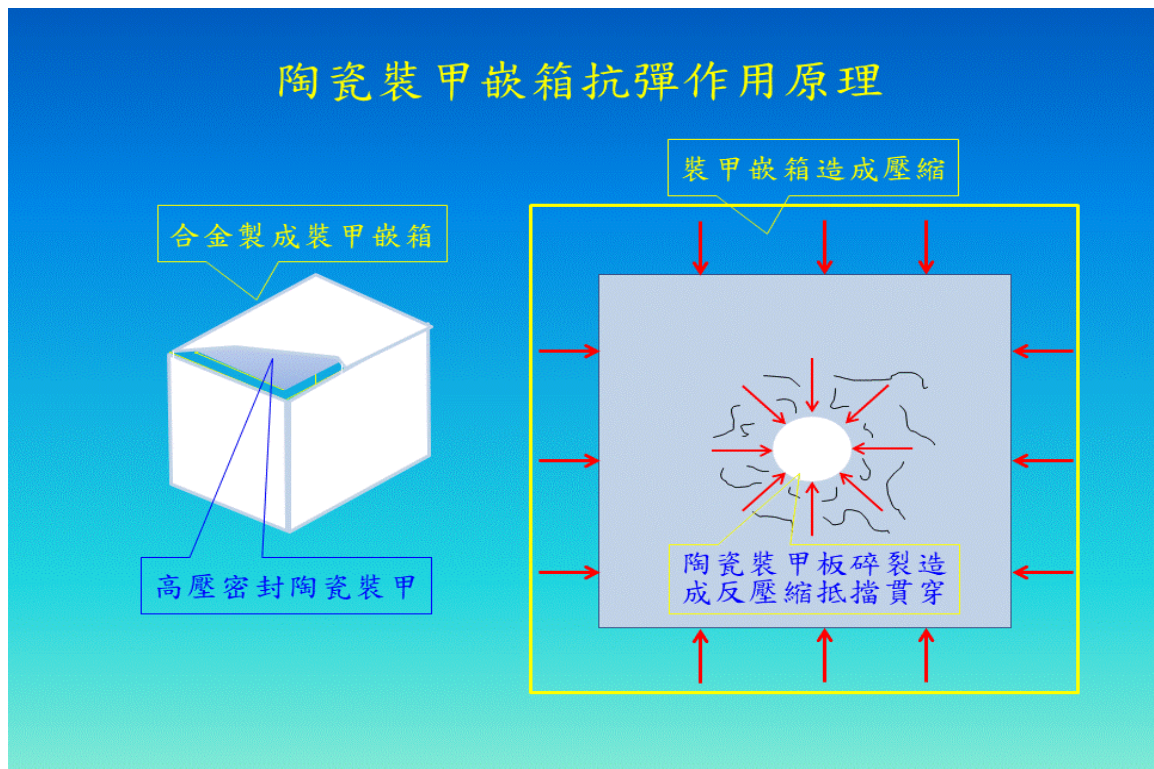
泰興應用材料，Http://www.taimax-materials.com.tw>product-02，2021 年 12 月 15 日，精密陶瓷胚成分，(2022 年 124 日)。

⁷同上註，氧化鋁(Aluminium oxide)，化學式 Al₂O₃ 俗稱「礬土」，用途廣泛，若與瓷坯土混合，可燒製工業用陶瓷。



力以上動能彈攻擊，因此陶瓷裝甲成為複合裝甲材層之一，(如圖 5)。

圖 5-陶瓷裝甲抗彈作用原理圖



資料來源：筆者整理繪製

(二)陶瓷製程

1.水混坯土：

坯土取得後沖入大量純水(注意酸鹼值)，以攪拌機充分將兩種坯土按比例混合為泥漿，這過程類似稻米加工品，需以石磨將米磨成粉漿，之後以細棉布袋盛裝，再以重物壓除水分，讓米粉(不是新竹盛產的)可以做為年糕、板條的基材，當然坯土本為粉狀，只需直接水解即可。

2.過濾去雜：

接著以離心機將泥漿脫水，將充分混合但未乾燥坯土取出，並仔細檢視分離雜質，確保坯土純化。

3.乾燥粉化：

再將半乾燥坯土送入乾燥機，以低溫烘乾，成為乾燥粉末狀坯土。

4.添加混合：

坯土加入氧化鋁，但本添加物無法水解，因此攪拌機再度上場，原理跟製作麵團一樣，將坯土倒入再加入等比例氧化鋁，先充分攪拌均勻，再以儀器測量散布密度，再加入水攪拌成均勻坯土團。

5.粗坯壓模：

過去陶瓷產品多以拉坯機不論手動或機械，先完成粗坯塑形，再陰乾，而

後再修坯，待全乾燥後，進行第一次窯燒，得到素坯(全瓷化會是白色)，再進行彩繪與上釉，再進行第 2 次窯燒，待冷卻後就是成品，但機械工業用不用拉坯，而是用模具製作，將氧化鋁坯土團填入模具，以電爐進行粗坯燒製，完成後以機具修坯。

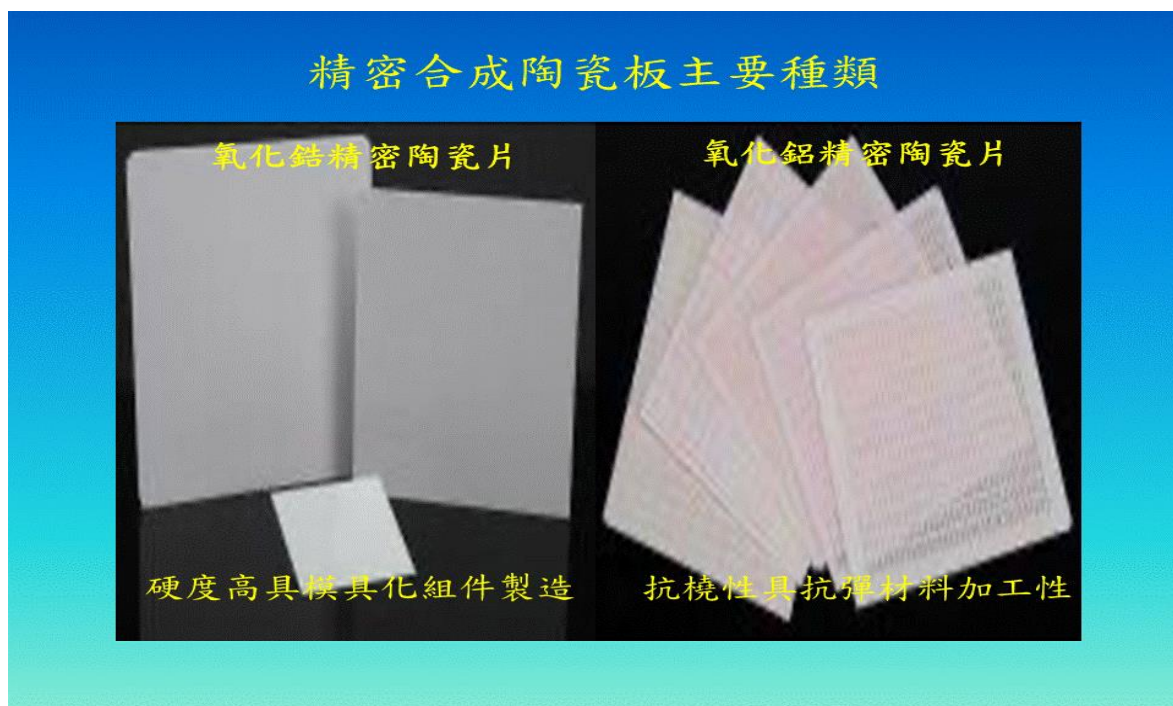
6.脫模窯燒：

修坯後脫離模具以電窯爐進行窯燒溫度約 $>1,300^{\circ}\text{C}$ ，時間是物件由定時控制，完成後再次精度檢驗，確認產品合於規定，準備與襯墊層膠合。

(三)陶瓷加工

機械用氧化鋁陶瓷製第二階段已經完成，抗彈裝甲板必須進行襯墊層貼合，因為大部分襯墊層材質，在窯燒高溫下，會熔解或化為灰燼，無法以內鑲方式製作，此時加工技術就可以運用合成纖維製成技術，將襯墊層(層數不定，材質保密，一般是具堅韌細網狀或類布料編織纖維材質)使用特種樹脂(使用環氧樹脂)與氧化鋁陶瓷板膠合，再以真空收縮膜定形，送入烤箱烘乾完成後就是堅硬且具韌抗性的陶瓷裝甲板，⁸ (如圖 6)。

圖 6-精密合成陶瓷裝甲板



資料來源：<http://www.ceramictaiwan.com.tw>，檢索時間：111 年 2 月 15 日

三、合成纖維裝甲層(Synthetic Fiber Armor,以下簡稱，SFA)

(一)纖維材質

纖維材質來源自於天然植物纖維、動物毛髮、植物果實及昆蟲絲繭，尤其是蠶絲紡織技術為中國獨有，織成的綢緞成為古代對外貿易最昂貴布料，

⁸ 同註 1，頁 93。



一般以玻璃、碳(石墨)及塑膠纖維三種為主，每一種材質都有其特性，如碳纖維在經聚合物膠合高溫高壓硬化後，可以製造網球拍、自行車架、替代車輛鈹金，正常狀況比鋼強度還高，但易脆性，變成致命缺點。

(二)纖維製程

一般能進入織布機前，必須按抽絲(細長纖維)捻紗(將數股細絲扭旋)成線(捲入環狀線鼓)，織工開始以紡織機(垂直經線與水平緯線構成)，交疊織成布料，原始布料再經染整與揉製程序，使布匹可以裁剪、縫製成衣裳，現代人造纖維也是遵此要領製作。⁹但是石化與礦物纖維製程，在進織造機前與天然纖維絕然不同，它既無天然材質的纖維，本身為結晶體，如何讓塊狀結晶體成為可以織造纖維線，最後可形成輕量、堅固及鋼性強，用於替代金屬，製作航太、車輛、運動用品及軍工使用抗彈防護材料，(如表 2)。

表 2-合成纖維材質比較表

區分 項次	玻璃纖維 (Fiber Glass)	碳纖維 (Carbon Fiber)	塑膠纖維 (Aramid Fiber)
原始材料	矽化硼+玻璃砂	聚丙烯腈基+ 微晶石墨	芳香聚醯胺 (芳綸纖維)
抽絲	熱熔	氧化-碳化-石墨化	熱熔
	噴紗板將纖維注入拉出微米細紗		
捻紗	將微米細絲扭製程纖維紗(絲含量愈高強度愈強)		
織造	同紡織原理(製造密度等於強度)		
軍工用途	1.抗彈防護材料 ¹⁰ 2.透明抗彈玻璃	1.陶瓷裝甲披覆層 2.輕量化鋼鐵鈹件	1.抗彈防護材料 2.陶瓷裝甲披覆層
抗耐性	韌性強、不耐磨	抗高溫，可硬化	韌性強、吸附力高

資料來源：Https://easyatm.com.tw，檢索時間：111.01.26

(三)纖維加工：(如圖 7、8)

1.聚合疊造：

當纖維布出廠時，均為捲裝如同布匹般柔軟，必須以聚合劑(主要為環氧、酚醛及熱因性樹脂三種)，視產品用途，選擇適用聚合劑，如碳纖維大部分使用環氧樹脂，用來製造自行車架，如有購買自行車者，會發現車架價差極大，原因在於織造密度(K=每股 300 條纖維絲)，K 值愈高代表強度愈高，

⁹紡織產業研究所，<<https://www.ttri.org.tw>>new_in，2019 年 1 月 21 日，紡織的原理按捻紗→整經→漿紗→穿綜(經緯紗線穿股整合)→上機→織造→成品胚布，人造合成纖維大致也是按造這個製程纖維原料布，(2022 年 1 月 21 日)。

¹⁰達塑工程股份有限公司，<<https://www.darso.com.tw>>article2...，高強度玻璃纖維(Fiber Reinforced Plastic，以下簡稱，FRP)，抗張力可達 86,000Mpa，可用於軍事工業，(2022 年 2 月 21 日)。

但重量會減輕(強度夠，管材可以變薄)均勻噴塗於裁剪後纖維布上，逐層堆疊，成為纖維製品的初始材料，其他如玻璃與塑膠纖維，也是運用同樣原理，編織密度與疊造層數影響產品成本，通常在製造前會先以「規格」訂定所需密度與層數。

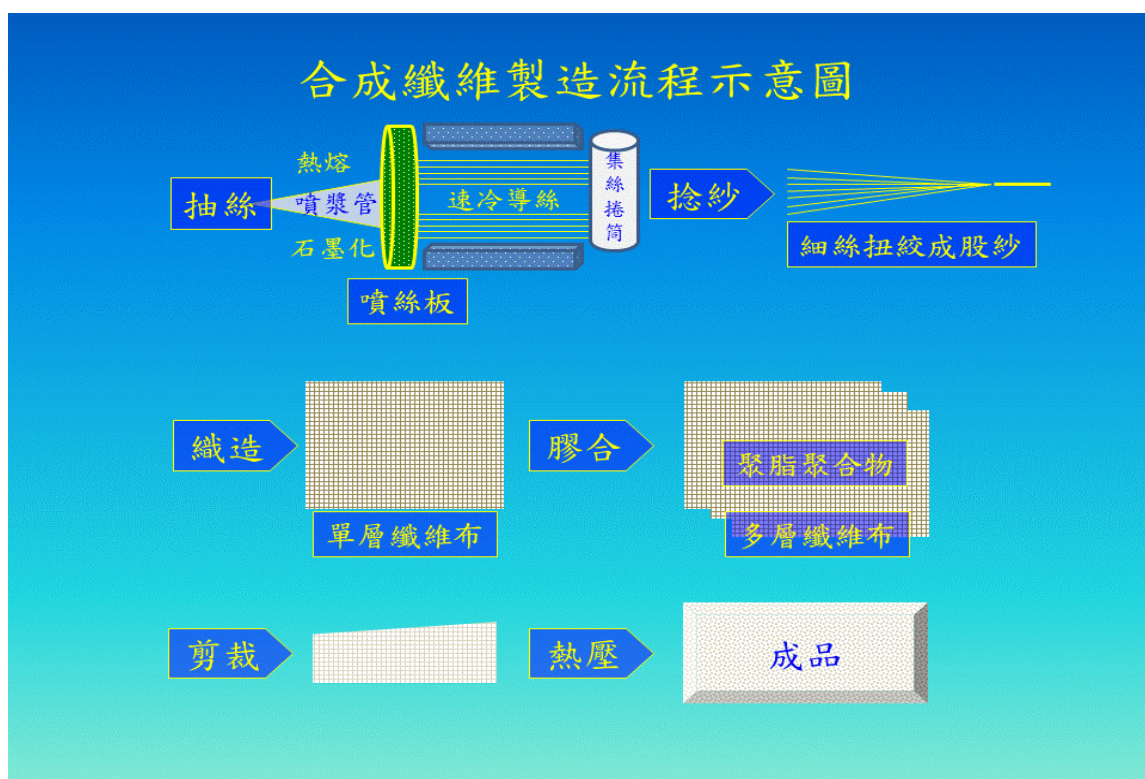
2. 模具塑形：

纖維布料織成後與布匹一樣，柔軟以方形成捲，為達經濟效能，先以最佳排列方式進行裁剪，以達最大利用面積之效，裁剪後初坯重層膠合，接著以各種模具，如製造防護頭盔，抗彈防護板，戰鬥手套、護膝、護肘的關節防護殼等，完成塑形。準備送入熱壓室處理。

3. 熱壓成形：

進熱壓室前，基本可以知道要做的是甚麼，熱處理時間因產品材質與厚度有關，完成熱壓後，纖維材質由柔軟布匹變成堅固、強韌與可進行機械加工的成品，接下來進行修飾(除去殘質)，如防護頭盔需銑孔，加裝各項附件，此時便可下生產線完成產品製作，抗彈纖維材質三大要求「韌性、吸附與抗拉」，因此加工時不一定要作到像碳纖維車架般堅硬，所以抗彈纖維一般會選用玻璃或合成塑膠纖維為主¹¹。

圖 7-合成纖維製造流程示意圖

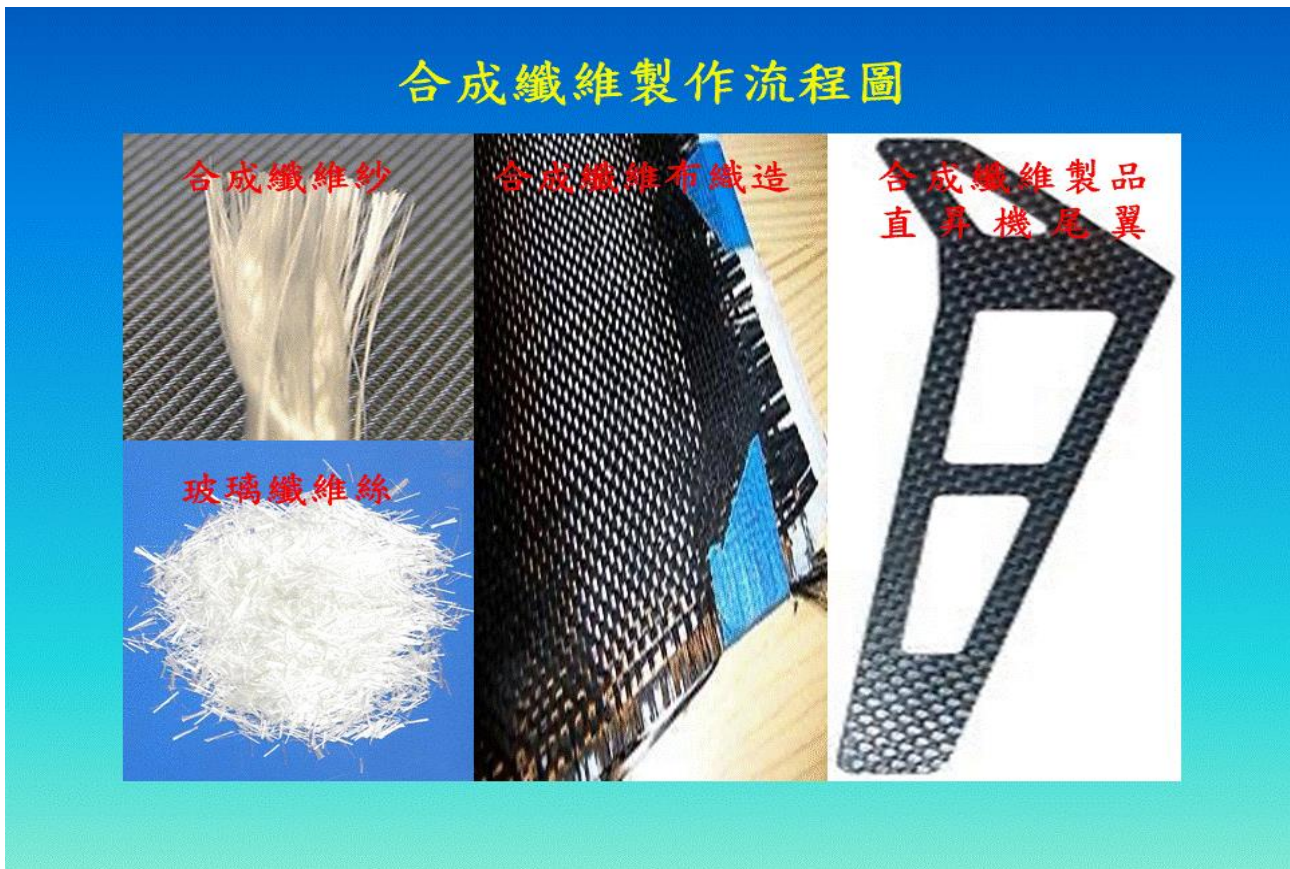


資料來源：筆者整理繪製

¹¹百科知識，合成纖維如何製造?，<<https://www.easyatm.com.tw>>wiki，(2022 年 2 月 16 日)。



圖 8-合成纖維製造流程圖



資料來源：<https://www.easyatm.com.tw>，檢索時間：111 年 2 月 16 日

四、乏鈾層裝甲層(Depleted Uranium Armor,以下簡稱，DUA)

乏鈾(Depleted Uranium, U-238，以下簡稱，DU)存在於天然界中，通常與天然鈾礦石共存，當鈾礦開採後，與金礦一樣，礦石含量純鈾(金)甚少 20 公斤純鈾，需開採 1 萬噸礦石，而每 3-5 公克黃金要 1 噸礦砂，經提煉與萃取才能獲得，而純鈾(U-235)在濃縮成為核電廠核燃料棒(U-235 含量為 3-4%)前要先將乏鈾(U-238)排出，避免衰變鈾吸收中子影響核分裂融合，因此含有微量乏鈾 U-238(佔原礦 0.7%)廢礦石成為「核廢料」與國內發電廠因工作人員防護衣褲與手套產生之核廢不同，因為它無法作為乏鈾材料製造來源。¹²

含有乏鈾 U-238 的核廢料要經加入石墨合成碳架→碳化鈾→電解排除碳架→成為單晶乏鈾骨架→加入鎢鋼及鈦(0.7%)，製成乏鈾合金，¹³此時密

¹²陳洋元、蕭先雄合著，《能源科技與永續經營》，(台北市，台灣電力公司核能發電簡介，2013 年 6 月)，頁 5。

¹³同註 1，純鈦金屬不具備金屬之韌性與強硬需以其他金屬如鋁鋼段造成合金，若再入乏鈾骨架可編成裝甲網層或製造 KE 彈的彈蕊。

度達 19.3g/cm^3 ，重量為鎢鋼的 2.5 倍，若大量使用將使砲塔重量大增(以裝有第 1 代 DU 裝甲的 M1A1HA，重量由 57 增至 61.3 噸，+4.3 噸)，因此乏鈾層據多方考證，以凱夫勒(KEVLAR)纖維編織方式，製造乏鈾合金金屬網層，與其他複材鑲嵌於均質鋼裝甲板內，後續美軍在 M1 戰車陸續增加 DU 裝甲配置，讓 M1 戰車較出廠時已增加 10 噸，外銷型與國軍即將獲得 M1 有無 DU 裝甲層配置，目前尚無資料可考。

貳、複合材料異質整合

一、金屬材質焊接

均質鋼為導電材質一般電弧與氣體焊接均可使用，焊接方式比較，(如表 3)因此做為表裏層的均質鋼裝甲層，必須採取焊接方式，而以常用三種焊接方式，以二氧化碳氣體保護焊接最具效果，它適合厚金屬焊接、不須添加焊料也不會產生焊渣，但須注意焊接裏層時，要將焊接面反置，避免熔解高溫液化金屬滴落，無法達成焊接。¹⁴

表 3-均質鋼焊接方式比較表

區分 項次	手工電弧焊接	自動或半自動 埋弧銲接	二氧化碳 氣體保護焊接
焊劑	焊條填續縫隙	光焊絲埋入縫隙	無，熔接兩側金屬
殘渣性	需後續整治		無
平整度	視焊工技能	半自動較差	毋需再加工
限制	限導電金屬	廠內作業	室外需防風
速度	慢	次之	快
運用範圍	無限制	鋼樑焊接為主	厚金屬焊接為主
選擇優序	3	2	1

資料來源：Https://kknew.cc，檢索時間：111.01.26

二、異質複材膠合

合成纖維單片強度不足，也無法將每股絲線與天然纖維一般粗，因此必須已疊層方式製造，但又無法以金屬方式焊接，必須以聚合物(樹脂)膠合，常用聚合物，(如表 4)。可用於合成纖維堆疊膠合聚合物為環氧及酚醛(Novoiac)樹脂兩種，環氧樹脂適用於碳纖維材質高硬度熱壓成型，而酚醛樹脂則讓合成纖維熱壓塑形，可保持韌性與彈性，在選擇上，可依產品規格需求視當選用。

¹⁴ 痞客邦，〈焊接與切割技術交流部落格〉，〈Https://awei5160.pixnet.net〉post.，二氧化碳(CO₂)氣體保護銲接因無焊料或合金熔絲作為接縫填充劑，在焊接裏層時，需將焊道朝上，由上至下焊接，(2022 年 1 月 26 日)。



表 4-合成纖維聚合物比較表

區分 項次	環氧樹脂	乙烯基酯樹脂	酚醛樹脂
英文	Epoxy	Vinyl Ester	Phenolic
成分	環氧氯丙烷 +雙酚 A	環氧樹脂 +甲基丙烯	酚+甲醛(A) Novoiac(B) 酚+不完全甲醛
用途	通用接著劑 熱固性聚合	防火通道 PVC 管接合	A.一般膠合 B.熱固性膠合
限制	無	不耐高溫	A.紫外線脆化
運用範圍	合成纖維熱固	一般接著劑	A.一般接著劑 B.合成纖維熱塑
選擇優序	視用途	NA	視用途

資料來源：Https://kknew.cc，檢索時間：111.01.26

三、異質材料整合：

複合裝甲以製作三明治作比喻，吐司片(均質鋼)放在下層逐層放入食材(陶瓷與合成纖維板)中間可置入吐司再堆疊食材，在最上層在放一片吐司，參考 M1A2 戰車在砲塔裝甲強化配置，在底盤駕駛正前方、砲塔前方與砲盾等最易被擊中的部位裝設第二代查布漢複合裝甲，外表第 1 層高硬度裝甲板 (High Hardness Armor, 以下簡稱, HHA)，第 2 層高硬度陶瓷(HCA)，¹⁵第 3 層網狀的乏鈾合金裝甲(DUA)，第四層滾軋均質鋼板裝甲 (RHA)，第 5 層內部加裝凱夫勒(KEVLAR)內襯，查布漢裝甲複合裝甲製程，其步驟如下。

(一)切割鈹件：

完成砲塔外形設計，在分割成組部件，可視製作彎曲與折線角度，裁切均質鋼板作成外、裏層裝甲板，此時鈹件均為獨立。

(二)複材膠合：

製作複材結合所需模具與夾具，先將鋼板置入模具固定，但須注意樁接方向(區分凸樁「複材超出均質鋼」與凹接「預留凸樁接合空間」，將複材層噴塗聚合樹脂，再用夾具密合，進入熱壓箱室，完成膠合緊定，完成冷卻脫模待各組片完成前述程序，備便焊接。

¹⁵ 同註 1，頁 100，高硬度陶瓷，無法彎曲加工，現在複材裝甲均採平面焊接，現主力戰車也多採此一方式製造砲塔，一改過去圓弧型設計。

(三) 鈹件焊接：(需律定加工焊接順序)

1. 外層以凸樺對正凹接，以焊接機(二氧化碳為首選)，將接縫焊實，逐片焊接完畢組成砲塔。
2. 裏層焊接，將外層完成焊接砲塔反轉進行焊接，注意由上向下焊接，避免滿融化鋼水滴落，導致焊縫出現殘渣及氣泡，如選用埋弧銲接，在處理裡層焊接，相較於氣弧銲接，有施工較易之效，惟裡層鋼板接續需預留光焊絲埋入所需空間，焊接完成後需經天然冷卻及進行X光檢驗焊接縫道狀況，合格進入附屬設備裝配。

參、其它裝甲防護方式(如圖 9)

一、反應式裝甲：

即以炸藥包置於金屬箱內，以附掛方式貼於戰車強化防護部位，主要為防止遭錐孔裝藥(HEAT)彈攻擊，立即引爆將噴流炸飛，對於反裝甲飛彈與火箭或戰車砲發射之高爆戰防榴彈有效。

二、中空式裝甲：

近來利用此方式為箭簇式裝甲裝置於砲盾兩側或於砲塔外層，再加上抗彈層與之保持一定距離，也是防制 HEAT 彈；履帶側裙與底盤之間保有一定距離，也可視為中空裝甲運用之一。

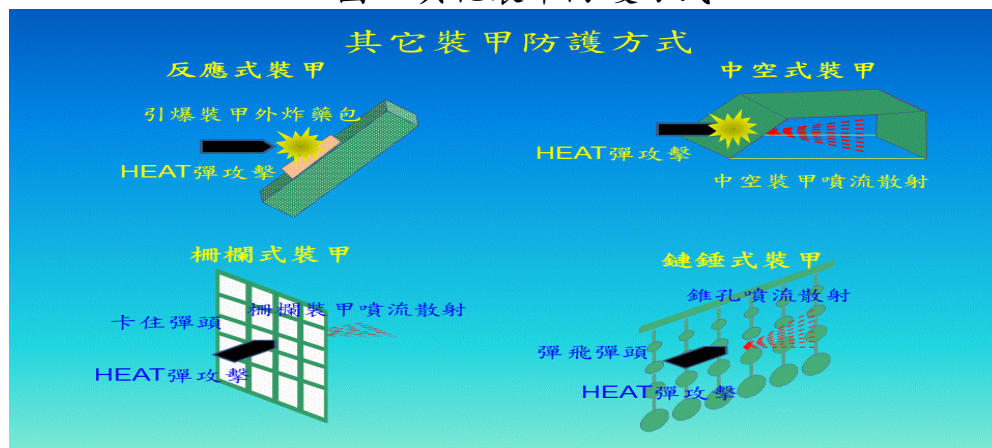
三、柵欄式裝甲：

美軍戲稱為「鳥籠」，對於低速反甲飛彈與火箭具備「卡住彈頭」及分散噴流功能，此一裝置較為廉價，目前採用為美軍史崔克裝甲車。

四、鏈鋸式裝甲：

目前僅以色列採用，用以保護砲塔尾桁，在置物籃下方裝設類珠簾的鋼製鍊鋸球，行進間藉由鏈鋸擺動將來襲砲彈彈飛，靜止間也具備柵欄式與中空裝甲功能，經實戰經驗有其防護功效。

圖 9-其他裝甲防護方式



資料來源：筆者整理繪製



肆、複合裝甲可行方案研究

一、多項異質整合

(一)抗彈鋼板外裏層：

現今冶金技術與複合材料再進步，也只能用於砲塔及引擎蓋板及車底(加裝)防護，戰車底盤仍是以均質鋼材製作，因為它需承受砲塔重量、銃孔以鎖上避震與傳動機構，迄今各戰車製造國均採相同作法，將防護複材用以製造砲塔，因此複合材料表裏層均質鋼如何取得適當比例，以過去戰車製造經驗，砲塔佔全車重不得超過 2/5(總重 40%)最為理想，過重砲塔將使戰車配重失衡，有翻車之虞，以 M1A2-SEPV2 全車重為 64.3 公噸，砲塔(25 噸，約佔 38.8%)，後續構改再增加設備將使砲塔重量再上升，若以 5 片方形均質鎢鋼(高 x150、長 x80、寬 x22，單位為公分，每片重量為 2.3 噸)製作砲塔，在長、高不變狀況下，比較(如表 5)。

表 5-均質鋼抗彈層防護力與重量表較表

項次 \ 寬度	22CM	44CM	66CM	88CM
重量(噸)	11.5	23	33.5	45
抗彈性 ¹⁶	220MM	440MM	660MM	880MM
武器	30MM 穿甲彈/ RGP 火箭彈	105MM 穿甲彈	120MM 穿甲彈	152MM 反甲飛彈
砲塔內空間	26.4M ³	15.8 M ³	5.4 M ³	N/A
理想厚度	1.表層均質鋼 150mm±10(135-165mm) 2.裏層均質鋼 50mm±5(47.5-52.5mm) 3.複材層 70mm±10(60-80mm) 4.防護裝甲厚度 270(242-297mm)			
備註	總厚度不超過 300mm，±值由抗彈防材質防護係數酌予增減 若以全均值鋼製作，重量約 18 噸(不含設備)。			

資料來源：筆者整理製作

(二)複合材料疊交層

1.M1 複材裝甲：

由陶瓷裝甲、合成纖維及乏鈾網層堆疊而成，各層均有其用途，也會有不同層疊安排順序，典型複合裝甲均質鋼-陶瓷裝甲-乏鈾網層-合成纖維-均質鋼，在乏鈾網層獲得不易狀況下，本層決定複合裝甲強度(乏鈾的高密度、堅硬度及抗高溫)，不讓動(熱)能彈侵澈穿透。複材裏層在乏鈾網狀層幾乎

¹⁶ 同註 3。

不可能獲得狀況下，僅剩陶瓷，玻璃纖維及塑化纖維可選，其防護力差別，以第 1、2 代 M1 複合裝甲比較表(如表 6)

表 6-第 1、2 代 M1 複合裝甲比較表

區分 內容	第 1 代柏林頓複合裝甲 (Burlington Armor)	第 2 代查布漢複合裝甲 (Chobham Armor)
第 1 層	高硬度裝甲板(HHA)	高硬度裝甲板(HHA)
第 2 層	陶瓷裝甲	陶瓷裝甲
第 3 層	滾軋均質鋼裝甲 (RHA)	乏鈾合金裝甲網層
第 4 層	內襯裝甲(玻璃纖維)	滾軋均質鋼裝甲 (RHA)
第 5 層	N/A	內襯裝甲凱夫勒(KEVLAR)
抗 HEAT	700mm	1,320-1,620mm
抗 KE	350mm	940-960mm
重量	輕	重(乏鈾密度為 19.3g/cm ³)
相較 RHA	相等	增加約 1.9-2.3 倍

2.T-64 複材裝甲：(如圖 10)

若以 1966 年前蘇聯產製第一代複合裝甲中戰車 T-64，以外以 120mm 鑄造鋼裝甲中嵌 150mm 玻璃纖維內襯 40mm 鑄造鋼裝甲(總厚度為 310mm)，抗彈性，HEAT 為 900mm，KE 則為 450mm(對外公布數據)，其中纖維複材(密度為 2.6g/cm³)佔 48.3%，砲塔重量相較於全鋼製減輕 32.5%，抗彈力相較 RHA 則增加 1.45-2.9 倍(KE 及 HEAT)。

圖 10-蘇聯 T-64 戰車



資料來源：<https://zh.m.wikipedia.org.tw>，檢索時間：111 年 2 月 16 日



二、桁架覆片結合：

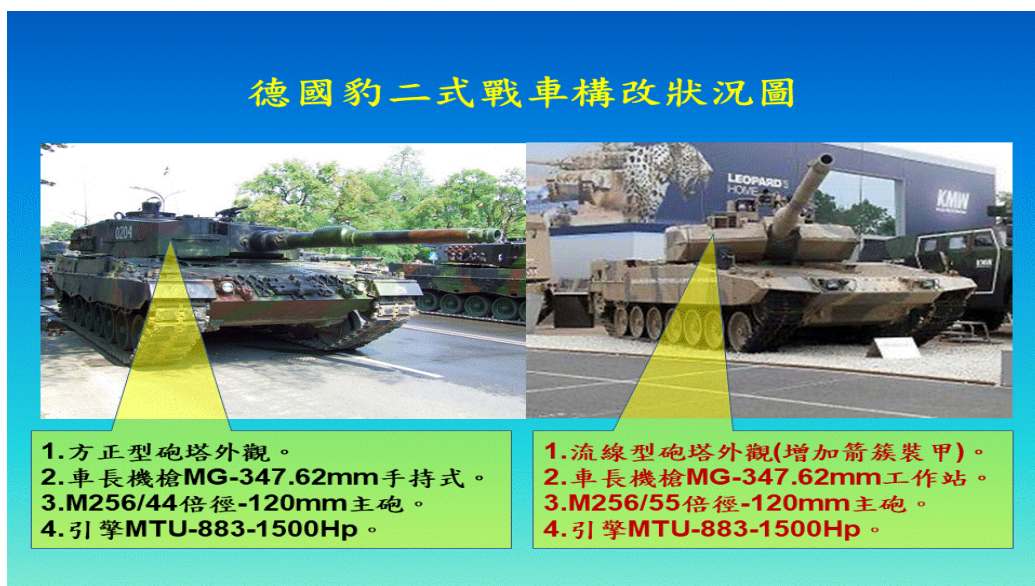
使用此一技術為以色列梅卡瓦(Merkava)Mk4 主力戰車砲塔(如圖 11)，飛碟近圓盤型砲塔構型同樣使用複合裝甲，不同於其他複合裝甲鑲嵌、組合與焊接方式，第IV代梅卡瓦的砲塔，一改前面 I-III 型設計，再原有砲塔式外完成碟型桁架焊接(並以短支柱與原砲塔保持中空狀態)再以覆瓦疊片以3層(每層保持 20° 斜角)拼接固定於桁架之上，改裝後的砲塔加上砲盾前方加裝的箭簇裝甲，並將引擎全數換裝為 MTU-883-ka501 柴油液冷引擎，輸出馬力為 1,500HP，並改良其獨立複輪彈簧避震系統，此一方式，為各國採用，如德製豹 2-A7，改裝後的不見方正外觀，(如圖 12)。

圖 11-梅卡瓦戰車構改演進圖



資料來源：<https://zh.m.wikipedia.org.tw>，檢索時間：111 年 2 月 16 日

圖 12-豹二式戰車構改演進圖



資料來源：<https://zh.m.wikipedia.org.tw>，檢索時間：111 年 2 月 16 日

三、複材整合方案：

綜上述，抗彈能力最強為乏鈾金屬網層，藉由高密度之強硬與抗張性，可阻止各型穿甲彈貫穿，然此一材層極不易獲得，也因為微量放射性致引發警議，若以國內產置能量及外購材料之可行性，從外層高硬度鋼板(HHA)裡層陶瓷裝甲(CA)、玻璃纖維(GF)及均質鋼(RHA)與內襯合成纖維(SFA)相關國內均可獲得若依此作一排列順序，在厚度不超過 300mm(以 M60A3 為例底盤駕駛斜面裝甲厚度 260mm，砲塔最厚為 240mm)前提下，複合裝甲也不可能遍及全車，可行的組合比較，(如表 7)。

表 7-複合裝甲材質層組合比較表

區分 內容		甲案	乙案	丙案	丁案
外層(150mm)		高硬鋼	高硬鋼	高硬鋼	高硬鋼
裡層 (100-120mm)	1	陶瓷裝甲(30mm)			
	2	玻璃(合成)纖維(40mm)			
	3	高硬鋼	均質鋼	合成纖維	陶瓷裝甲
				含鈦合金砌箱	
		50mm		30mm	
內襯層 (30-50mm)		合成纖維 (30mm)		均質鋼 (50mm)	
比較		3	4	2	1
理由		1.丁案組合為高硬鋼-陶瓷裝甲-玻璃纖維-陶瓷裝甲-均質鋼 5 層構成複合裝甲,抗 HEAT 及 KE 彈應可達 850-1,000mm 之間,此數值僅為推估。 2.外層高硬度抗彈鋼板,提供小口徑槍砲射擊及破片傷害。 3.裡層採用雙陶瓷層夾嵌玻璃(合成)纖維,具備抗熔穿及鑿穿雙重能力。 4.內襯層採均質鋼,便於砲塔式內部機構銑孔與裝配。			

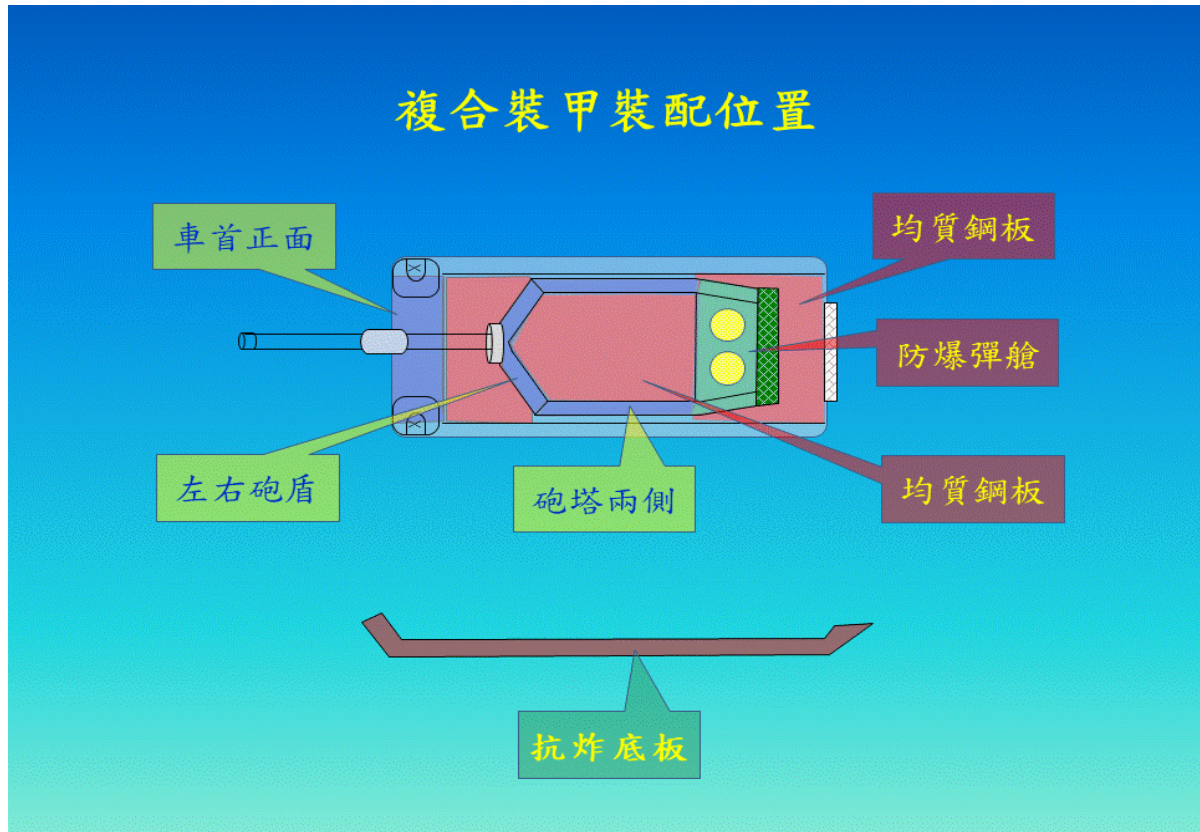
資料來源：筆者整理製作

上述的組合方案，基於筆者個人研究，所得結論並不代表可行方案，因為每一種組合變化，必須經科學化驗測與反覆比較，才能得到真正可行方案，如美軍使用功夫龍作為最裡層防護裝甲層，因此一作法，當 HEAT 穿透時會因燒穿導致其他裝甲層材質的崩毀，形成與高速噴流推進(如同霰彈一般)當進入砲塔室，會造成戰車成員傷亡，所以美方選擇室功夫龍，他能吸附非噴



流材料微粒進入砲塔室，同時也讓噴流再降溫及減量入侵，¹⁷若結合戰車自動滅火系統，將能瞬間抵擋噴流推進，保護人員及裝備安全，在國內啟動相關科研之後，最重要是整合與實測，找出最佳方案，以符本軍實需，複材配置，(如圖 13)。

圖 13-複合裝甲裝配位置圖



資料來源：筆者整理繪製

結語

戰車裝甲防護力，在進入第 3 世代以後，各國均採複合材料製作裝甲板，強化易遭攻擊部位抗彈能力，同時也使戰車重量減輕，以獲得較佳機動性，如同古時全鎧甲重騎兵，雖然具備高防護力與殺傷力，但戰馬受不了重量負荷，僅適合短時間衝鋒作戰，同樣早期海軍陸戰隊引進試行戰鬥個裝，士兵穿戴上身加上武器、彈藥及戰鬥背包已達 36 公斤，改良版國產戰鬥個裝大量使用複合材料，使重量可以降至 20 公斤內，使士兵戰鬥持續力得以加長，同樣的日本最新 10 式戰車，(如圖 14)也使用大量複材製作，將戰鬥車重降至 40 噸，雖然使用 1,200HP 引擎，但它的推重比是接近 30HP/噸，是目前主力戰車最高，也使本型戰車可適用於日本各島嶼多山丘陵地形，國內雖在裝甲複材研發起步較晚，但各種複合基材製造廠商，已具備充分能量，如高硬度鋼材、精密工業陶瓷、

¹⁷ 同註 1，頁 97。

合成(玻璃及碳)纖維製造，從早期供應全球碳纖維網球拍、近年來碳纖維單車、高強度鋼架及鈦合金車架製造均有相當潛能，後續透過產、官、學整合，製造未來國造戰車所需複合材料裝甲板，本軍開出規格需求，邀集協力廠商，軍備部門整合各種不同組成方案，在經實彈驗測，找出最佳裝甲複材組合方式，使國造裝備具備更佳防護力，作戰中保護人員及裝備安全，發揮持續戰力，確保防衛作戰任務之達成。

圖 14-日本 10 式戰車



資料來源：[https://zh.m.wikipedia.org. tw](https://zh.m.wikipedia.org.tw)，檢索時間：110 年 12 月 16 日



參考文獻

1.專書：

- [1]、獨島刀也。《地表最強戰車!M1 艾布蘭戰車徹底追蹤》。(新北市，瑞昇文化事業股份有限公司，2011 年 10 月)。
- [2]、陳洋元、蕭先雄合著。《能源科技與永續經營》。(台北市，台灣電力公司核能發電簡介，2013 年 6 月)。
- [3]、李思平/黃竣民合著。《戰車部署 2020》。(台北市，尖端科技軍事雜誌社，2020 年 1 月)。
- [4]、李思平。《戰車部署》。(台北市，尖端科技軍事雜誌社，2018 年 9 月)。

2.網際網路：

- [1]、閑眠草堂編。< [Http://muohsien.pixnet.net](http://muohsien.pixnet.net)>item-china。2008 年 5 月 28 日。中國十大名劍。
- [2]、陳憲政。< [Http://www.xuite.net.tw](http://www.xuite.net.tw)>awscwis>。2017 年 7 月 31 日。鑄造與焊接成形鋼鐵強度比較說明。
- [3]、Pelle，<[Http://mag.addmaker.tw](http://mag.addmaker.tw)>金屬樺接。2020 年 2 月 17 日。金屬樺接精度為 1/1000 英吋(0.025mm)。
- [4]、泰興應用材料。[Http://www.taimax-materials.com.tw](http://www.taimax-materials.com.tw)>product-02。2021 年 12 月 15 日。精密陶瓷胚成分。
- [5]、紡織產業研究所。<<https://www.ttri.org.tw>>new_in，2019 年 1 月 21 日。紡織的原理。
- [6]、達塑工程股份有限公司。<<https://www.darso.com.tw>>article2...。高強度玻璃纖維(Fiber Reinforced Plastic,以下簡稱，FRP)。
- [7]、百科知識。<<https://www.easyatm.com.tw>>wiki，合成纖維如何製造？。
- [8]、痞客邦。<焊接與切割技術交流部落格>。
<[Https://awei5160.pixnet.net](https://awei5160.pixnet.net)>post。二氧化碳(CO₂)氣體保護銲接。
- [9]、維基百科。<<https://zh.m.wikipedia.org.tw>>，T-64、梅卡瓦、豹二及 10 式戰車。

筆者簡介



姓名：黃譯模

級職：少校研究教官

學歷：陸軍官校 98 年班、裝甲兵學校正規班 130 期、陸院 110 年班

經歷：現任陸軍裝訓部作發室少校研究教官

電子信箱：a110109@wedmail.mil.tw