

爆炸成形彈(EFPs)的恐怖威脅

孟憲輝

中央警察大學鑑識科學學系教授

摘要：本文探討在戰爭地區常遭恐怖份子使用的爆炸成形彈，由於爆炸成形彈起源於成型裝藥，故本文先探討成型裝藥之基本原理，敘述其聚能效應之穿甲機制，並介紹影響成型裝藥效能之各種因素。接著簡介爆炸成形彈(EFP)之形成原理，分析各種不同 EFP 的產生機制，並探討影響 EFP 毀傷效能之因素，對一次可產生多數彈體之多爆炸成形彈(MEFP)亦加以介紹。由於成型裝藥和爆炸成形彈需要精密之製造工藝及不易取得之材料，本文認為爆炸成形彈成為大規模恐怖威脅之可能性甚低；但由國家級軍事行動或他國支持之反叛行動使用爆炸成形彈，對受裝甲保護之武裝部隊或重要人物之攻擊，其發生可能性則較高。但因爆炸成形彈含有極易被現行隱藏爆炸物檢測設備檢知之成分，只要嚴格執行安全檢查措施，對重要人物之恐怖威脅應可排除。

關鍵詞：恐怖分子，成型裝藥，爆炸成形彈，土製炸彈。

綱要

- 一、前言
- 二、成型裝藥
- 三、爆炸成形彈
- 四、結論

一、前言

根據 CBS/AP 於 2007 年 2 月 11 日之報導，美國軍方官員指控伊朗最高級領導人物下令給予伊拉克 Shitte 民兵複雜的路邊穿甲炸彈，共造成了 170 名美軍死亡；此種美國軍方所稱由伊朗提供至伊拉克的致命性武器稱為爆炸成形彈(explosively formed penetrators, EFP)，又稱自鍛破片(self forging fragments)。由於路旁土製炸彈(improvised explosive devices, IED)是造成在伊拉克的美軍和聯軍傷亡的主要原因，且大部分人對 EFP 的構造、使用方式和終端彈道破壞機制並不瞭解，故造成對 EFP 的高度疑慮，唯恐其成為恐怖份子的新式毀滅性武器。加上 EFP 確曾被用為 IED 攻擊，如 1989 年被用於暗殺德國銀行家 Alfred Herrhausen，2006 年之以色列和黎巴嫩衝突中 EFP 也曾被使用，故一般人對 EFP 之疑慮並非無的放矢。由於所需零件極易取得，一般的 IED 便宜易製又具高度殺傷效果，使用時可依賴詭雷、定時、延時或遙控裝置引爆，不需瞄準即殺傷

使特定範圍內之人員。相對地 EFP 的構造較為精密複雜不易製造，使用時必須瞄準目標發射或確定目標之路徑才能發揮作用，終端彈道以穿透裝甲、殺傷受裝甲保護之戰鬥武力為目的，對非裝甲的軟標靶效果有限。因此，EFP 對使用裝甲運輸工具的武裝部隊或特定重要人物之威脅較大，對一般民眾或公共場所的恐怖威脅並不如想像的巨大。恐怖份子之 EFP 來源以軍規炸彈或砲彈為多，自製 EFP 時一般使用現成之金屬管內裝高爆藥，炸藥前端以銅製凹版或鋼製盤狀薄片覆蓋形成聚能裝藥之藥型罩，爆炸時爆轟波將金屬藥型罩射出成 EFP。使用時常裝置於裝甲車輛行駛路線瓶頸處之路旁，俟目標車輛減速通過時，操作者以線控、無線電波遙控制或被動式紅外線觸動之方式引爆。為確定能擊中目標，恐怖份子常於同一處所裝設多個 EFP 發射裝置。

為增進對 EFP 的認識，灌輸正確的防護觀念，以下將從 EFP 的起源成型裝藥(shaped charge)起，就 EFP 的發展沿革、構造原理和彈道效應作一介紹。

二、成型裝藥

爆炸成形彈之起源為成型裝藥，其形成機制和基本結構都和成型裝藥極為類似，瞭解 EFP 前需先探討成型裝藥。成型裝藥又稱空穴裝藥或聚能裝藥，傳統的成型裝藥是一個一端具有錐形凹槽，由另一端引爆的柱形裝藥。利用凹槽的聚能效應(Munroe effect)，成型裝藥於爆炸時可在凹槽端將爆炸產物的能量聚集，產生高速射流，有效射穿厚度為裝藥直徑數倍的裝甲。聚能效應是由 Munroe 於 19 世紀 80 年代所發現，當時他在美國羅德島的海軍魚雷基地工作，發現一塊壓印有製造廠名字的炸藥緊靠金屬板爆炸時，可將製造廠名刻印到金屬板上，若炸藥上的文字是凸出的，金屬板上的刻印文字也會凸出。20 世紀初期德國的 Neumann 也發現如果炸藥上有錐形凹槽，平時只能將金屬板炸凹的炸藥便能在金屬板上射穿一個洞。起初這種效應並未被應用到軍事用途，二次世界大戰前期發現在凹槽上襯以薄金屬藥型罩時，可大幅增強穿甲威力，乃使聚能效應得到廣泛的應用。

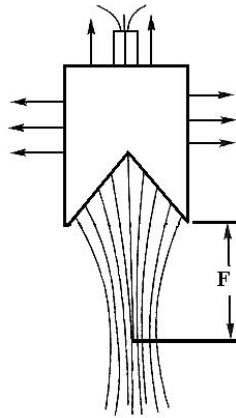
(一) 成型裝藥穿甲原理

成型裝藥之所以能射穿裝甲起因於聚能效應所產生之射流，爆炸時產生的高溫高壓產物迅速壓垮裝藥之金屬藥型罩，使金屬在裝藥軸線上聚集合併成能量密度極高之射流，從而侵徹並穿透裝甲。其對裝甲材料之瓦解是藉助高速金屬射流在標靶相當小的面積上沈積大量的動能而達成的，高速碰撞時射流和裝甲間產生很高的壓力，致使應力超過材料的屈服強度。在此過程裝甲金屬材料的塑性流動導致很深的穿孔，侵徹過程中裝甲上的孔洞深度不斷增加，直到射流消耗殆盡或裝甲被貫穿為止。

1. 聚能效應

一定形狀的炸藥裝藥爆炸時，產生之高溫高壓產物會沿著炸藥表面之法線向外飛散，因而在不同方向上的炸藥爆炸能量也不相同。當裝藥有了凹槽後，凹槽部分的爆炸產物沿著凹槽表面的法線飛散而向凹槽中心的軸線聚集，形成一股高壓、高速、高密度，

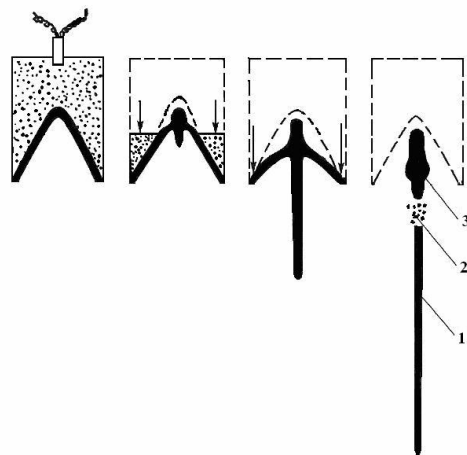
且截面積小、能量密度大的氣體流，如圖一所示。此氣體流直徑最小處之能量密度最大，該斷面可稱為焦點，焦點至凹槽底端面即為焦距 F 。適當提高炸藥至靶板之距離，使焦距正對準靶板可獲得最佳之穿透效果，所提高之距離稱為炸高。若於凹槽內襯以金屬藥型罩，匯集之爆炸產物壓垮藥型罩形成能量密度更高的金屬射流，更增加其穿甲能力。當炸藥具有一定炸高時，金屬射流進一步拉長，而在靶板造成更深的穿孔。



圖一 成型裝藥凹槽處爆炸產物聚集之情形

2. 金屬射流之形成

具金屬藥型罩的成型裝藥爆炸後，當爆轟波傳至藥型罩頂部時，爆炸產物以極高之壓力作用於藥型罩頂部，使其高速壓垮變形而隨爆轟波向前傳遞，此種變形從罩頂部到底部依序發生，金屬罩之壓垮速度高達 $1000-3500 \text{ m/s}$ ，此時藥型罩金屬系沿著罩面法線方向做塑性流動，聚集後在軸線方向快速運動。壓垮過程中聚集速度較快之金屬形成射流，較慢者則落後而形成杵體，射流頭部速度可達 $7000-10000 \text{ m/s}$ ，杵體速度約 $500-1000 \text{ m/s}$ ，金屬射流之形成情形如圖二所示。射流之頭部速度較快，尾部速度較慢，隨著前進距離增加，射流逐漸拉長而增加其侵徹力。但距離過長時射流被拉斷，形成細小微粒，反而降低侵徹力，因此成型裝藥存在著一個最佳炸高。射流部分是由藥型罩之內表面形成，佔藥型罩質量之 $10\%-30\%$ ，杵體則由藥型罩之外表面形成。



圖二 金屬射流之形成，1-射流、2-碎片、3-杵體。

3.穿甲作用

雖然金屬射流之質量不大，但射速很高、動能很大，侵徹甲板之能力強。射流頭部撞擊甲板時，碰撞點的高壓和衝擊波超過靶板表面之強度極限而造成崩裂，使靶板和射流的殘渣飛濺，在靶板上形成一個高壓、高溫、高應變率的區域和淺坑。接著射流在此區域開始侵徹穿孔，隨著穿孔加深，射流速度逐漸降低，靶板強度抵抗射流穿孔之作用趨於明顯，射流擴孔能力變弱，後續射流無法推開前方能量釋盡之射流和靶板殘渣，不能作用於靶板而是作用於殘渣上，加上射流逐漸斷裂或擴散，射速降低至侵徹臨界速度之下，射流無法繼續穿孔，只是堆積在坑底，穿甲過程於是結束。若射流在射速降低至侵徹臨界速度之前貫穿裝甲，則穿甲成功。杵體速度較低，並不起穿甲作用，但若能穿入裝甲內，則對人員有殺傷作用。

(二) 影響穿甲效能之因素

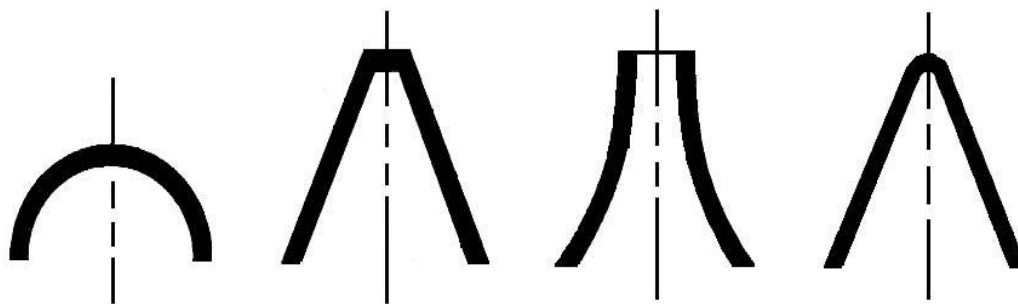
1.裝藥

炸藥之裝藥是影響成型裝藥穿甲效能之首要因素，爆轟壓力大之炸藥穿甲能力強，爆轟壓力又受炸藥爆速和密度之影響，欲獲得較高之爆壓需增加炸藥之爆速和密度。增加裝藥直徑也可提高穿甲能力，但受限於砲管口徑之限制，裝藥直徑有其極限。裝藥長度對穿甲深度也有正面功效，但長度超過裝藥直徑 3 倍時，破甲能力達到高原期而不再增加。裝藥的對稱性和均勻性也很重要，裝藥偏斜或不均勻均可使射流偏離軸線，迅速擴散、斷裂而喪失穿甲能力。

2.藥型罩

藥型罩的形狀、錐角、材料、厚度和加工品質都對穿甲能力有影響。常見的藥型罩形狀如圖三所示，由左至右依序為半球形、截錐形、喇叭形和圓錐形，其中喇叭形所形成之射流射速最高，半球形最低，其餘兩者介乎中間。但喇叭形藥型罩製造工藝難度高，一般多使用圓錐形。圓錐形藥型罩的錐角對穿甲效能也有影響，錐角小，則射流射速大、穿甲深，但穿孔直徑小，射流之後效作用差，穿甲穩定性不佳；錐角大則反之。一般而言錐角在 35°-60°之間為佳，中小口徑穿甲彈頭以 35°-44°為宜，中大口徑穿甲彈頭以 44°-60°為宜。

藥型罩的材料以密度大、塑性好、溶點沸點高之材料為佳，此等特性可使射流連續不斷裂地增長，並獲得較高動能而增加穿孔深度。常見材料中以銅最佳；鋁雖延性好，但密度低，溶點低，故非最理想材料；鉛雖密度高，但溶點沸點均低，射流容易氣化，故穿甲效果不佳。藥型罩之厚度隨材料密度減小而增大，隨錐角、裝藥直徑和外殼厚度之增加而加厚。使用頂部薄、底部厚之藥型罩，可使射流頭部速度加快，尾部減慢，增加射流速度梯度，拉長射流，增加穿孔能力。



圖三 常見的藥型罩形狀，左至右依序為半球形、截錐形、喇叭形和圓錐形。

3.炸高

炸高增加可拉長射流，增加穿甲深度，但也同時使射流產生徑向擴散、擺動和斷裂，降低穿甲能力，故每一成型裝藥均有一最佳炸高可獲得最大穿甲深度。

4.隔板

在炸藥裝藥中介於藥型罩和起爆點間加裝惰性之隔板，可改變爆轟波在裝藥中之傳播方向，使爆轟波以更接近直角之角度擠壓藥型罩，增加作用於藥型罩之初始壓力，加大射流射速，提高穿甲能力。常用之隔板材料為塑膠，其音速低，隔離爆轟波效果良好，且強度佳。也有使用爆速低之炸藥做成活性隔板者，可提高爆轟波之傳播穩定性。隔板之直徑隨錐角曾大而增大，錐角小於 40° 時不需隔板。使用隔板時，其直徑以不小於裝藥直徑之一半為宜。

5.標靶

標靶的材料和結構對穿甲效能有顯著之影響，材料之密度和強度提高時，穿甲深度減小。當靶板形成傾斜角時，容易造成跳彈，而不利於穿甲。層與層間有間隔之多層靶板，比同樣厚度之單層靶板更能抵抗聚能穿甲效應。由鋼材與非金屬材料組成之複合裝甲，可使射流彎曲而失去穩定，降低穿甲能力。在兩層裝甲間夾有炸藥之反應裝甲(active armor)，於射流頭部穿過第一層裝甲時引爆炸藥，破壞射流結構，使產生橫向流動，降低射流穿甲效能。

三、爆炸成形彈

成型裝藥穿甲彈形成之射流和杵體因為速度梯度很大，隨著射出距離增加即被拉長斷裂，甚至擴散碎裂而失去穿甲能力，因此存在著最佳炸高的問題。若將聚能裝藥的藥型罩之錐角加大，或改用球形、雙曲線形藥型罩，則藥型罩受爆轟波作用而遭壓垮時並不形成射流，而是擠壓、翻轉和閉合形成高速穿甲彈體，此一彈體即是爆炸成形彈(EFP)，其彈體無射流與杵體之區分，整個質量用於用於侵徹標靶，且不易因射出距離之增加而喪失速度，有效穿甲距離較長。此外，其質量大且外形粗短，反應裝甲裝藥之爆炸對其影響較小，可克服反應裝甲之反制而順利穿透裝甲。爆炸成形彈撞擊裝甲時尚

可形成壓縮應力波，傳遞至裝甲背面後反射波與後續壓縮應力波重疊而形成拉張應力波，導致裝甲背面形成崩落碎片(spalling)，增加殺傷作用。爆炸成形彈穿透裝甲後，70%以上之彈丸質量穿過裝甲，後效作用顯著，整體而言較射流有更大之殺傷能力。但其缺點是，由於其射速遠低於射流，其穿甲深度僅約與裝藥直徑相等，不若聚能射流可穿透達裝藥直徑 6 倍以上厚度之裝甲。EFP 在正規軍事用途可為由人員操作之反裝甲飛彈，或感應引爆之反裝甲地雷，均以裝甲車輛為主要目標。

(一) 形成原理

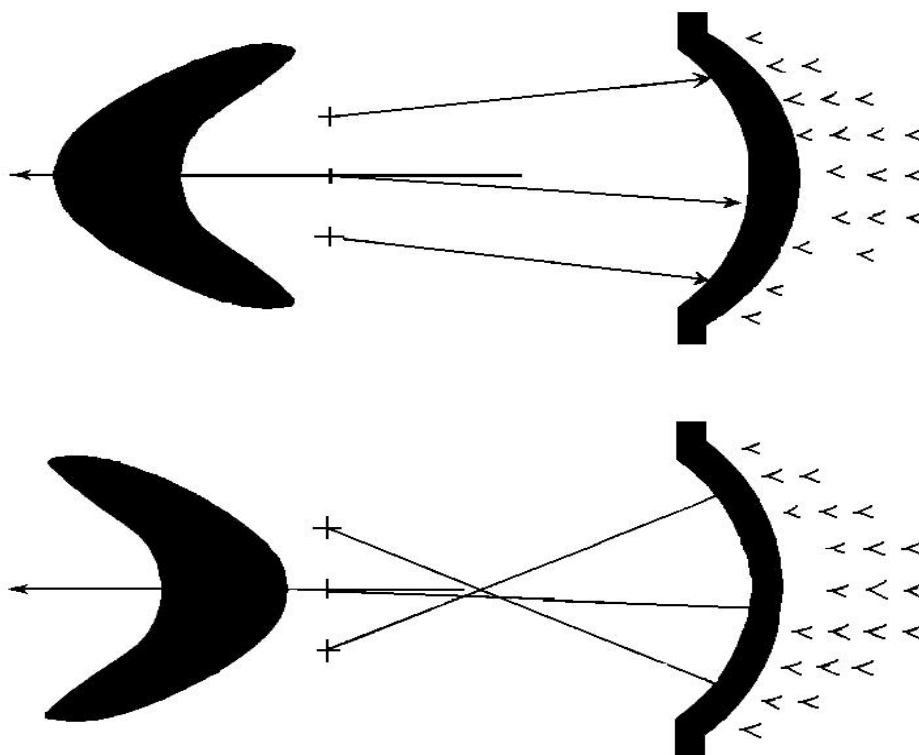
爆炸成形彈依其形成過程之差異可分為翻轉彈和杵體彈兩類。成型裝藥爆炸時，爆轟波壓垮藥型罩形成不分射流和杵體之整體彈丸者，即為杵體彈。爆轟波未將藥型罩壓垮，而將其翻轉、閉合形成彈丸者即為翻轉彈，依翻轉程度又可分為碟形翻轉彈和柱形翻轉彈。翻轉彈之速度最高可達 3500 m/s，杵體彈速度在 2000- 3000m/s 之間，其中柱形翻轉彈和杵體彈之外形較相似，碟形翻轉彈之氣體動力外形較佳。有些翻轉彈甚至可在尾端形成類似尾翼之外翻，賦予 EFP 飛行時之尾翼穩定作用，增加有效射程和精準度，其例子如圖四所示。



圖四 具尾翼穩定之 EFP (圖片來源：DRDC Suffield Website)

1. 藥型罩翻轉

翻轉彈是最常見的爆炸成形彈，成型裝藥爆炸時在爆轟波之作用下，藥型罩經過翻轉、壓縮和拉伸而形成翻轉彈。其中之關鍵步驟為翻轉，圓錐形藥型罩之翻轉與材料和錐角有關，錐角大於 150°之藥型罩均可形成翻轉彈，低碳鋼藥型罩於 130°之錐角即可形成翻轉彈。當錐角很大之狀況下，爆轟波傳遞至藥型罩表面時，靠中心軸線之罩頂部先被壓垮，以較高之速度前進，由中心向外直徑越大之部分壓垮向前之速度越慢，藥型罩乃翻轉並逐漸向徑向收縮，並因速度梯度而造成軸向拉長而形成彈體。改變藥型罩之厚度可改變翻轉彈體之外型，當藥型罩邊緣薄、中心厚時，藥型罩形成後翻(rearward folding)之成形彈；當藥型罩邊緣厚、中心薄時，藥型罩則形成前翻(forward folding)之成形彈，如圖五所示。



圖五 不同厚度藥型罩(右)形成不同形狀之翻轉彈(左)，上為後翻轉，下為前翻轉

2. 藥型罩壓垮

此種成形彈之藥型罩壓垮過程與一般之聚能裝藥相似，但壓垮時藥型罩原應形成杵體的部分與原應形成射流之部分結合在一起，形成單一杵體彈。此種特殊過程藉由特殊形狀和壁厚變化率的藥型罩來達成，使藥型罩底部得到之軸向速度略大於頂部外表面之軸向速度，頂部內表面形成之射流需能充滿頂部閉合後在中心部分留下之空間，並具備必要之速度梯度，使杵體延長至適當的長度。

(二) 影響 EFP 形成之因素

1. 藥型罩

藥型罩形狀對形成之爆炸成形彈的類型和速度有直接的影響，例如圓錐形藥型罩的錐角變化可影響成形彈的類型；變壁厚雙曲線形銅藥型罩，錐角 150° 時形成杵體成形彈，錐角達 160° 時可形成翻轉爆炸成形彈。又如封頂藥型罩形成之爆炸成形彈，徑向收縮良好但前端出現破碎，使空氣阻力加大；中心帶孔之等壁厚藥型罩形成之爆炸成形彈，不但徑向收縮良好，且有良好之外形，金屬質量損失少，為良好結構形狀之爆炸成形彈。

藥型罩材料需為塑性佳、密度高之金屬，才可形成具適當速度和質量且長徑比大的爆炸成形彈，以利於彈丸之飛行穩定性和速度保存，對提高裝甲之侵徹力有正面影響。

此外，就形狀固定之藥型罩而言，罩壁厚度對爆炸成形彈的形狀和速度具有決定性的影響，不論採用固定壁厚或變壁厚之設計，其壁厚之變異均需控制在極小之範圍內，才能獲得預定的彈體形狀和速度。

2.裝藥

裝藥的殼體需高度對稱，否則爆炸產物的非均勻性將導致爆轟波的不平衡，從而造成爆炸成形彈的嚴重變形。改變殼體厚度也會改變對炸藥的限制，在前翻轉成形彈，若殼體較厚則爆炸時藥型罩邊緣部分之壓垮速度加快，造成長柱狀彈體之底部較寬，彈體粗短；反之殼體較薄時，則形成較細長之彈體。

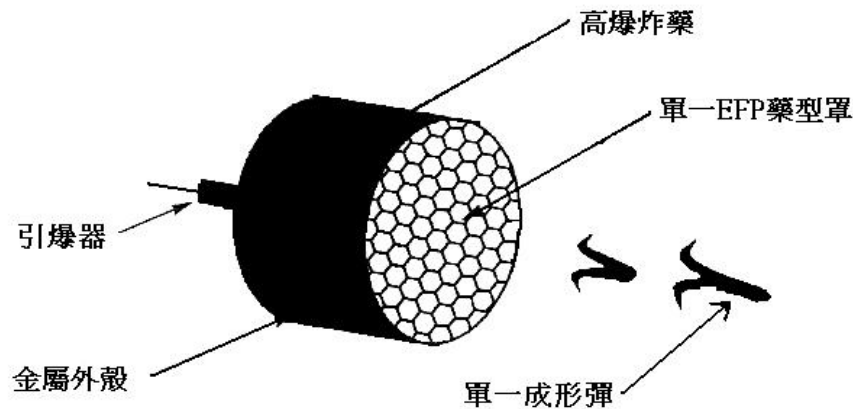
裝藥之密度和幾何形狀也很重要，炸藥裝藥之均勻性和性能之對稱性也對成形彈之對稱性有決定性之影響。炸藥裝藥之長徑比增加，則成形彈之動能增加，其值達 1.5 時動能不再增加；若彈頭空間不足，長徑比可減小，但不宜小於 0.75。

3.起爆方式

起爆方式可改變爆轟波之傳遞方式及藥型罩之壓垮或翻轉機制，偏心起爆可造成不對稱爆轟波和藥型罩軸線偏斜，使成形彈不對稱，影響其飛行穩定並降低其穿甲能力。多點同時引爆可提高裝藥爆轟潛能，改善爆轟波結構及其載荷分佈，改善藥型罩之壓垮變形機制。

(三) 多爆炸成形彈 (MEFP)

爲了提高彈丸的命中率和毀傷裝甲目標之機率，乃設計出多爆炸成形彈，簡稱 MEFP。MEFP 於爆炸時形成多個球體或橢圓體成形彈，對目標進行高密度攻擊，形成大面積毀傷，對群聚的空中和地面裝甲目標都有顯著效果。其藥型罩被設計成能形成多個爆炸成形彈之結構，材料爲鉬、鋼或銅，形狀類似浮雕，由多個圓錐形藥型罩單元組合而成，各個藥型罩單元在邊界處以銳角相接，裝藥爆炸時爆轟波使邊界斷裂，每一藥型罩單元於是單獨形成一個細長體、球體、橢圓球體或長桿體成形彈，其重量在 5-50 公克之間，速度在 500- 2500 m/s 之間，有效距離可達 100 公尺，圖六爲 MEFP 結構之示意圖。另有較簡易的 MEFP 設計，在藥型罩前加一個金屬孔網，即可將壓垮之藥型罩切割成多個碎片，但其彈丸之氣體動力形狀不佳，穿甲毀傷能力較弱。



圖六 多爆炸成形彈之結構示意圖

四、結論

由前述可知，EFP 確可於較長之距離穿透裝甲，殺傷受裝甲保護之戰鬥部隊或重要人物，且可以遙控炸彈或地雷之方式使用，的確可能對目標人物之安全產生威脅；不過因其彈丸之發射具方向性，殺傷範圍不若 IED 產生之碎片，不適合用為大規模威脅不特定身份人群之恐怖活動。此外，EFP 不具自旋穩定性，有效殺傷距離有限，也不適合用為長距離暗殺工具。EFP 之製造技術遠較一般之 IED 困難，所需炸藥和引爆裝置也都不易取得，除非是正規軍隊的軍事行動或受其他國家支援的游擊、反叛攻擊，一般犯罪人持有或製造 EFP 之可能性甚低。完整之 EFP 不僅含高爆炸藥，且含金屬組件，極易由現行之隱藏爆炸物檢測設備檢知。因此只要嚴格執行安全檢查措施，既可嚴密預防 EFP 對一般民眾或重要人物之恐怖威脅，不需過度恐慌或疑慮。

參考資料

1. Cooper PW & Kurowski SR, Introduction to the technology of explosives, Wiley-VCH, NY USA, 1996, pp.132-141.
2. Cooper PW, Explosive engineering, Wiley-VCH, NY USA, 1996, pp.435-444.
3. <http://en.wikibooks.org/wiki/Explosively-formed-penetrator>
4. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/munitions/bullets2-shaped-charge.ht>
5. 王志軍，尹建平，彈藥學，北京理工大學出版社，北京，2005，175-205頁。
6. 隋樹元，王樹山，終點效應學，國防工業出版社，北京，2000，196-278頁。

