

監測板在終端彈道 測試上的應用

孟憲輝／中央警察大學鑑識科學學系教授

摘要

監測板是武器及防護裝備研發和槍彈鑑識領域，實施實彈測試時常用的終端彈道效應記錄裝置，在終端彈道測試程序中扮演極為重要的角色。本文就抗彈能力測試、彈藥終端彈道效應評估、創傷彈道測試等三個領域，蒐集相關測試規範和期刊論文，分別探討監測板在各領域的應用情形，以及監測板的放置方式和數目，並歸納出常用的監測板材質。探討結果發現，絕大部分抗彈能力測試係在抗彈材料後方放置單層監測板，根據監測結果判定抗彈測試是否通過。另也有在抗彈材料後方放置多層鋁板，以評估貫穿抗彈材料穿甲彈頭之殘餘動能者。彈藥終端彈道效應評估實驗中，有的監測板直接承受彈藥破片的衝擊，也有將監測板放置在標靶後方，記錄彈藥貫穿標靶型態者；多數使用單層監測板，也有使用多層監測板者。創傷彈道測試使用的單層監測板，都直接承受彈丸或破片衝擊。此外抗彈能力測試和創傷彈道實彈測試，大都使用厚度小於1 mm的鋁合金監測板，有少數研究分別使用軟鋼板或鉻鎳鋼為監測板。在彈藥終端彈道效應評估領域，使用鋁質和鋼質監測板的文獻數量相同，也有使用鋁、鋼和泡棉等複合材料監測板者。文獻分析結果證明，監測板是終端彈道測試的重要裝置，不論其為何種材質、尺寸、厚度和數量，都能有效記錄相關的終端彈道特徵。探討結果並發現，進行抗彈能力和創傷彈道測試時，不同尺寸和厚度的鋁板是監測板材質的最佳選擇。



關鍵詞

槍彈鑑識、監測板、終端彈道測試、
抗彈裝備測試、殺傷力鑑定。

壹 前言

在攻擊武器研發、抗彈裝備測試和槍彈鑑識等領域中，實彈射擊是必要的實驗步驟，彈藥擊中標靶後產生的終端彈道效應必須詳加記錄，以利後續的分析探討和歸納結論。就槍彈物證鑑定而言，終端彈道相關理論與技術的應用範圍涵蓋：射創形成機制和特性研判、射創彈道重建、槍彈殺傷力鑑定、被射物終端彈道侵徹及貫穿機制研判、外彈道及終端彈道重建、拋射體動能評估等重要鑑定項目。槍彈物證鑑定結果，不僅有助於槍擊案件重建，並對相關刑事案件的偵查、追訴和審判具有關鍵性的影響。實施終端彈道及創傷彈道鑑定的實彈試射時，除使用儀器裝備記錄其內彈道、中間彈道、外彈道和終端彈道相關影像和數據外，必須選定適當的標靶，以利從標靶的終端彈道破壞特徵進行各項鑑識特徵的辨認、評估、研判，並歸納出結論。在評估創傷彈道時，彈道肥皂⁽¹⁾ (ballistic soap) 和彈道凝膠^(2,3) (ballistic gelatine) 都是常用的試射用標靶。在槍彈鑑識、抗彈裝備測試和武器研發等領域，監測板則是另一種實彈試射時常用的標靶。相較於彈道肥皂和彈道凝膠，特定規格的金屬監測板因其材料特性變異甚小，有利於降低多次實彈測試所得結果的變異；且試射時之準備程序簡易，測試條件單純，測試結果之判定明確。因此，不同材料類型、尺寸和厚度的監測板廣泛被應用於彈道測試的相關研究和實務上，本文有系統地綜整相關文獻，包括部分本文作者的研發成果，分類闡述各種監測板的應用方式，供從事槍彈鑑識和彈道重建的鑑識人員參考，期能擴大監測板在鑑識領域的應用價值，並希望能啟發監測板應用範疇的新創意。

貳 監測板在抗彈能力測試上之應用

監測板應用在評估抗彈裝備之抗彈能力時，可取得明確可信的判定結論，因此是許多抗彈能力測試規範所明訂的標準裝置。此外許多進行抗彈材料研發的研究，也會在實彈測試時使用監測板來判斷研發產品的抗彈性能，估計貫穿破片的殘留動能，或記錄測試樣品的終端彈道破壞機制及型態。使用監測板的相關抗彈測試標準和抗彈材料研發文獻分別敘述如下。

美國國家司法研究院 (National Institute of Justice, NIJ) 於1985年所發佈關於抗彈材料的測試標準NIJ Standard 0108.01中⁽⁴⁾，使用一片置於測試樣品後方的薄鋁板作為監測板。每次依抗彈等級的不同，分別使用特定口徑、材質、結構和質量的輕型槍枝彈頭進行實彈試射。所用之彈頭口徑包括.22 LR、.38 Special、.357 Magnum、9 mm、.44 Magnum等手槍彈彈頭，以及308 Winchester和30-06 AP之步槍彈彈頭。試射時選定適用武器擊發特定口徑子彈，使射出彈頭在規

定的速度範圍內擊中抗彈材料預定的彈著位置，再檢視監測板是否遭貫穿，以判定該樣品的抗彈能力測試結果。在前述抗彈測試中，不論源自彈頭或測試樣品的破片，若其動能足以貫穿監測板，即證明此等破片可產生使人喪失能力的創傷，該樣品的抗彈測試即判定為不合格。NIJ Standard 0108.01採用的監測鋁板為0.51 mm (0.020 in) 厚的2024-T3或2024-T4鋁合金板，測試時監測板須與測試彈頭飛行線垂直，固定於抗彈材料後方15 cm (6 in) 處。判定監測板是否遭貫穿的方式是，以60瓦的燈泡照射監測板，觀察光線是否可穿過監測板的損壞處。監測板在抗彈測試之應用中係用來模擬人體的皮肉層，抗彈材料若無法有效阻抗特定規格等級的彈頭，造成監測板的貫穿，即可證明該材料的抗彈能力不足，可造成所保護人員的皮肉層遭穿透，無法確保保護對象的人身安全。

美國國防部軍規MIL-STD-662F針對抗彈裝備以彈道極限 V_{50} 的測試評估其抗彈能力⁽⁵⁾。 V_{50} 的定義係指特定規格的拋射體，以測得之彈道極限速度衝擊受測的抗彈裝備時，有50%的機會可造成完全穿透 (complete penetration)。其拋射體包括各種口徑的彈頭和特定規格的高爆彈模擬破片。在求得 V_{50} 的測射程序中，首先以預估射速射擊受測抗彈樣品，若拋射體完全穿透抗彈樣品，則調低射速繼續射擊。若造成部分穿透 (partial penetration)，則調高射速繼續射擊。依此程序不斷調高或調低射速，持續實施射擊達一定數量後，射速分布在略高於或略低於彈道極限的射擊中，必有相當數量的部分穿透和完全穿透射擊結果穿插分布其中。射速高於此穿插分布區域者，完全穿透的機率為100%；射速低於此穿插分布區域者，完全穿透的機率則為0%。在此穿插分布的射擊結果中，取相同數量的「最高部分穿透射速」和「最低完全穿透射速」之數據，求取其平均值，即得彈道極限 V_{50} 。計算 V_{50} 時最少須有完全穿透和部分穿透的射速數據各兩個，但較常使用的是各四、六或十個數據。

依據MIL-STD-662F的程序進行彈道極限測試時，須在受測樣品後方 $6 \pm 1/2$ in. (152 ± 12.7 mm) 處，與其平行放置一塊0.020 in. (0.51 mm) 厚、邊長279 mm × 356 mm的2024-T3、2024-T4或5052鋁合金監測板。若測試樣品為抗彈頭盔時，可使用較小尺寸的監測板，放置位置則為彈著點後方2 in (51 mm) 處。射擊後若拋射體或其碎片、或受測樣品破片貫穿監測板，即判定受測樣品遭完全穿透；監測板未遭貫穿，則判定為部分穿透。當受測樣品有弧度時，監測板亦可彎曲放置，以便穿透樣品的拋射體或破片可垂直撞擊監測板。

美國愛達荷國家實驗室於2005年提出的編號INL/EXT-04-02412 Revision 1人員裝甲運輸車抗彈測試指引中⁽⁶⁾，在測試乘客室抗彈性能時也在標靶區域後方小於15 cm處放置0.020-in.厚的2024-T3或T4鋁合金監測板，以判定乘客室是否遭穿透。監測板若遭彈頭或測試樣品穿透，即視為該射擊具致命性，判定裝甲之抗彈測試失敗。該指引也使用60瓦燈泡照射的方式判定監測板是否遭穿透。該指引試射用的彈頭依抗彈等級的劃分，分別為常見口徑的手槍彈和步槍彈的普通彈或穿甲彈。該指引於測試時依抗彈等級的不同，分別使用特定口徑、材質、結構和質量的

輕型槍枝彈頭，所用之口徑包括.357 Magnum和.44 Magnum之手槍彈頭，以及22-250、300 Winchester Magnum和30-06 AP步槍彈之彈頭。

北大西洋公約組織2005年公布的AEP-55抗彈測試標準係以輕裝甲車為測試標的⁽⁷⁾，測試用拋射體依抗彈等級而異，包括中小口徑槍砲動能彈頭和高爆彈模擬破片，其中彈頭類型涵蓋口徑5.56 mm × 45和7.62 mm × 51的普通彈和穿甲彈、口徑7.62 mm × 39的穿甲彈、口徑7.62 mm × 54R的穿甲彈、口徑14.5 mm × 114的穿甲彈、口徑25 mm × 137的穿甲彈。該標準亦以監測鋁板是否遭完全穿透作為判定抗彈測試成功與否之依據，不過特別強調射擊後除觀察監測板之穿透情形外，也須檢視受測裝甲的破壞情形，以便決定是否繼續進行後續抗彈測試。其完全穿透和部分穿透的定義與美國軍規MIL-STD-662F相同。監測鋁板之規格為0.5 mm ± 0.05 mm厚的鋁合金板，其材料為2024 T3或T4，AlCuMg ISO/R209合金，最小抗拉強度440 N/mm²。測試時監測板置於樣品後方，與其平行相距150 mm ± 10 mm，監測板面積須大於或等於樣品面積，以利監測到所有來自彈頭或樣品的破片。

Fanning在一篇關於鈦合金抗彈性能的研究報導中⁽⁸⁾，使用口徑為9 mm和.44 Magnum的手槍彈頭，對數種厚度3到4.5 mm的鈦合金板進行彈道極限 V_{50} 之測試，其測試程序與美國軍規MIL-STD-662F之程序相同。測試之樣品包含市售純鈦金屬、Ti-3Al-2.5V、Ti-6Al-4V和Ti-15V-3Sn-3Cr-3Al等合金。實施彈道極限測試時在樣品後方152 mm處放置0.51mm厚之2024-T3監測鋁板，試射後監測鋁板遭貫穿，即判定受測樣品被彈頭完全穿透，否則即為部分穿透。結果發現鈦合金厚度與彈頭直徑之比值 t/D 大於0.5時，鈦合金的彈道極限和 t/D 值呈線性正相關。

Dateraksa等研究者針對燒結氧化鋁、燒結碳化矽和熱壓碳化硼等三種抗彈陶瓷板進行彈道極限 V_{50} 的測試⁽⁹⁾，試射彈頭為口徑7.62 mm的M80型步槍普通彈，射速範圍為800-970 m/s，測試時在測試樣品後方放置監測鋁板以判定陶瓷板是否遭完全穿透，結果前述三種材料測得的彈道極限分別為913 m/s、869 m/s和829 m/s。

Kilic等學者針對邊長40 cm的各式高硬度Secure 500鋼板，根據北約抗彈測試標準NATO Stang 4569 Level 3的標準，射擊射速854 m/s的7.62 × 54 mm口徑B32穿甲彈頭進行抗彈測試⁽¹⁰⁾。首先針對厚度分別為9 mm和20 mm的鋼板進行研究，測試並觀察鋼板遭口徑7.62 × 54 mm穿甲彈頭射擊時之終端彈道破壞機制。實施實彈試射時，在鋼板標靶的後方150 mm處放置監測鋁板，以觀察彈頭和標靶破片是否完全穿透監測鋁板。並使用高速攝影機記錄背向破片效應特徵和穿過標靶後彈頭的殘留速度。以單層完整之鋼板進行測試時，試射結果，穿甲彈可貫穿9 mm厚鋼板，彈頭之殘留速度在460m/s到495m/s之間（平均487m/s），但數位模擬的殘留速度僅455 m/s。穿甲彈在鋼板射入面和射出面均產生破片效應，在射出口周圍則另產生背面瓣狀效應。20 mm厚鋼板測試結果顯示，穿甲彈僅能穿入鋼板，而無法貫穿。彈頭留在鋼板內，穿入深度在12.5 mm到13.6 mm間。該研究的數位模擬結果，穿入深度則為12.9 mm。試射結果顯示，彈

頭並在鋼板射入面留下直徑13.1-15.5 mm的彈坑，但數位模擬所得之彈坑直徑僅為9.9 mm。

文獻資料顯示口徑7.62 × 54 mm的B32穿甲彈頭射擊Secure 500鋼板時的彈道極限厚度為15 mm，因此該研究接著使用兩層鋼板及前述彈頭進行抗彈測試，前方放置厚度6 mm網孔式鋼板（perforated armor plates），網孔式鋼板後方間隔30 mm處放置9 mm厚之完整鋼板。其總厚度15 mm與彈道極限厚度相同，但面積密度小於厚度15 mm的完整鋼板。其中網孔式鋼板的圓形網孔直徑6 mm，小於彈頭直徑7.62 mm，相鄰兩網孔中心點的間距為10 mm。測試結果顯示，不論彈頭先擊中網孔中心、網孔邊緣或兩網孔間鋼板，穿過網孔鋼板的彈頭都無法穿透後層的9 mm鋼板，僅在其表面留下遭變形彈頭、彈頭破片和網孔鋼板破片撞擊產生之凹痕，其凹痕深度小於1.8 mm。結果證明，網孔鋼板在前、完整鋼板在後的抗彈材料組合，不僅可降低抗彈材料的總重量，更因網孔結構可使彈頭產生偏折和破裂，降低其侵徹力，而提升其後方完整鋼板的抗彈性能。

美國海軍研究實驗室（Naval Research Laboratory, NRL）將厚度2 mm到3 mm的軟質彈性體聚脲（polyurea）包覆在各類硬質的抗彈材料前面，以降低抗彈材料的面積密度及整體重量，認為此等材料可應用至軍用車輛、防彈衣、防彈頭盔，甚至民間用途⁽¹¹⁾。試射實驗所用的硬質材料包括軋壓均質裝甲、高硬鋼（high hard steel）、超高硬鋼（ultrahigh hard steel）和聚合樹脂強化的Kevlar芳香聚醯胺織物。測試時使用各種口徑普通彈、穿甲彈和模擬破片進行射擊，並測定包覆軟質彈性體之各種材料的彈道極限 V_{50} 。在判定測試樣品是否遭完全穿透時，在其後方15 cm處放置0.5 mm厚的2024 T3鋁板作為監測板，再透過背面燈光觀察，判斷拋射體及測試樣品破片是否貫穿監測鋁板。但該實驗在測試包覆2 mm厚軟鋼容器用的裝甲材料時，使用的監測板即改為2 mm厚軟鋼板，而非0.5 mm厚鋁板。

測試結果發現，對鋼材裝甲包覆軟質彈性體以改變其結構，可提升抗彈材料對模擬破片和普通彈的抗彈能力。但彈頂尖銳的穿甲彈可切割撕裂包覆體，而降低軟質彈性體所增益的抗彈效能。為有效抵抗穿甲彈，該研究在軟質彈性體內嵌入高硬度、低密度的抗彈陶瓷珠，以加速穿甲彈頭的磨耗，並使遭擊破的陶瓷破片留在包覆體內，繼續發揮抗彈效能。

在Grujicic等學者發表的就金屬/介金屬化合物夾層複合材料Ti/TiAl₃抗彈性能的數位模擬研究中⁽¹²⁾，研究者採模擬破片在不同射速下垂直射擊Ti/TiAl₃的模式進行研究。Ti/TiAl₃複合材料係由具延展及堅韌性的金屬鈦和僵硬堅固的介金屬化合物TiAl₃層層交疊而成，每層材料厚度小於1 mm。此種材料被認為具有取代金屬裝甲與聚合物組成之複合材料的潛力。該研究在Ti/TiAl₃材料後方30 cm處模擬一塊面積大於樣品的堅硬監測板，以便偵測遭射擊後抗彈材料背面產生射出的破片，並計算破片傳遞給監測板的動量。在此研究中，監測板的功能與試射時用於判定測試樣品是否遭完全穿透的監測板功能不同。研究結果顯示，Ti/TiAl₃材料當作複合式抗彈板的背襯層時，可有效吸收拋射體動能並磨耗拋射體。不過因Ti/TiAl₃材料內層的鈦金屬是形成破片並



傳遞動量至監測板的主藥來源，因此Ti/TiAl₃材料不適合作為裝甲車輛的主結構材料，以免其破片傷害裝甲車內搭乘人員，但適合作為裝甲車輛外層附加的抗彈材料。

Kurzawa等研究者使用射速 $715 \text{ m/s} \pm 10 \text{ m/s}$ 的口徑 $7.62 \times 39 \text{ mm}$ 的全金屬包衣M 43鋼核彈頭，射擊經強化的EN AW-7075合金抗彈材料，並在樣品後方放置監測鋁板，以評估彈頭穿透抗彈材料後之殘餘動能及破壞性⁽¹³⁾。圓盤狀的抗彈材料直徑80 mm、厚度12 mm，並使用直徑3到6 μm 的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 顆粒製成的陶瓷坯予以強化，所含 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 顆粒的體積分成30%和40%兩種。測試時在抗彈材料後方放置10片厚0.3 mm的鋁板，以評估貫穿彈頭的殘留動能，第1片鋁板與抗彈材料的距離和各片監測鋁板的間隔均為20 mm。射擊結果鋼核彈頭均穿透抗彈材料，彈孔均呈射入口小、射出口大的圓錐形，彈孔周圍均形成4至5條向外延伸至材料邊緣的輻射狀斷裂。含30% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 顆粒抗彈材料上彈孔射入口和射出口的直徑分別為15mm和22mm，含40% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 顆粒抗彈材料上彈孔射入口和射出口的直徑分別為12mm和33mm。鋼核彈頭穿透含30% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 顆粒抗彈材料後，又穿透前2片監測鋁板，並造成後續2到3片的監測鋁板嚴重變形。但穿透含40% $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 顆粒抗彈材料的鋼核彈頭，則僅造成前3片監測鋁板的變形，並未穿透任何監測鋁板。

Purwanto等學者使用厚6 mm的鋼板進行抗彈測試⁽¹⁴⁾，其中未經熱處理之鋼板硬度較低（BHN 118.21），經熱處理之鋼板硬度較高（BHN 478.23），測試鋼板後方放置0.2 mm厚的監測鋁板以觀察測試鋼板是否遭彈頭完全穿透。測試用彈頭為口徑 $5.56 \times 45 \text{ mm}$ 的M-193全金屬包衣彈，射擊距離15 m，射擊角度遵照NIJ Standard 0108.01規範之抗彈材料測試程序，以垂直射擊之方式實施。使用ProChrono®彈頭測速儀測得之試射彈頭的平均射速為989 m/s。

測試結果顯示，不論硬度高低，以單一層鋼板進行測試時，鋼板均遭完全穿透。測試兩層重疊之低硬度鋼板時，彈頭僅完全穿透第一層鋼板，並在第二層鋼板形成鼓脹（bulge）效應。測試前後層依序為高硬度和低硬度鋼板之兩層重疊鋼板時，第一層高硬度鋼板易遭完全穿透，但在第二層低硬度鋼板形成較不明顯的鼓脹效應。顯示高硬度鋼板的抗彈性能較佳，彈頭完全穿透高硬度鋼板後的殘留動能較低。不論單層鋼板或雙層鋼板的抗彈測試中，低硬度鋼板的彈頭射入口均出現正面瓣狀效應，在背面則產生鋼板破片，因此在監測板上可觀察到彈頭形成的大孔洞，其周圍則有鋼板破片形成的較小孔洞。由於全金屬包衣彈頭穿透高硬度鋼板時產生嚴重變形，故彈孔直徑大於彈頭直徑。彈頭貫穿高硬度鋼板的機制為沖塞效應（plugging），因此其射入口周圍並未觀察到因金屬材料流動及塑性變形產生的正面瓣狀型態。

網孔式裝甲除可降低裝甲重量外，彈頭擊中網孔邊緣時可造成彈頭破裂、彈頭晃動及彈道偏折，而降低彈頭之侵徹力，因此網孔式裝甲常用為附加裝甲，裝置於主體裝甲的外側，提升裝甲系統的抗彈能力。Balos等研究人員在一篇關於網孔式裝甲抗彈性能的回顧性文章中提及⁽¹⁵⁾，使用口徑7.62 mm × 51 mm的M2穿甲彈頭射擊孔徑分別為2、4和6 mm、厚度為5 mm的熱處理過網孔式鉻鎳鋼裝甲，以進行抗彈測試。網孔式鋼板後方放置60 mm厚的鉻鎳鋼監測板，以利量測彈頭在監測板上的侵徹深度，並據以評估網孔式鋼板的抗彈效能。結果發現孔徑最大（6 mm）的網孔式鋼板抗彈性能最佳，孔徑2 mm網孔式鋼板無法造成穿甲彈頭的破損，故抗彈性能最差。因此，網孔內徑雖必須小於彈頭直徑達一定程度才能避免彈頭直接穿透，但如果孔徑過小，反而會造成彈頭的準直被導正，降低彈頭的晃動及側偏，使彈頭更難破碎及被偏折，進而降低網孔式鋼板的抗彈性能。



參 監測板在彈藥終端彈道效應評估上之應用

終端彈道係研究彈藥擊中標靶或爆炸物在標靶表面引爆後，對標靶產生的侵徹程度和破壞效應。為監測並評估各類彈藥的終端彈道效能，監測板也被用來記錄彈藥的終端彈道破壞型態和破壞之嚴重程度。此時常會使用多層機械強度較低的金屬監測板，如鋁板；或使用單層機械強度較高強的監測板，如鋼板。在此類應用中，監測板可能如抗彈性能測試般的放置於標靶後方，也可能作為標靶，直接承受擊發彈藥各種終端彈道破壞機制的攻擊。本文蒐集之相關文獻，擇其重點探討如下。

Arikana等學者曾針對破甲高爆彈的終端彈道效應提出研究報導⁽¹⁶⁾，該研究探討邊長400 mm、厚12.7 mm的軋壓均質裝甲（rolled homogeneous armor, RHA）和邊長400 mm、厚38 mm

的5083鋁板遭到反戰車高爆彈（high-explosive anti-tank, HEAT）攻擊後，裝甲背面產生之破片效應（spall effect）型態及破片分布情形。測試時在距裝甲背面600 mm處放置由多層由鋁板、鋼板和泡棉組成的監測板組，其組合方式為在各金屬板間均緊密夾有25 mm厚的泡棉。監測板組的金屬板由前至後依序為由泡棉隔開的2層1 mm厚鋁板，接著是泡棉加3層重疊的1 mm厚鋁板，最後是由泡棉隔開的4層1.5 mm厚鋼板，監測板組中金屬板共厚11 mm，隔開金屬板的泡棉總厚度達150 mm。測試時直接在裝甲上引爆反戰車高爆彈，實彈測試結果顯示，使用軋壓均質裝甲為測試樣品時，產生之背面破片在監測板組上的貫穿孔洞分布範圍之直徑達900 mm。使用5083鋁板進行測試時，監測板組上的破片貫穿孔洞分布直徑更達1300 mm，且其破片直徑普遍大於軋壓均質裝甲遭攻擊時所產生的破片。

Walsh和Romero在1018監測鋼板表面分別引爆6種TNT當量為0.82磅重的爆炸物⁽¹⁷⁾，包括硝酸銨燃油炸藥（ammonium nitrate and fuel oil, ANFO）、塑膠炸藥C4、代拿邁（Dynamite）、三硝基甲苯（TNT）、黑色火藥和無煙火藥。高爆藥爆炸產生的粒子高速撞擊監測鋼板表面時，可產生尺寸不一的微炸坑（pitting）。該研究使用之1018監測鋼板之邊長均為3英吋，但厚度未表明。爆炸物均裝在內徑2英吋之鋼管內，貼緊監測鋼管表面引爆。試爆結果顯示，代拿邁、三硝基甲苯和無煙火藥可在監測鋼板表面產生大量的微炸坑，C4爆炸後產生少量的微炸坑。爆速較低的硝酸銨燃油炸藥和燃速較低的無煙火藥，則均未在監測鋼板上產生炸坑。

Arnold和Rottenkolber在探討爆裂物爆炸所生金屬破片質量分布之研究中⁽¹⁸⁾，以兩片半圓管狀金屬殼包覆直徑100 mm、高200 mm的圓柱形高爆藥KS33（HMX/HTPB 90/10），其高爆藥密度1.71 g/cm³、爆速8,480 m/s，以Gurney公式計算得之爆炸破片估計速度為2,700 m/s。其使用之爆裂物金屬殼材料共5種，分別為2 mm厚鋁板、2 mm厚軟鋼板、6 mm厚軟鋼板、6 mm厚硬鋼板、6 mm厚熱處過硬鋼板。試爆時以傳爆藥從頂端引爆架高1公尺的爆裂物，在爆裂物的相對側，距爆裂物均為2公尺處，每側各豎立3片（兩側共6片）略呈圓弧狀並排的0.5 mm厚監測鋼板，以分別監測各個半圓管狀金屬殼爆炸破片的分布。每片監測鋼板寬1公尺、高2公尺，監測鋼板後方再依序疊加一層10 mm厚泡棉和4 mm厚鋼板，以避免監測鋼板遭破片穿透時造成嚴重變形，而影響破片穿孔尺寸和形狀的記錄量測。該研究以影像處理技術記錄監測鋼板上的金屬破片穿孔，以獲得完整的破片分布型態資訊。並以數學公式將已知面積的穿孔比擬為橢圓形孔洞，計算出其長度和寬度，並根據已知的破片厚度計算出每個破片的體積，再利用金屬材質密度估算每個破片的質量。最後獲得不同材質金屬殼爆炸後，其所有記錄得之破片在長度、寬度和質量之分布情形，並據以求出此等分布與金屬殼材料強度之相關性。

聚能裝藥係高爆彈內之炸藥前端塑成圓錐形凹洞，並在凹洞表面覆蓋一層金屬襯，炸藥爆炸時衝擊波以固定角度離開炸藥表面，壓垮金屬襯，集中形成高速金屬射流、金屬碎片和後端杵體，利用金屬射流的高動能穿透裝甲。其中金屬射流之射速可達8000-9000 m/sec，碎片速度

達約1000 m/sec，杵體射速約300 m/sec。聚能裝藥高爆彈的穿甲效果極佳，使用少量炸藥就能穿透相當厚度的裝甲。為能有效形成射流，高爆彈引爆時和裝甲間需有一定的炸高。但如果高爆彈在距離裝甲6-8個口徑以上之距離引爆，射流的穿甲效果就開始下降。本研究探討各種使聚能裝藥提早引爆、破壞射流結構、偏折射流方向、阻擋穿過裝甲厚之射流及裝甲破片的裝甲結構，以保護裝甲車內人員的身體安全。

Szudrowicz使用尺寸為150 × 150 × 7 mm的高硬度鋼鐵裝甲板為標靶，進行聚能裝藥高爆彈的終端彈道效應研究⁽¹⁹⁾。該研究為記錄高爆彈射流所能造成的穿孔型態及射流穿過裝甲後殘留射流和裝甲破片的殺傷及破壞效應，使用了一片尺寸為500 × 500 × 1.5 mm的鋼板作為監測板。單純引爆聚能裝藥高爆彈時，監測板和高爆彈前端的距離為760 mm。使用聚能裝藥高爆彈貫穿裝甲樣品時，監測板置於裝甲後方660 mm處。單純引爆聚能裝藥高爆彈的測試結果發現，以X光高速攝影測得之射流速度為7450 m/s，金屬射流、碎片和杵體穿透監測板，並在其上形成一個大洞。引爆聚能裝藥高爆彈直接穿透裝甲時，監測板上射流造成的大洞周圍產生許多裝甲破片形成的小洞，顯示聚能裝藥爆炸產生之射流不僅可穿透裝甲，還能產生二次拋射體，擴大對裝甲車內人員的傷害範圍。

該研究為降低射流對裝甲車輛內人員的傷害，在裝甲鋼板前面裝置厚度分別為10、30、60和90 mm的Al₂O₃陶瓷板，其目的在耗損及破壞射流結構，偏折射流衝擊裝甲的角度，降低射流穿透裝甲時的速度。為能捕捉穿過裝甲的射流碎片和裝甲產生之破片，在裝甲後方間隔20 mm處，分別放置尺寸均為150 × 150 mm，但厚度不同的兩種類型的夾層。其中一種是厚度分別為10.4、20.8和41.6 mm的玻璃夾層，另一種則是厚度分別為8.5、17和25.5 mm的芳香族聚醯胺夾層。引爆聚能裝藥高爆彈後，觀察監測板的破損型態發現，加裝陶瓷板和捕捉破片夾層的裝甲，不僅可縮小監測板上主孔洞的尺寸，還可使主孔洞周圍裝甲破片造成的小孔洞消失。當陶瓷板和捕捉破片夾層厚度增大到一定程度後，甚至可使穿過裝甲的射流無法貫穿監測板，使裝甲對聚能裝藥高爆彈達到完全抗彈的效能。

Xu等學者在一篇文獻中，使用不同重量的黑色火藥引爆裝填RDX炸藥的鋼管炸彈，根據回收的爆炸破片和監測板上由破片造成的孔洞數量和面積特徵，探討各鋼管炸彈爆炸時釋放爆炸能量的多寡⁽²⁰⁾。所用之鋼管炸彈直徑61.5 mm、長度290 mm，鋼管壁厚15 mm，鋼管兩端開口以鋼蓋封住。鋼管內裝之RDX炸藥密度1.69 g/cm³，爆速8425 m/s。鋼管內主爆藥上方有一固定空間，分別裝填1.55 g、3.07 g、5.00 g或10.07 g的黑色火藥為起爆藥。該研究在封閉式空間內引爆鋼管炸彈，以便盡量回收全部爆炸破片。並在距離炸彈1.5公尺處放置厚2 mm、高1.5 m、寬1 m的鋁板作為監測板，鋼管炸彈之放置高度為75 cm，以確保其與監測鋁板的中心點同高。爆炸後回收所有鋼管破片，計算破片數，量測每個破片的質量，並計算不同尺寸範圍內破片的平均質量。另攝影記錄爆炸破片穿透監測鋁板形成的孔洞，使用影像處理技術計算孔洞數目，並

量測孔洞面積，計算破片尺寸。再根據不同平均質量的破片數目，利用自行發展的數學公式評估爆炸時不同鋼管炸彈釋放能量的相對大小，平均質量較大的破片數目較多者，釋放的能量相對較少。結果顯示，引爆之黑色火藥從1.55 g增加到5.00 g之階段，鋼管炸彈爆炸釋放的能量逐漸增加，共增加了26.28%。但引爆之黑色火藥增至10.07 g時，因火藥爆燃產生的壓力過大，提早破壞鋼管外殼的密閉性，導致爆炸釋放能量的降低，衝擊波和爆炸產生的應力降低，形成相對較大的破片。因此，增加炸彈內之引爆火藥雖可增大其爆炸威力，但過量的引爆火藥卻可造成反效果。

Qi等人在所發表的一個研究中⁽²¹⁾，探討爆炸時嵌入高爆藥表面之鋼珠的終端彈道表現。該研究在長度100 mm的圓管內，引爆質量在2.2 g到27.2 g間、長度和直徑各不相同的圓筒狀PE4塑膠炸藥，共執行21次爆炸試驗。引爆前在炸藥前端中心壓入一個直徑5 mm、質量0.505 g的鋼珠，壓入深度為鋼珠的半徑，引爆炸藥之雷管則裝在炸藥後端中心。在炸藥前方100 mm處裝置分為內圈和外圈的2片圓盤狀Al 6082-T6監測鋁板，用以承受炸藥爆炸後向前高速射出鋼珠的撞擊，並記錄鋼珠在監測鋁板上產生之彈坑。內圈監測鋁板直徑20 mm，外圈監測鋁板直徑則為100 mm。在內圈監測鋁板的前方裝置一個直徑20 mm的霍普金森壓力棒（Hopkinson Pressure Bar）來記錄鋼珠撞擊監測板過程壓力隨時間的變化圖。外圈監測鋁板前方則用一片鋼板支撐，以避免監測板遭鋼珠撞擊後嚴重變形，影響彈坑深度之量測。炸藥引爆後，量測鋼珠撞擊監測板所形成彈坑的深度，並將深度代入一經驗公式，以求得鋼珠的撞擊速度。該經驗公式係於爆炸試驗前，使用空氣槍發射不同射速的鋼珠，並以監測鋁板記錄每次射擊彈坑的深度，經統計分析後求出彈坑深度和鋼珠撞擊速度的關係式。由彈坑深度計算得之鋼珠撞擊速度在245m/s到640 m/s間，結果顯示鋼珠撞擊速度和炸藥質量呈非線性之正相關。

反應性彈頭內含反應時可釋放大量能量的高強度材料，當撞擊速度高達一定程度時，可誘發彈頭發生化學反應，產生特殊的終端彈道破壞機制。與傳統動能穿甲彈相較，反應式彈頭可對各類標靶加大貫穿直徑和終端彈道破壞效應。Zhang等人使用不同比例的聚四氟乙烯、鋁、鎢（PTFE/Al/W）等三種材料組成的反應式彈頭射擊兩層厚度均為3 mm的鋁板，後層作為監測板，以利觀察彈頭穿透前層鋁板後的效應⁽²²⁾。其中反應式彈頭的密度依組成不同而分成2.27、3.16、4.00、5.00、5.92、7.80 g/cm³等共6種。射擊結果顯示當彈頭密度大時，前層鋁板的終端彈道破壞機制由背面瓣狀破壞轉換成消耗能量較低的沖塞機制。理論推導得預測誘發反應的關鍵撞擊速度與實彈擊發實驗所得結果相符，推導出的運算公式也能良好預測射擊後標靶貫穿直徑和撞擊點變形高度。結果顯示，彈頭材料密度和強度是決定貫穿直徑和變形高度的決定因素。貫穿過程的高速攝影證明，高密度彈頭貫穿前層鋁板後，產生彈頭破片流，可對後層監測板造成較大的破壞。此外彈頭破片流的最大分散角度和破片集中區域的彈坑數目也都隨著彈頭密度和初速的增加而變大。



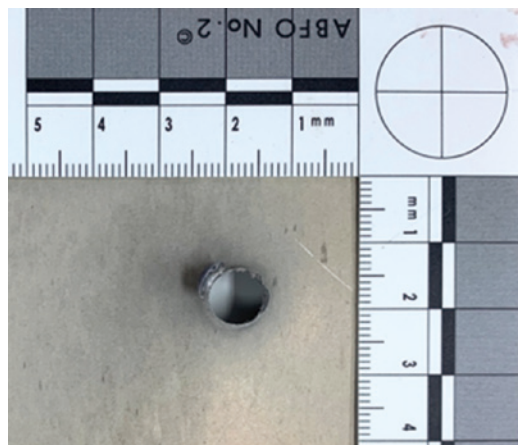
肆 監測板在創傷彈道測試上之應用

我國為嚴格管制槍枝之國家，「槍砲彈藥刀械管制條例」管制之槍砲除「制式或非制式之火砲、肩射武器、機關槍、衝鋒槍、卡柄槍、自動步槍、普通步槍、馬槍、手槍、鋼筆槍、瓦斯槍、麻醉槍、獵槍、空氣槍和魚槍」等類型之武器外，並概括管制「其他可發射金屬或子彈具有殺傷力之各式槍砲」（簡稱「其他槍砲」），將「殺傷力」明訂為「其他槍砲」的管制要件。由於「殺傷力」是一個不確定的法律概念，欠缺明確的法律定義，導致不同機關對殺傷力的認定標準不一，後經多年的爭執辯論後，司法院秘書長辦公室於民國81年6月11日發出（81）秘台廳（二）字第0985號函，對槍砲殺傷力的認定標準做出明確的描述：「殺傷力的標準為在最具威力的適當距離，以彈丸能穿入人體皮肉層之動能為基準。」根據美國文獻之數據推算⁽²³⁾和日本科學警察研究所的研究結果⁽²⁴⁾，彈丸動能密度達 20 J/cm^2 以上，彈丸即可穿入人體皮肉層。實務上為獲得「其他槍砲」和空氣槍射出彈丸的動能密度，必須進行實彈試射，測定射出彈丸之射速，量測彈丸質量和截面半徑，以計算射出彈丸之動能密度。我國槍彈鑑識人員為能減少空氣槍動能測試的案件負荷，乃研發使用監測板進行實彈測試的初篩鑑定法，先將動能密度顯未達殺傷力判定標準的低動能空氣槍篩除，以提升空氣槍殺傷力的鑑定效能。相關研究分述下。

空氣槍屬低動能槍枝，只要射出彈丸動能密度小於 20 J/cm^2 ，即判斷為無殺傷力而可合法持有。因此，空氣槍成為喜愛射擊運動者合法持有及使用槍枝的唯一選擇。但持有者常改造空氣槍以獲得較大之射擊威力，且空氣槍也常被用為毀損和傷害案件之犯罪工具，因此大量扣案空氣槍的殺傷力鑑定成為鑑識機關的積案負擔。由於進行低動能氣動式槍枝殺傷力鑑定時，必須測定彈丸射速，計算其動能密度以進行殺傷力判定。為解決積案問題，減少動能測試鑑定負荷，提升殺傷力鑑定效能，我國槍彈鑑識專家乃研發出使用監測鋁板進行初篩試射，排除明顯不具殺傷力之槍枝後，再進行動能測試⁽²⁵⁾。

該研究使用口徑6 mm之氣動式槍枝射擊同口徑鋼珠，結果發現鋼珠完全穿透厚度0.55 mm的1100-H12鋁板所須之最低動能密度為 15.8 J/cm^2 。美國研究發先以口徑0.55 mm的空氣槍射擊鉛彈丸時，穿入人體皮肉層所須之最小動能密度為 16.51 J/cm^2 ⁽²⁶⁾，因此無法完全穿透0.55 mm厚1100-H12鋁板的彈丸，必然不具穿入人體皮肉層之殺傷力。故於進行氣動式槍枝殺傷力初篩鑑定時，採用該規格之鋁板為監測板，射出彈丸無法完全穿透監測鋁板的氣動式槍枝即判定為不具殺傷力，無需進一步進行動能測試鑑定。但因彈丸變形亦可吸收部分彈頭動能，故該監測板不適合用於4.5 mm和5.5 mm空氣槍所用易變形之啞鈴形和圓筒狀彈丸的殺傷力初篩鑑定。該研究另發現，鋼珠完全穿透厚度0.65 mm的1100-H12鋁板所須之最低動能密度為 22.4 J/cm^2 ，略

高於我國鑑識實務的槍彈殺傷力判定標準 20 J/cm^2 。因此 0.65 mm 厚 1100-H12 鋁板可作為槍彈殺傷力鑑定之監測板，試射時彈丸可完全穿透監測板者，即可判定為具殺傷力。該研究將 0.65 mm 厚監測鋁板應用時實際案例之 6 mm 空氣槍試射鑑定，同時量測球形鋼彈丸射速並計算動能密度，結果發現動能密度 38.8 J/cm^2 和 18.1 J/cm^2 之鋼珠分別可完全穿透和部分穿透監測鋁板，動能密度 13.7 J/cm^2 之鋼珠則僅造成監測鋁板的鼓脹和盤狀變形。鑑識實務上並將 0.65 mm 厚之監測鋁板應用於非制式定裝彈和非制式火藥槍的殺傷力鑑定⁽²⁷⁾。非制式定裝彈試射結果，射出彈頭貫穿監測鋁板之代表性例子如圖一所示。試射非制式火藥槍時，為避免因射出彈頭彈道不穩定無法測得彈頭速度，或槍口焰光和火藥燃氣干擾彈頭測速器之光柵，實務上常在彈頭測速器後方放置監測鋁板，以便試射結果未能測得彈頭射速時，利用監測鋁板終端彈道破壞現象判定試射槍枝殺傷力之有無，其裝置如圖二所示。



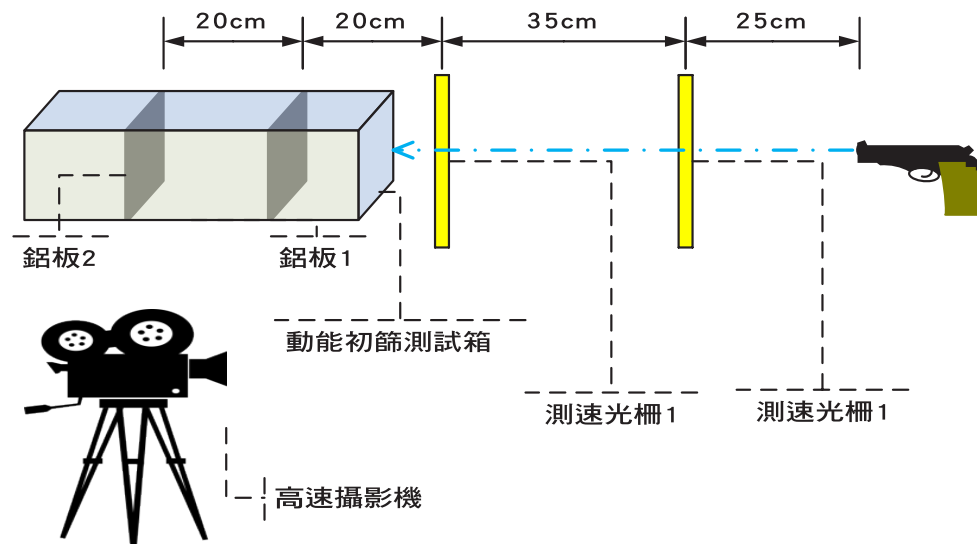
圖一、非制式定裝彈射出彈頭貫穿監測鋁板之射出彈孔。

基層警察機關使用貫穿動能約 15.8 J/cm^2 的監測鋁板進行試射初篩測試，雖可減輕積案問題，但僅適用於使用鋼珠射擊的 6 mm 或 8 mm 空氣槍。因口徑 4.5 mm 和 5.5 mm 的具來復線空氣槍使用者為空心之扯鈴形或圓筒狀鉛彈丸，此類彈丸撞擊鋁板時易變形，消耗部分彈丸能量，而提高貫穿鋁板所須動能。故使用扯鈴形鉛彈丸進行空氣槍殺傷力初篩鑑定時，常獲致偽陰性測試結果。且偵查機關常根據初篩陽性結果聲請羈押嫌犯，部分空氣槍後續之動能測試結果卻僅介於 16 到 20 J/cm^2 之間，未達殺傷力標準而造成不當羈押之困擾。有學者提出改善氣動式槍枝動能初篩法並擴大監測板應用範圍的研究報告⁽²⁸⁾，該研究改採相距 20 公分的兩片監測板進行初篩測試，監測板為厚度 0.55 mm 的 1100-H12 鋁板，其實驗裝置如圖三。並使用鋼珠和鉛珠進行口徑 6 mm 和 8 mm 滑膛空氣槍試射，使用球形鉛彈丸和不同彈鼻形狀之扯鈴形鉛彈丸進行口徑 4.5 mm 和 5.5 mm 具來復線空氣槍試射。分別測定僅貫穿 1 片和貫穿 2 片鋁板



圖二、監測鋁板（藍箭頭）輔助非制式手槍（紅箭頭）殺傷力鑑定之裝置圖。

時之動能密度，以求得空氣槍初篩之最佳測試條件。結果發現，口徑6 mm和8 mm滑膛空氣槍試射鋼珠、口徑4.5 mm和5.5 mm具來復線空氣槍試射球形鉛彈丸時，貫穿1片監測鋁板的動能密度都低於約 18 J/cm^2 ，貫穿2片監測鋁板的動能密度都高於 20 J/cm^2 。因此，不論口徑6 mm和8 mm滑膛空氣槍或口徑4.5 mm和5.5 mm具來復線空氣槍，均可分別使用鋼珠或球形鉛彈丸進行初篩鑑定，只要測試結果未貫穿第一片監測鋁板者，即可排除進一步實施動能測試之必要性。貫穿兩片監測鋁板者，即可確認為具殺傷力槍枝。此一結果不但提升監測鋁板動能初篩法的可信度，也擴充了其鑑識效能。

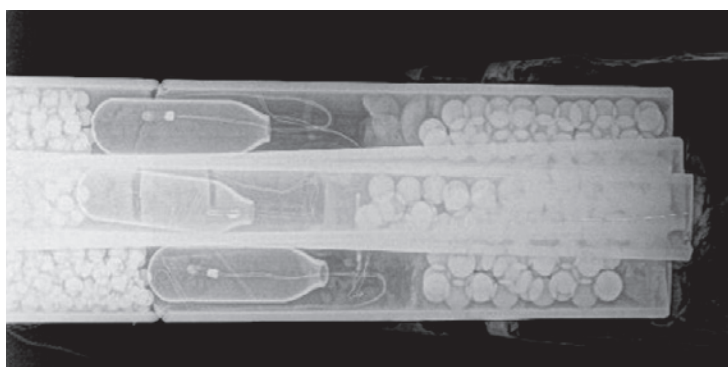


圖三、以兩片監測鋁板進行空氣槍動能初篩之裝置圖

根據彈丸是否射穿不同厚度的監測鋁板雖可用於進行低動能空氣槍殺傷力的初篩鑑定，或用於非制式槍枝和非制式子彈的殺傷力鑑定，但其結果缺乏射出彈丸的射速和動能密度數據，就相關非法槍彈案件的偵查、追訴和審判易遭被告或辯護人的質疑，而引起爭議。有學者開發實彈測試時使用監測板變形程度評估彈丸射速的初篩方法⁽²⁹⁾，該研究以口徑4.5 mm和5.5 mm具來復線空氣槍，分別使用同口徑的球形鉛彈丸，對厚度0.65 mm的監測鋁板進行射擊，觀察不同動能密度的彈丸與監測鋁板終端彈道破壞現象的相關性。結果發現監測鋁板遭射擊後產生的鼓脹和盤狀變形的深度，在監測鋁板未破裂之前，和彈丸射速具有顯著的正相關。其中射擊口徑4.5 mm和5.5 mm彈丸造成之監測鋁板變形深度與彈丸射速的可決係數 (R^2) 分別為0.9921和0.9923，顯示其高度相關性。且根據監測鋁板未破裂前之變形量計算所得的彈丸動能密度分布範圍，不論口徑4.5 mm或5.5 mm空氣槍之試射結果，均能涵蓋我國的殺傷力判定標準 20 J/cm^2 ，故該方法可用於空氣槍的殺傷力鑑定。因此該研究使用線性迴歸公式，根據監測鋁板變形深度進行彈丸射速之計算，並使用4枝涉案空氣槍進行試射測速及監測鋁板變形深度量測，

每枝槍試射7次。再根據公式計算彈丸射速，並將計算所得數據與彈丸測速所得數據進行比較，計算所得之百分比差異（percentage difference）均小於12%，且均能準確判定此等空氣槍殺傷力之有無。研究結果證明監測鋁板未破裂時，彈丸撞擊所造成之變形深度可用於準確估算彈丸動能。該研究並發現，彈丸動能足以造成監測鋁板破裂時，因鋁板破裂所消耗的動能變異極大，其變形深度與彈丸射速之相關性甚低。此外彈丸速度高至足以貫穿監測鋁板後，因大量彈丸動能以殘留動能的型式被貫穿之彈丸帶走，監測鋁板變形深度反而與彈丸速度呈負相關，但其相關性較低。彈丸貫穿監測板的情況下，口徑4.5 mm和5.5 mm球形鉛彈丸所造成監測鋁板變形深度與彈丸射速的可決係數（ R^2 ）分別為0.6294與0.6801。

我國「槍砲彈藥刀械管制條例」管制之彈藥包含「其他具有殺傷力或破壞性之各類炸彈、爆裂物」。因此爆裂物的殺傷力鑑定也是防爆人員的工作重點。在一篇關於爆裂物殺傷力鑑定的研究報告中⁽³⁰⁾，研究人員即使用厚度0.65 mm的監測鋁板記錄爆裂物衝擊波和射出增傷破片的終端彈道破壞效應。試爆實驗使用一個發射式爆裂物，其構造由4個鋼管纏繞組成，鋼管內裝填有火藥、CO₂鋼瓶和金屬珠，鋼管底部密封，並加裝電發火頭，其X光攝影影像如圖四。



圖四、試爆鋼管爆裂物之X光攝影影像。

試爆時將爆裂物拆解成4個鋼管爆裂物，取其中二個進行試爆，並在各鋼管前端5 cm處分別放置一片監測鋁板，試爆結果兩個鋼管爆裂物均順利爆炸，鋼管內CO₂鋼瓶底部炸裂，鋼瓶與金屬珠一起射出。其中一個爆裂物的射出物貫穿監測鋁板，並造成監測鋁板嚴重變形，如圖五所示，證明該爆裂物具造成穿刺傷之殺傷力和對物資之破壞性。另一個鋼管爆裂物的射出金屬珠造成監測鋁板鼓脹效應，並使監測鋁板嚴重扭曲變形，該爆裂物具造成彈道鈍傷之殺傷力和對物資之破壞性。

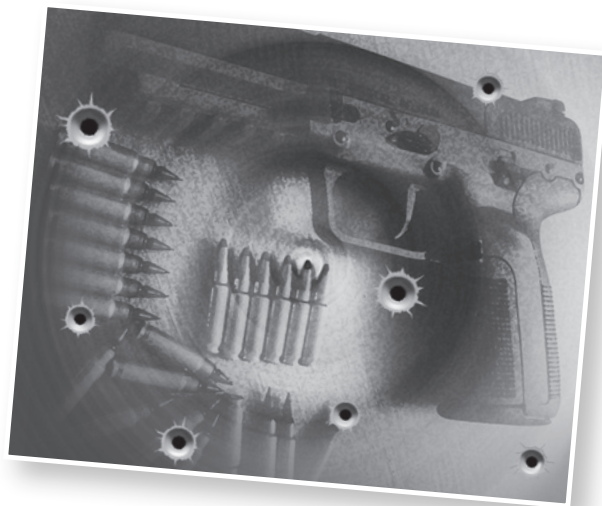


圖五、鋼管爆裂物試爆結果造成監測鋁板貫穿並嚴重變形。

由該研究試爆實驗結果可知，監測鋁板適合用為爆裂物試爆時監測爆炸破片動能之裝置，並可根據其貫穿及變形情形，研判爆裂物的殺傷力和破壞性。爆裂物的主爆藥若為低爆藥，可能產生尺寸較大的破片，其創傷彈道機制多為彈道鈍傷，較難貫穿監測鋁板，僅能造成監測鋁板之嚴重凹陷變形，該研究認為監測鋁板的彈道鈍傷殺傷力判定標準仍待進一步探討訂定。

伍 結論

從彈道測試相關文獻的分析結果顯示，在抗彈能力測試領域，使用的單層監測板都放置於抗彈材料後方，用來監測貫穿抗彈材料的彈頭、彈頭破片或抗彈材料破片的致傷能力，以便判定抗彈材料是否通過抗彈測試。另也有在抗彈材料後方放置多片監測鋁板的研究報告，此時監測板的目的則在評估貫穿抗彈材料穿甲彈頭之殘餘動能。彈藥終端彈道效應評估相關文獻的實驗設計中，部分研究的監測板直接承受彈藥爆



炸及破片的衝擊，以觀察彈藥的終端彈道效應；另有部分則在標靶後方放置監測板，觀察彈藥貫穿標靶的破壞型態。多數實驗使用單層監測板，也有使用多層監測板以評估彈藥破片侵徹力者。創傷彈道測試則均使用單層監測板，並直接承受彈丸或爆炸破片的衝擊，以判定測試武器的殺傷力。就監測板材質而言，絕大部分抗彈能力測試和所有創傷彈道研究的實彈射擊實驗，使用的監測板都是厚度不及1 mm的鋁板，僅有少數研究分別使用軟鋼板或鉻鎳鋼板為監測板。在彈藥終端彈道效應評估的實彈測試中，使用鋁板和鋼板為監測板的研究數量相同，另有一研究則使用包含鋁板、鋼板和泡棉的複合材料作為監測板。所有的文獻均顯示，不論使用何種材質、尺寸和厚度的監測板，所有的研究都能利用監測板有效地記錄實彈測試所得的終端彈道特徵，供為後續數據處理和結果分析之用。證明監測板是終端彈道測試的重要記錄工具，而進行抗彈能力和創傷彈道測試時，不同尺寸和厚度的鋁板則是監測板材質的最佳選擇。FACT

誌謝

本文感謝行政院國科會專案研究計畫的經費支持，
計畫編號MOST 110-2410-H-015-003。

參考文獻

1. Burgos-Díez I et al., 2021, Comparison between computed tomography and silicone-casting methods to determine gunshot cavities in ballistic soap. *Int J Legal Med*, 135: 829–836.
2. Wightman G, Beard J, Allison R, 2010, An investigation into the behaviour of air rifle pellets in ballistic gel and their interaction with bone, *Forensic Sci Int*, 200: 41–49.
3. Carr DJ, Stevenson T, Mahoney PF, 2018, The use of gelatine in wound ballistics research, *Int J Legal Med*, 132: 1659–1664.
4. National Institute of Justice, 1985, Ballistic resistant protective materials, U.S. Department of Justice, NIJ Standard 0108.01.
5. Department of Defense, 1997, V50 Ballistic test for armor, Department of Defense Test Method Standard MIL-STD-662F.
6. Idaho National Laboratory Defense Systems and Technology Directorate, 2005, Ballistic resistance of armored passenger vehicles: A practical guide to testing, INL/EXT-04-02412 Revision 1.
7. NATO Standardization Agency, 2005, Procedures for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles, AEP-55, Volume 1.
8. Fanning J, 2007, Ballistic evaluation of titanium alloys against handgun ammunition, *Ti-2007 Science and Technology*, edited by Ninomi M, Kiyama S, Ikeda M, Hagiwara M, Maruyama K, The Japan Institute of Metals (2007), 487–490.
9. Dateraksa K, Sujirete K, McCuiston R, Atong D, 2012, Ballistic performance of ceramic/S2-glass composite armor, *J Metals, Materials and Minerals*, 22 (2) : 33-39.
10. Kilic N, Bedir S, Erdik A, Ekici B, Tasdemirci A, Guden M, 2014, Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62 mm armor piercing projectile, *Materials and Design*, 63: 427–438.
11. Roland CM, Gamache RM, 2015, Measuring the blast and ballistic performance of armor, NRL/FR/6126, Naval Research Laboratory, 2015.
12. Grujicic M, Snipes JS, Ramaswami S, 2016, Penetration resistance and ballistic-impact behavior of Ti/TiAl3 metal/intermetallic laminated composites (MILCs) : A computational investigation, *AIMS Materials Science*, 3 (3) : 686–721. DOI: 10.3934/mat.2016.3.686.
13. Kurzawa A, Pyka D, Jamroziak K, 2020, Analysis of ballistic resistance of composites with EN AW-7075

- matrix reinforced with Al₂O₃ Particles, Archives of Foundry Engineering, 20 (1) : 73–78.
- 14.Purwanto H, Soenoko R, Purnowidodo A, Suprpto A, 2020, The influence of single and double steel plate hardness on fracture behavior after ballistic impact, Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, 64 (3) : 189–198.
- 15.Balos S, Howard D, Adrian Brezulianu A, Zlatanovic DL, 2021, Perforated plate for ballistic protection— A review, Metals 11 (4) : 526–543. ; <https://doi.org/10.3390/met11040526>.
- 16.Arkan V, Berk B, Karakuzu R, Toksoy AK, Sayman O, 2014, Research for the spall effect after ballistic impact with finite element method, Usak University Journal of Material Sciences, 1: 85–94.
- 17.Walsh GA, Romero VD, 2007, Explosive pitting of 1018 steel witness plates, WIT Transactions on Engineering Sciences, 55: 175–182. doi:10.2495/SECM070171.
- 18.Arnold W, Rottenkolber E, 2008, Fragment mass distribution of metal cased explosive charges, International Journal of Impact Engineering, 35: 1393–1398.
- 19.Szudrowicz M, 2018, Material combination to mitigation of behind armour debris after shaped charge jet attack, 17th International Conference Diagnostics of Machines and Vehicles, MATEC Web of Conferences 182: 02009. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818202009>.
- 20.Xu H, Li W, Li W, Wang Y, 2019, Experimental studies of explosion energy output with different igniter mass, Defence Technology, 15: 808–814.
- 21.Qi R, Langdon GS, Cloete TJ, Yuen SCK, 2020, Behaviour of a blast-driven ball bearing embedded in rear detonated cylindrical explosive, International Journal of Impact Engineering, 146: 103698. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2020.103698>.
- 22.Zhang H, Wang H, Yu Q, Zheng Y, Lu G, and Ge C, 2021, Perforation of double-spaced aluminum plates by reactive projectiles with different densities, Materials 14 (2021) 1229.
23. Di Maio VJM, 1985, Gunshot wounds, Elsevier Scientific Publishing Co., New York, USA, 1985.
- 24.翁景惠，黃國政，陳文偉，蔡東成，2001，槍枝殺傷力認定之疑義，刑事科學，52：65-82。
- 25.Lee HC, Meng HH, 2011, The development of witness plate method for the determination of wounding capability of illegal firearms, Forensic Science Journal, 10: 19–28.
- 26.Di Maio VJM, 1982, Minimal velocities necessary for perforation of skin by air pellets and bullets. J Forensic Sci, 27: 894–898.

- 27.孟憲輝，2016，槍彈殺傷力鑑定，科儀新知，207：15-23。
- 28.Hsiao YT, Meng HH, 2020, Evaluation of wounding potential of airguns using aluminium witness plates, Australian Journal of Forensic Sciences, 52 (4) : 417–427. DOI: 10.1080/00450618.2018.1553207.
- 29.Chen FJ, Meng HH, 2023, Muzzle energy density evaluation of airguns via witness-plate deformations, Australian Journal of Forensic Sciences, DOI: 10.1080/00450618.2022.2109728.
- 30.孟憲輝等，「槍砲彈藥刀械管制條例」中爆裂物「殺傷力」鑑定之研究，2022，國家科學及技術委員會補助專題研究計畫報告，計畫編號：MOST 110-2410-H-015-003。

