

仿生鱗片陶瓷結構裝甲之抗衝擊研究

陳幼良¹ 葉家維^{1*} 盧久章¹ 黃文冠¹ 黃鼎貴²

¹國防大學理工學院動力及系統工程學系

²和成欣業股份有限公司

摘 要

本研究係以仿生魚鱗結構的排列方式，提出防護裝甲設計。實驗部分利用 0.30" 穿甲彈實施彈道測試，透過量測穿靶前後速度計算厚度與組合對靶板能量吸收之影響，實驗結果顯示，在圓形裝甲片同為 9 mm 厚度下，由 8 mm 厚陶瓷片搭配 1 mm 厚圓形鋁板之組合抗彈能力優於其他組合之靶板。模擬部分使用 LS-DYNA 軟體模擬鱗甲構型靶板受彈頭穿靶時之能量吸收、陶瓷破壞情形、應力傳遞方式、彈頭餘速等，顯示數值模擬結果的合理性。

關鍵詞：仿生，彈道測試，LS-DYNA

Study on impact resistance of ceramic armor based on bionic fish scale structure

Yu-Liang Chen¹, Chia-Wei Yeh^{1*}, Jiu-Zhang Lu¹, Wen-Kuan Huang¹, and
Diing-Guey Hwang²

¹ Department of Power Vehicle and Systems Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National
Defense University

² Hocheng Corporation

ABSTRACT

In this research, we proposed the armor design based on the arrangement of bionic scale structures. The ballistic test was under a 0.30" armor-piercing bullet impact. The energy absorption was calculated by measuring the velocity before and after the impact. The experimental results showed that the 8 mm alumina with 1 mm aluminum disk combination had the best impact resistant performance among all the specimens when circular armor disks was fixed at 9 mm thickness. The energy absorption, damage state, stress transmission mode, and bullet residual velocity of the armor penetrated by projectile were investigated by a finite element model using LS-DYNA, showing the rationality of the numerical simulation results.

Keywords: Bionic, Ballistic test, LS-DYNA

一、前言

自古以來，生物為了於多變環境下生存及面對各式威脅，經歷數億年的演化出許多特殊的生存模式、生物型態等，眾多方面提供人們學習模仿的地方。例如魚類表皮存在著許多相互交疊鱗片，除鱗片本身能抵抗外力及威脅外，其相互交疊之結構亦能使外來應力擴散，減少本體的損傷。

近年來國外學者對於仿生結構與材料進行許多研究，然而鱗狀排列裝甲的靈感主要來自於硬骨魚類的鱗片，例如草魚和鯉魚。鱗狀排列結構裝甲主要目的是為了增加彈體與裝甲表面碰撞時產生彈道偏移及翻轉效果，進而增加貫穿阻力，提升抗彈能力。

本研究中抗彈靶板主要是運用陶瓷及鋁質金屬搭配製成，而陶瓷運用在防護材料已超過五十年，在越戰時期，陶瓷最初被廣泛用在防彈背心和直升機座椅[1]

Rosenberg [2]提出了脆性材料在負荷衝擊波的條件下 Hugoniot Elastic Limit (HEL)之推算方式，透過修正金屬之 HEL 計算，而推出脆性材料之 HEL，可經由等效的動態壓縮強度及蒲松比對其進行計算。

Duane 等[3]提供 LS-DYNA 軟體進行數值模擬有關各種陶瓷材料相關參數，並在文中提及破壞常數設定值是需要透過實驗來進行比對和調整，使模擬結果更趨近於實驗。

Fawaz 等[4]以數值模擬方法分析 7.62 mm 穿甲彈對於陶瓷複合裝甲受到正常及傾斜的碰撞的影響，發現裝甲受到投射體斜碰撞時，陶瓷表面所承受的應力低於正常碰撞。

蔣志剛等[5]研究了陶瓷/鋼複合靶板抵抗 7.62 mm 穿甲彈垂直侵徹的作用情形，得到彈著點對於靶板的抗彈性能和極限速度有重要影響，也建立了子彈質量損失簡化模型，當彈著點離陶瓷邊緣小於 5 mm(0.65 倍彈徑)時，因陶瓷錐無法形成，同時使得靶板抗彈性能急劇下降；彈著點在有效範圍內時極限速度差距不大，陶瓷板有效防護面積可以視為等於此面積，而彈著點在有效防護範圍內時，背板部分變形和穿孔與受局部爆炸衝擊的金屬薄板類似。

Krishnan 等[6]利用 LS-DYNA 軟體模擬陶瓷複合裝甲受到 0.30"穿甲彈撞擊後的損傷情形進行分析，說明了陶瓷材料在高速撞擊過程

中的破壞複雜現象，為了擷取撞擊過程的損傷情形，提出了透過校正 JH-2 材料模型參數，而顯現出更趨於真實的損傷模式。

張新杰[7]根據陶瓷複合裝甲的抗彈情形，提出了關於影響陶瓷裝甲抗彈性能的主要因素，闡述了陶瓷材料性能、陶瓷面板的形狀和尺寸、陶瓷裝甲的結構形式等，通過對這些因素的提高和優化來提高裝甲的抗彈性能。

Liu 等[8]對仿生鱗片狀防護系統抗彈性能進行數值模擬分析，比較碳化矽等 4 種圓形陶瓷材料搭配圓形鋁板製成複材靶板，模擬陶瓷的重疊率變化對抗彈性能之影響，其結果得知重疊率的增加可以有效率的提升靶板吸收能，並建議當疊角(θ_1)在 85 度時可提供該研究構型最佳的重疊模式。

為了增加提升抗彈性能，不同於傳統平板拼接式裝甲設計概念，期望藉由改變防護裝甲構型，透過鱗狀排列結構增加投射體與裝甲表面碰撞時產生彈道偏移及彈體翻轉效果，進而增加貫穿阻力，提升抗彈能力，而碰撞時產生的應力除了第一層裝甲片受應力外，可傳遞和擴散至第二層的裝甲片，達到分散應力的作用，降低裝甲片破壞情況，也改善了圓型陶瓷拼接縫隙較多的問題，因此類似之研究近期受到重視。

二、研究方法

為了獲得仿生鱗片陶瓷結構裝甲之抗彈性能，本研究藉由彈道實驗獲取子彈初速與末速、計算靶板吸收能量及陶瓷破壞模式，並利用 LS-DYNA 數值模擬分析方法，來深入探討和比較厚度與組合對仿生鱗狀排列結構裝甲抗彈性能的影響，並藉由實驗結果修正模擬參數，使得模擬結果更趨於實驗結果。

2.1 實驗規劃

由於陶瓷裝甲的陶瓷厚度通常與防禦的彈種有關，不同的子彈直徑要求的陶瓷厚度不同。子彈的直徑尺寸通常是抗彈陶瓷厚度尺寸的臨界值，當抗彈陶瓷厚度小於子彈直徑時，其抗彈能力隨著厚度的增加而緩慢增加；而當陶瓷厚度大於子彈直徑時，其抗彈能力則快速增加[7]。本實驗使用 0.30"穿甲彈進行測試，陶瓷部分設計為 7 mm、8 mm 及

9 mm 等三種厚度，表面形狀仿魚鱗狀，抗彈片設計為圓形，其直徑均為 50 mm，依實驗規劃不同厚度製成圓柱狀，圖 1 所示為 9 mm 厚陶瓷片。

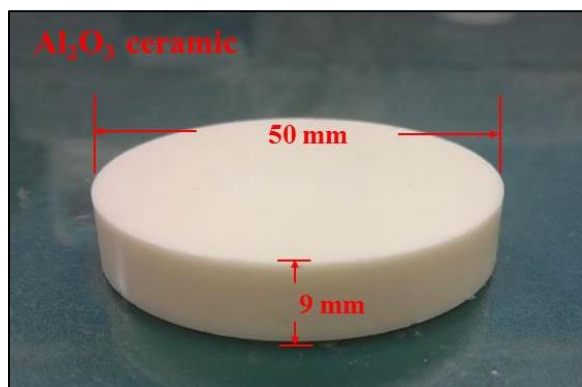


圖1 陶瓷試片尺寸示意圖。

進一步設計在 9 mm 厚度條件下由 7 mm 及 8 mm 厚陶瓷片分別搭配 2 mm 及 1 mm 厚圓型鋁板製成單塊裝甲片(如圖 2)，黏著劑同樣為環氧樹脂(Epoxy Resin)，將 25 片裝甲片搭配同尺寸之鋁背板製成靶板，而這種組合方式設計可使圓形鋁板與陶瓷片的緊密結合，其目的是以金屬韌性延遲陶瓷錐的形成，藉此提升陶瓷抗彈能力，並比較不同厚度組合靶板之抗彈性能。

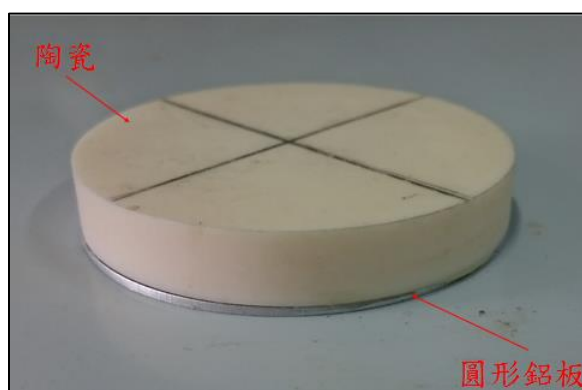


圖2 陶瓷/鋁板試片尺寸示意圖。

2.2 試片製作

本研究實驗所有抗衝擊試片均由 25 片氧化鋁(Al_2O_3)陶瓷裝甲片，搭配背板為邊長 300 mm、厚度 1 mm 之正方形 6061-T6 鋁板組成靶板，陶瓷與背板間黏著劑為環氧樹脂(Epoxy Resin)，而環氧樹脂僅用於陶瓷片重疊處及與鋁板相接處，陶瓷片與背板間因疊

角產生空隙並無填滿；陶瓷部分由和成欣業股份有限公司協助製作，鋁板係由高成鋼鐵有限公司加工製作。實驗試片區分為不同厚度與不同組合等兩種，為了觀察各種不同厚度的陶瓷片相互堆疊後形成鱗甲結構的抗彈性能，測試試片均將固定背板尺寸，只改變陶瓷片厚度與圓形鋁板厚度。各試片及堆疊角度示意圖如圖 3 所示。

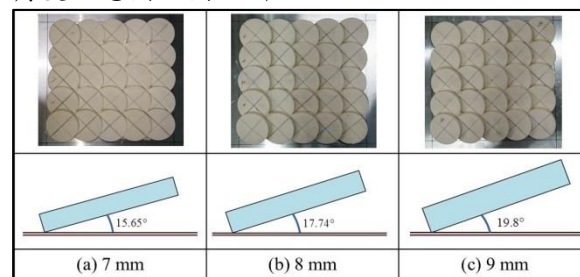


圖3 各試片及堆疊角度示意圖。

2.3 彈道測試

彈道實驗乃使用本院彈道館之測試設備來進行，透過測速光柵獲得投射體初速及貫穿靶板後之末速，可計算靶板所消耗之動能，透過能量吸收之多寡評估各試片之抗彈能力。計算式如下：

$$E_A = \frac{1}{2}mv_i^2 - \frac{1}{2}mv_r^2 \quad (1)$$

其中 E_A 為靶板吸收能量(J)， m 為彈體質量(kg)， v_i 為彈體初始速度(m/s)， v_r 為彈體貫穿靶板後殘餘末速(m/s)。

三、數值模擬方法

3.1 建構靶板模型

依 9 mm 厚度陶瓷之實驗試片尺寸建立全尺寸有限元素分析模型，網格數總共為 537,444 個(如圖 4、圖 5)。陶瓷間及陶瓷板與鋁板間的黏著層省略建立，為了後續觀察陶瓷應力傳遞與損傷模式等微觀數據，針對 25 片陶瓷逐一設定 Part 及網格劃分，其模型顯示不同顏色也代表著每塊陶瓷片屬於不同 Part，利於辨識及設定材料性質，彈體部分包含鋼、銅、鉛等三種材料，為了簡化投射體模擬複雜度，彈體鉛材改以銅代替。

計算模型在前處理中採用三維實體計算模型(3D Solid 164)，該計算模型是三維的實

體元素，具有 8 個節點，每個節點有 9 個自由度，即 UX, UY, UZ, VX, VY, VZ, AX, AY, AZ，但只有位移是具實際意義的物理自由度；另此模型支援大部分的 LS-DYNA 材料模型計算[9]，故可搭配本研究所採用的 Lagrange 演算法。

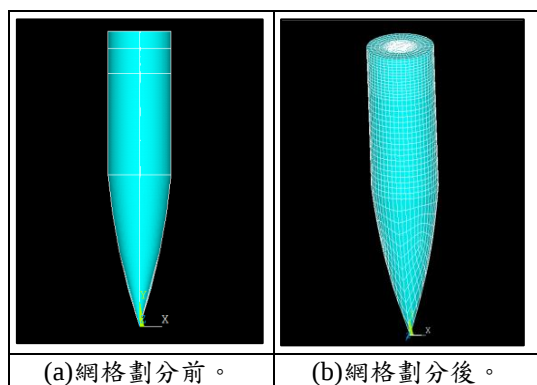


圖4 穿甲彈全模型。

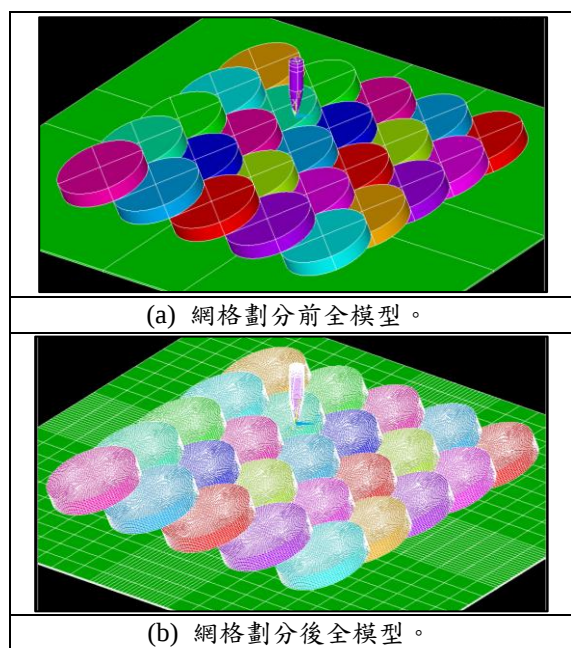


圖5 彈體與靶板結合之數值模擬全模型。

3.2 材料模型選用

完成全模型建立後，0.30"穿甲彈模型具有鋼和銅兩種材料，在 LS-DYNA 模擬中，鋼的部份採用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型；銅的部份採用 MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO，此材料具有彈塑性變形特性，需設定 Mie-Grüneisen 的狀態方程式 (EOS_GRUNEISEN)[3]。至於靶板方面，分為陶瓷和 6061-T6 鋁板(包含圓鋁板及鋁背板)

等兩種材料，陶瓷採用 MAT_JOHNSON_HO LMQUIST_CERAMICS；鋁板採用 MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO，此材料亦需 EOS_GRUNEISEN 設定。

3.3 材料參數設定

本研究中數值模型之彈體的鋼、銅及靶材鋁等材料參數係引用文獻[10]，設定見表 1 至表 3。陶瓷材料模型係使用 JH-2 模型，主要是描述脆性材料於動態情況下受高壓、大變形及高應變率情況下的強度、應變率、累積損傷劣化等之表現。此模型主要由材料狀態方程式、材料強度模型及材料損傷模型三大數學模型及材料基本參數組成[11-13]，為現今最為廣泛應用之陶瓷材料模型，舉凡氧化鋁、氧化鋇、碳化矽、碳化硼等陶瓷材料皆有應用 JH-2 模型進行模擬。而本研究引用文獻[14,15]設定陶瓷相關材料參數(如表 4)，其中陶瓷損傷模型中 D_1 和 D_2 是材料常數，目前僅可由實驗和模擬的結果反覆推算和比對取得[16]。

表1 彈體鋼之材料參數[10]

材料	ρ_0 (g/cm ³)	E (GPa)	ν	σ_v (GPa)	E_t (GPa)
鋼	7.89	202	0.3	1.07	2

表2 彈體鋼及靶材鋁之材料參數[10]

材料	ρ_0 (g/cm ³)	G (GPa)	σ_v (GPa)	E_h (GPa)
鋼	8.93	47.7	0.12	0.288
鋁	2.70	27.6	0.27	0.235

表3 彈體鋼及靶材鋁之狀態方程式[10]

材料	C_0 (cm/ μ s)	S_1	γ_0	A
鋼	0.394	1.489	2.02	0.47
鋁	0.525	1.4	1.97	0.48

表4 氧化鋁陶瓷JH-2模型參數[15,16]

代號	ρ_0 (g/cm ³)	G (GPa)	A	B	C
數值	3.93	156	0.88	0.28	0.007

代號	M	N	T (GPa)	HEL (GPa)	P_{HEL} (GPa)
數值	0.6	0.64	0.259	5.91	1.85

代號	K_1 (GPa)	K_2 (GPa)	K_3 (GPa)	D_1	D_2
數值	250	0	0	0.08	0.7

3.4 接觸模式及邊界條件設置

在 ANSYS/LS-DYNA 數值模擬程序中接觸類型主要有單面接觸、節點與表面接觸和表面與表面接觸等三種，而當一個物體的表面穿透另一物體的表面時，需使用表面與表面接觸。在本研究中投射體與靶板的之間接觸類型均定義為表面與表面接觸類型。

投射體與靶板之間由於侵徹行為而產生損傷，為使其破壞情形更趨於實驗結果，接觸設定選用 CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE。在本研究中對於所有會互相侵徹的各個部件(part)均須設定，若未實施接觸設定，穿靶過程中鄰近陶瓷片將不會產生損傷。設定對象如圖 6 所示，說明如下：

- (1)彈體鋼對彈體鋼。
- (2)彈體鋼對受衝擊陶瓷。
- (3)彈體鋼對鋁背板。
- (4)彈體鋼對受衝擊陶瓷。
- (5)彈體鋼對鋁背板。
- (6)中央受衝擊陶瓷與鋁背板。
- (7)中央受衝擊陶瓷與鄰近陶瓷，共 6 組。

另靶板陶瓷片與鄰近陶瓷片之間的接觸類型屬於單面接觸，當定義為單面接觸時，這個設定係允許數值模型中所有表面都可能發生接觸，因此接觸設定選用 CONTACT_AUTOMATICS_SINGLE_SURFACE；邊界條件依靶材實際固定處設定 Y 軸的移動與 X、Z 軸轉動方向進行約束，以減少模擬計算量與實驗誤差。

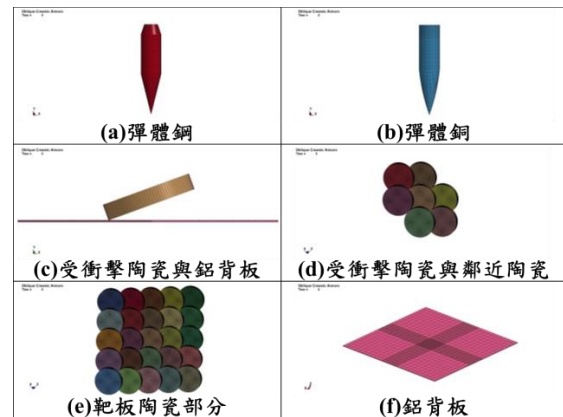


圖6 有限元素模型各部件。

四、測試結果與模擬分析

4.1 彈道測試結果

以 7 mm、8 mm 及 9 mm 等三種陶瓷厚度分別疊層排列成鱗狀測試靶板，各種厚度實施 3 次彈道測試，透過實驗設備量測，獲得投射體初速及貫穿靶板後之末速，並假設在彈體質量守恆條件下換算吸收能，以評估各試片之抗彈能力，測試結果如表 5 所示。

經統計各厚度試片吸收能，並透過迴歸分析得知吸收能趨勢為非線性成長，其提升之抗彈效果在陶瓷厚度從 7 mm 增加至 8 mm 時較 8 mm 增加至 9 mm 時佳(如圖 7)。

另觀察各厚度試片破壞情形，損傷情形均以試片中央受衝擊陶瓷及堆疊成型後受壓之兩片陶瓷片較為嚴重(如圖 8)，並將衝擊之應力波由中心向鄰近接觸陶瓷傳遞，部分裝甲片由於應力波產生裂紋，且陶瓷厚度越厚整體損傷情形越明顯，而裂紋的生成也代表著鄰近陶瓷片對能量吸收具有貢獻，證明仿生鱗狀防護裝甲設計之可行性。

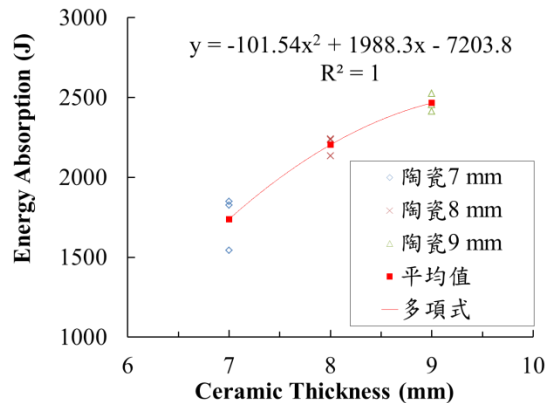


圖7 各厚度試片吸收能量趨勢圖。

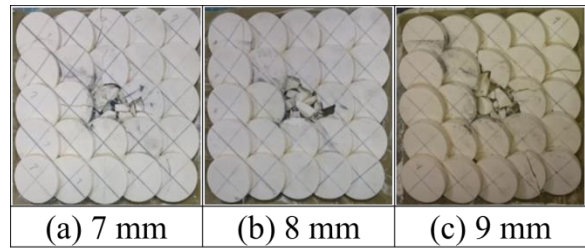


圖8 不同厚度試片穿靶後破壞情形。

表5 不同厚度靶板彈道測試結果

試片編號	陶瓷厚度 (mm)	V_i (m/s)	V_r (m/s)	E_A (J)	Average E_A (J)	標準差
1	7	837	596	1810	1724	137.73
2	7	855	663	1530		
3	7	858	623	1833		
4	8	837	527	2216	2185	48.4
5	8	856	556	2223		
6	8	860	580	2117		
7	9	842	496	2434	2280	109.06
8	9	843	542	2192		
9	9	853	552	2215		

在透過彈道實驗獲得了不同厚度陶瓷片組成鱗甲構型的抗彈性能，以 9 mm 厚陶瓷片抗彈性能最佳，接下來將在抗衝擊之圓形裝甲片為 9 mm 厚度條件下，由 7 mm 厚及 8 mm 厚陶瓷片分別搭配 2 mm 及 1 mm 厚圓型鋁板等 2 種組合製成靶板，分別進行 3 次彈道測試，並與 9 mm 厚陶瓷片無搭配圓形鋁板測試數據進行比較。

測試結果發現抗彈性能以陶瓷 8 mm / 圓鋁板 1 mm 之組合平均吸收能最高，陶瓷 9 mm 部分次之，陶瓷 7 mm / 圓鋁板 2 mm 之組合最差(如表 6)。

試片破壞情形以受衝擊陶瓷及其疊層受壓陶瓷較為顯著，並將撞擊產生之應力波

向受壓側之鄰近陶瓷傳遞(如圖 9)，驗證了鱗狀結構裝甲可有效分散原集中於受衝擊陶瓷之能量。

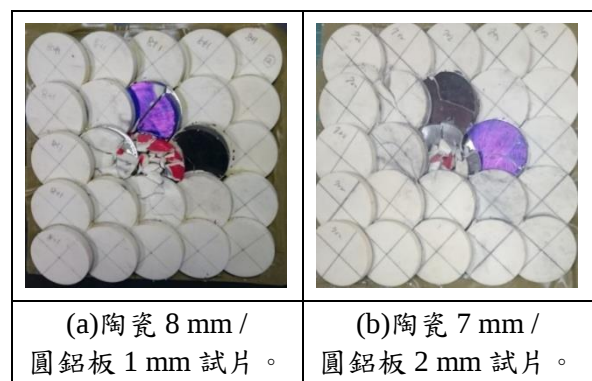


圖9 各組合試片破壞情形。

表6 不同組合靶板彈道測試結果

陶瓷/圓鋁板 組合	試片編號	V_i (m/s)	V_r (m/s)	E_A (J)	Average E_A (J)	標準差
陶瓷 7 mm / 圓鋁板 2 mm	C7A2-1	852	604	1895	1947	39.3
	C7A2-2	854	592	1990		
	C7A2-3	852	594	1956		
陶瓷 8 mm / 圓鋁板 1 mm	C8A1-1	864	567	2237	2316	68.9
	C8A1-2	867	541	2405		
	C8A1-3	835	507	2307		
陶瓷 9 mm/ 圓鋁板 0 mm	C9A0-1	842	496	2434	2280	109.06
	C9A0-2	843	542	2192		
	C9A0-3	853	552	2215		

4.2 數值模擬分析

4.2.1 穿靶過程分析

本研究以 9 mm 厚陶瓷所組成靶板為模擬分析對象，在模擬穿靶過程中發現，投射體與靶板接觸後即產生翻轉效果(如圖 10)，並且在穿靶後偏移原有彈道，除了陶瓷本身硬度對於吸收能量的貢獻外，此為彈體動能消耗的重要因素。

透過彈體殘餘速度圖(如圖 11)得知彈體接近 15 μ s 時開始與靶板接觸，速度因碰撞受到影響於 20 μ s 至 40 μ s 時開始急遽下降，約在 100 μ s 時完成穿靶，速度降幅趨於緩和。

比對應力分布情形(如圖 12)，彈體在 $t=10$ μ s 至 $t=20$ μ s 時與陶瓷表面接觸，應力集中於受衝擊陶瓷片， $t=30$ μ s 時迅速傳遞到鄰近及受壓陶瓷片，受衝擊陶瓷片受力也明顯降低，此時彈體動能大量的被靶板消耗，而彈體在 $t=80$ μ s 穿過陶瓷片後，由於鄰近結構尚保有完整性，使得應力波有效傳遞至周邊接

觸陶瓷片，殘餘應力因此明顯降低，驗證本研究提出仿生魚鱗排列陶瓷裝甲構型抗衝擊之效果與可行性。

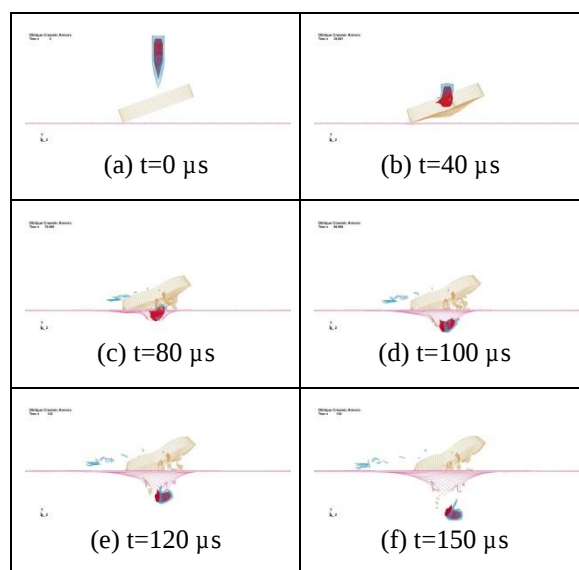


圖10 模擬穿靶過程。

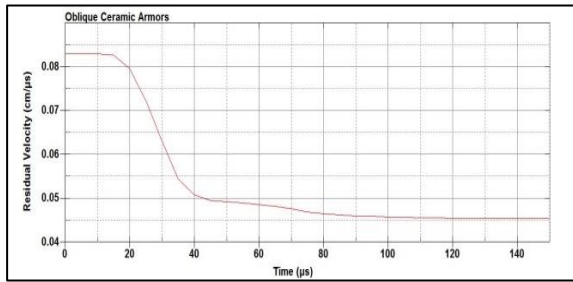


圖11 彈體殘餘速度圖。

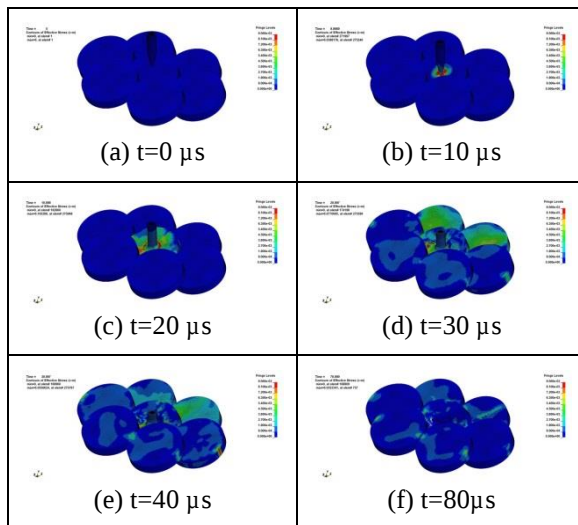


圖12 受撞擊陶瓷及鄰近陶瓷應力分佈。

經由靶板內能曲線圖(如圖 13)得知當彈體開始與靶板接觸後至產生翻轉的這段時間內，靶板整體應變能達到峰值，這表示靶板在這段時間吸收了大量的動能，並於子彈穿靶後趨於緩和，因此在整個過程中，除了陶瓷本身硬度對於吸收能量的貢獻外，彈體翻轉效應亦為動能消耗的重要因素。

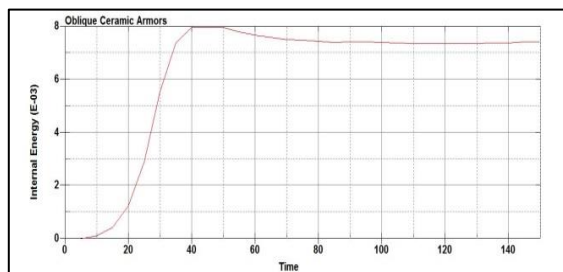
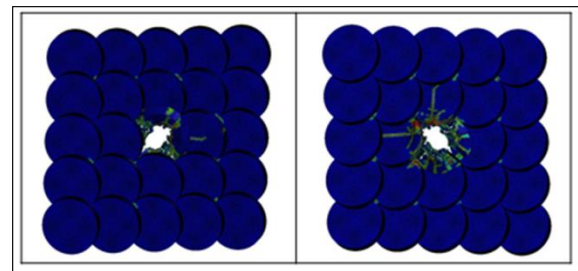


圖 13 靶板內能曲線圖。

4.2.2 損傷模式分析

陶瓷材料屬於脆性材料，其受衝擊後之破壞情形可透過 LS-DYNA 軟體中的損傷模式觀察陶瓷裂紋成長情形(如圖 14)，模擬分析與實際陶瓷片損傷情形趨於一致，在第 3

章所說明之陶瓷損傷模型中的材料常數(D_1 和 D_2)是實驗和模擬的結果反覆推算和比對取得，在本研究中經過實驗與模擬分析結果得知，適用鱗甲構型損傷模型的參數 $D_1=0.08$ ，而 $D_2=0.7$ 。



(a) 靶板正面。 (b) 靶板背面。

圖 14 陶瓷裂紋形成。

五、 結論

本研究探討仿生鱗片陶瓷結構裝甲之抗彈性能，藉由 0.30"穿甲彈撞擊獲取不同厚度與不同組合靶板之抗彈性能，並透過模擬分析與實驗數據進行比對，其研究成果歸納如下：

- (1)經過彈道測試及數值模擬方式驗證後得知，陶瓷堆疊排列方式可將中央陶瓷塊承受的應力波向接觸陶瓷塊傳遞，部分陶瓷由於受應力破壞產生裂紋，裂紋的生成也代表著鄰近陶瓷對能量吸收具有貢獻，就鱗甲結構而言，單塊陶瓷受衝擊後之入射波有效傳遞至鄰近陶瓷，可延遲陶瓷受應力破壞的時間，這有助於抗彈效能的提升，證明仿生鱗狀防護裝甲設計之可行性。
- (2)本研究所測試的陶瓷片厚度為 7 mm、8 mm、9 mm 等三種，不同厚度之測試結果經過迴歸分析得知，靶板陶瓷厚度對子彈動能吸收呈非線性成長，而在陶瓷片厚度自 7 mm 增加至 8 mm 時對本研究鱗甲構型吸收能有較明顯之影響。
- (3)在裝甲片均為 9 mm 厚的條件下，以 8 mm 陶瓷片搭配 1 mm 圓形鋁板抗彈效果最佳，並超越 9 mm 陶瓷片的抗彈效果，顯示本構型斜置結構增加陶瓷片受衝擊的等效厚度，並透過金屬板的支撐，使得陶瓷的抗彈性能提升，然而 7 mm 陶瓷片搭配 2 mm 圓形鋁板抗彈效果不如 9 mm 陶瓷片，主要係靶板斜置陶瓷片雖增加了受衝擊陶瓷的等效厚度，7 mm 陶瓷片等效厚度僅 7.4 mm，仍小於子彈直徑(7.62 mm)，其抵抗能

力無法有效提升。

- (4)經由模擬穿靶過程得知，子彈與陶瓷成非垂直碰撞，除了陶瓷表面承受衝擊時鈍化彈頭外，亦因斜碰撞的原理造成了彈體的轉向，此現象有別於以往平板式拼接裝甲，而彈體撞擊後改變原有飛行姿態，速度也大幅降低，靶板有效吸收子彈衝擊的動能，也驗證了鱗狀排列陶瓷裝甲結構設計之可行性。
- (5)本研究中數值模擬分析所選用的 JH-2 模型，透過實驗與模擬結果的反覆比對，獲取了其損傷模型中適用於鱗甲結構的材料常數，即 $D_1 = 0.08$ ，而 $D_2 = 0.7$ ，可供後續模擬參考運用。

誌謝

本研究承科技部及和成欣業股份有限公司產學合作計畫經費補助(計畫編號 MOST 105-2622-E-606-003-CC3)支持，俾使研究工作順利完成，特此誌謝。

參考文獻

- [1] Mc Cauley, J. W., D'Andrea, G., Cho, K., Burkins, M. S., Dowding, R. J. and Gooch, W. A., "Status Report on SPS TiB₂-TiB-Ti Functionally Graded Materials (FGMs) for Armor," *Report Documentation of U.S. Army Research Laboratory*, pp. 1-26, 2006.
- [2] Rosenberg, Z., "On the Relation between the Hugoniot Elastic Limit and the Yield Strength of Brittle Materials," *Journal of Applied Physics*, Vol. 74, No. 1, pp. 752-753, 1993.
- [3] Duane, S. C., Khahn, B., Christian, K., Grant, M., and Todd, B., "Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna," 4th European LS-Dyna Users Conference, 2003.
- [4] Fawan, Z., Zheng, W., and Behdinan, K., "Numerical Simulation of Normal and Oblique Ballistic Impact on Ceramic Composite Armour," *Composite Structure*, Vol. 63, pp. 387-395, 2004.
- [5] 蔣志剛、申志強、曾首義、譚清華，"穿甲子彈侵徹陶瓷/鋼複合板試驗研究"，彈道學報，第 19 卷，第 4 期，第 38-42 頁，2007。
- [6] Krishnan, K., Sockalingam, S., Bansal, S., and Rajan, S. D., "Numerical Simulation of Ceramic Composite Armor Subjected to Ballistic Impact," *Composite: Part B*, Vol. 41, pp. 583-593, 2010.
- [7] 張新杰，"影響陶瓷裝甲抗彈性能的主要因素"，材料開發與應用，第 27 卷，第 2 期，第 103-106 頁，2012。
- [8] Liu, P., Zhu, D., Yao Y., Wang, J., and Tinh, Q. B., "Numerical Simulation of Ballistic Impact Behavior of Bio-inspired Scale-like Protection System," *Material and Design*, Vol 99, pp. 201-210, 2016.
- [9] 尚曉江、蘇建宇，ANSYS/LS-DYNA 動力分析方法與工程實例，中國水利水電出版社，北京，第 135-138，2006。
- [10] Steinberg, D. J., Equation of State and Strength Properties of Selected Materials, UCRL-MA-106439 Lawrence Livermore National Laboratory, U.S.A., 1996.
- [11] Holmquist, T. J., Johnson, G. R., Grady, D. E., Lopatin, C. M., and Hertel, E. S., "High Strain Rate Properties and Constitutive Modeling of Glass," 15th International Symposium on Ballistics, Jerusalem, Israel, 1995.
- [12] 楊震琦、龐寶君、王立聞、遲潤強，"JH2 模型及其在 Al₂O₃ 陶瓷低速撞擊數值模擬中的應用"，爆炸與衝擊，第 30 卷，第 5 期，2010。
- [13] Holmquist, T. J., Templeton, D. W., and Bishnoi, K. D., "Constitutive Modeling of Aluminum Nitride for Large Strain High-Strain Rate, and High-Pressure Applications," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, pp.211-231, 2001.
- [14] 任會蘭、陳雯、郭婷婷，"陶瓷靶抗侵徹特性的數值模擬研究"，北京理工大學學報，第三十三卷，第二期，第111-115頁，2013。
- [15] 黃欽裕，"功能梯度陶瓷複合材料抗衝擊分析"，博士論文，國防大學理工學院，桃園，第78頁，2017。
- [16] Zhang, X., Hao, H., and Ma, G., "Dynamic Material Model of Annealed Soda-lime Glass," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 77, pp.108-119, 2015.