

鋁合金搭配纖維複材結構抗彈性能分析

陳幼良¹ 王志峯² 林盈志^{3*} 薄慧雲⁴ 倪國裕⁴

¹國防大學理工學院動力及系統工程學系

²國防大學理工學院兵器系統工程研究所

³國防大學理工學院國防科學研究所

⁴軍備局中山科學研究院

摘 要

由於現今科技及武器發展迅速，防彈材料的抗彈性能也不斷提升，因此，透過兩種或兩種以上材料結合成複合材料為解決方法之一。由於複合材料的優異抗彈性能，被廣泛運用在人體防護與軍事裝備如戰甲車輛與艦艇上。本文研究由單一高分子材料與鋁合金材料結合成複合材料板，經由不同組合方式及多層間隙排列的情形下，受 7.62 mm 普通彈正向入射時的抗彈行為。本研究以實驗與有限元素模擬相互驗證，在面密度 16 kg/m² 情形下，探討改變排列位置、不同間隙等參數對複合材料板抗彈性能的影響。

關鍵字：複材板，面密度，LS-DYNA

Ballistic Resistance Capability Analysis of Aluminum Alloy with Fiber Composites

Yu-Liang Chen^{1*}, Chih-Feng Wang², Ying-Chih Lin³, Hui-Yum Bor⁴, and Cuo-Yo Ni⁴

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

²*School of Weapon System Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University*

³*Graduate School of National Defense Science, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University*

⁴*Chung-Shan Institute of Science and Technology, Armaments Bureau*

ABSTRACT

As a result of the current rapid development of technology and weapon, the ballistic resistance capability of the bulletproof material is increasing. Therefore, through the combination of two or more materials into a composite is one of the solutions. The composite materials have been widely applied in body protection and military equipments, such as tank, ship etc., for their outstanding ballistic performance.

The main purpose of this study is to simulate and analyze the ballistic performance of composite material plates made of polymer material and aluminum alloy plate with varying configuration and multi-space under 7.62 mm, full metal jacket (FMJ) bullet normal impact. The main point of this work is to discuss, in the fixed area density 16 kg/m², the ballistic resistance capability of the composite material plates with different arrangement, varied spaces through experiments and simulations.

Keywords: composite plate, areal density, LS-DYNA

文稿收件日期 101.11.19; 文稿修正後接受日期 102.6.24; *通訊作者

Manuscript received November 19, 2012; revised June 24, 2012; *Corresponding author

一、前言

目前海軍服役的大中型艦艇之上層建築和小型高速快艇之艦體，大部分皆使用鋁合金作為船體結構材料。在武器破片之二次殺傷和小口徑武器攻擊下，其鋁質船體結構薄弱的抗衝擊能力，對艦艇、船員及設備的安全具有嚴峻之考驗，故本論文針對鋁質艦體輕型複合裝甲抵禦小口徑武器攻擊之抗彈性進行評估。

近年來單一材料已不能滿足使用者之需求，故將兩種或兩種以上材料製成複合材料，用來解決單一材料在使用上之性能弱點，以成為目前發展之新趨勢。複合材料是經由兩種或兩種以上不同性質、不同結構的物質組合而成，通常是由補強材料(Reinforcement)和基材(Matrix)所構成，依照使用者需求選取不同組合而成之材料藉由採用最佳之複合材料來提升其材料本身之性能[1]。故透過各種材料之組合排列，促使改變原單一材料之特性，發展出各種新性能，以達到材料結合使用之目的，並進而提升其價值與經濟效應。尤其是目前國內針對防彈複合材料之研究並不多見，更是一亟待開發與重視之新領域，相關參考文獻如下：

1987年，鍾湘台，以不同層數、厚度、排列次序等參數，探討鋁/克維拉混成複合材料之抗彈性能。其研究結果證實在相同面積密度下，Al/Kv-Ep 抗彈性能會優於單一的鋁合金[2]。

1998年 Espinosa 將 10、20 及 40 三種不同長徑比(L/D)之投射體，針對多層靶板貫穿行為之數值模擬分析研究[3]。

1999年，宋力於「纖維增強鋁層壓板複合材料的彈道衝擊貫穿」指出，利用纖維與鋁板間之組合，探討各式纖維之抗衝擊能力，其結果得知玻璃纖維較其他兩種纖維組合為佳[4]。

2002年，呂逸豐以 Aramid 及 E-Glass 複材板在總厚度限制下之抗彈性能，以不同厚度、不同排列位置及 2 mm 固定間隙排列位置不同為參數。其研究結果得知對無間隙之混層複材板，在面密度相同情形下，E-Glass 複材板排列位置在前會有較高之抗彈性能，且以 2 mm 固定間隙排列位置，因

E-Glass 複材板造成模擬投射體入射角度偏轉，而使抗彈性能提升[5]。

2005年，梅志遠於「彈道衝擊下層合板破壞模式及抗彈性能實驗研究」指出，以艦用輕型複合裝甲研究為背景，針對不同纖維增強種類，得到各種纖維面密度吸能，進而比較其優劣[6]。

同年，王元博等人針對 Kevlar 纖維增強層合材料為研究對象，通過彈道衝擊試驗，研究疊層板之抗彈性能，分析投射體、纖維鋪設方式及板厚等因素對靶板抗侵徹能力之影響，同時對靶板之破壞模式作分析、比較。此外，使用一種工程近似方法，其預測值與實驗質具有良好之一致性[7]。

2006年，梅志遠於「鋁質艦體輕型複合裝甲試驗研究」指出，以纖維複合材料模擬鋁質艦體，並採用 Kevlar、玻纖、Spectra 及鋁板等材料實施組合，且以無間隙及單間隙之排列方式，選用 7.62 mm 制式彈藥實施射擊，其實驗結果得知，以複合材料作為防彈材料，比純粹鋁質材料之防彈性能，有較好地防禦小口徑武器之攻擊[8]。

2008年，管公順對鋁雙層板結構撞擊損傷的板間距效應實驗為研究目標，在面對超高速撞擊實驗下，得到了鋁雙層板結構在不同撞擊速度的厚板損傷模式，其結果得知，子彈撞擊速度一定時，後板彈坑分布隨前後板間距之不同而不同，前板背面返濺影響區和後板彈坑分布區隨板間距之增大而增大[9]。

本研究區分兩階段，第一階段運用顯性積分有限元素軟體 LS-DYNA 3D 來進行模擬，其範圍包括投射體貫穿靶體後之殘餘速度分析及不同排列位置下抗彈性能模擬分析，並將模擬分析結果與射擊實驗結果實施比對，以驗證模擬之正確性；第二階段以無間隙及多層間隙組合形成之抗彈複材板進行實驗。將鋁合金板與超高分子量聚乙烯纖維複材板在面密度、間距及排列方式等參數改變下，藉由觀察其破壞情形，闡明上述因子對抗彈性能之影響。

二、抗彈複合材料實驗

彈道測試實驗最主要之目的，在於使抗彈材料經不同實驗規劃及條件參數設定，藉

由測試後所得之相關參數及結果，進行分析比對，做為往後相關結構之設計、模擬參數之修正及抗彈性能評估之參考。

2.1 防彈原理線

疊層板的防彈原理為藉由 (1) 拉伸破壞：當子彈作用於疊層板之纖維時，纖維受到拉伸變形，子彈部分動能被纖維吸收進而造成纖維斷裂。(2) 剪切破壞：當疊層板受到子彈侵蝕時，沿厚度方向被破壞而形成充塞效應，子彈大部分動能被疊層板所吸收。(3) 脫層破壞：層壓板受到子彈衝擊，子彈與纖維接觸位置產生應力波，且沿層壓板厚度傳遞，並在織物表面發生反射波，此反射波與另一個應力波產生反方向之應力作用，導致疊層板之脫層現象[10]。

而要將入射物能量消耗，主要有三種方式[11]：

(1) 入射物(Projectile)之鈍化：

目的在將部分能量轉移至塑性變形能，入射物塑性變形越大，能量就消耗越多，尖型入射物較其他外形入射物有較高之穿入及穿透材料的能力，故入射物經鈍化後，此能力急速減弱。

(2) 入射物之破裂：

當入射物有大量變形發生時，其跟隨而來就是入射物破裂行為，這是入射物另一種能量消耗之方式。

(3) 靶板破裂與變形：

為整個裝甲防護系統消耗能量之主要源。靶板塑性變形越大，能量消耗越多。低硬度、低強度及低勁度的材料較有此現象產生。相反地，此種材料卻不易鈍化入射物，使入射物反而易穿入及穿透靶板，故將重點擺放於塑性變形能，反而會失去裝甲防護功能。若靶板採高硬度、高強度的材料，雖能鈍化入射物並因靶板之破裂而消耗能量，然靶板破裂後已降低或失去其抗彈性能。故在設計時需考慮不同材料之特性兼顧能量與抗彈性能之要求。

2.2 實驗規劃

本研究實驗部份主要目的為探討鋁合金板與超高分子量聚乙烯纖維以不同組合及多層間隙方式提升整體之抗彈性能，並分

析其彈道特性和破壞情形，以探討複材板之抗衝擊能力。實驗測試在撞擊速度847(m/s)的條件下，對複材板進行抗彈性能測試，再將測試後的結果進行紀錄統計，

藉以求得彈道極限速度及貫穿後的殘餘速度，作為評估鋁合金與超高分子量聚乙烯纖維靶板吸收能量的計算依據。最後，將殘餘速度實際量測參數或破壞情形與模擬結果比對分析，作為修正數值模擬相關之參數，使模擬結果更趨真實。

2.3 試片參數設定

本實驗所運用材料包含6061-T651鋁合金板(Aluminum)、高強力UD纖維(Dyneema HB2)等二種材料，試片尺寸：200mm×200mm，6061-T651鋁合金板在溫度24(°C)時，抗拉強度310MPa，降伏強度276MPa，伸長率為17%，Dyneema拉伸強度為3.9GPa、拉伸模量為137GPa、伸長率為2.7%、密度0.97g/cm³。

其基本構形如圖2.1所示，試片編號方式為#A-#S-#D，如圖2.2所示。以#A-#S-#D為例，其中

#：表示材料厚度或間隙距離，以 mm 為單位

A：表示6061-T651鋁合金板材料。

S：表示於兩種材料中間加入間隙 Space，間隙固定為30 mm。

D：表示Dyneema HB2 材料。

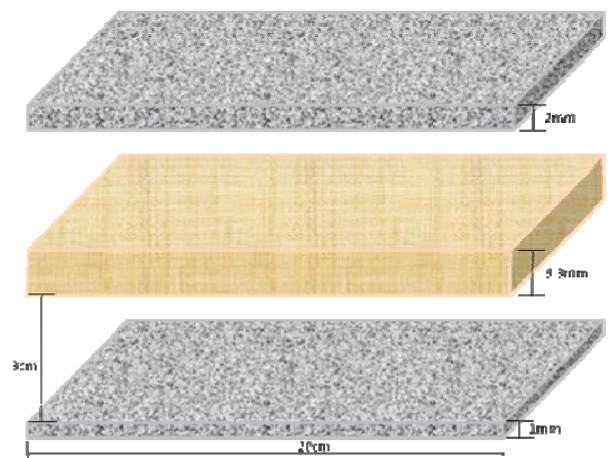


圖2.1 混層複材板基本構形示意圖。

例：3A9.3D即表示3 mm 厚之鋁合金板與9.3 mm厚之Dyneema複材板，兩者為密合無間隙。

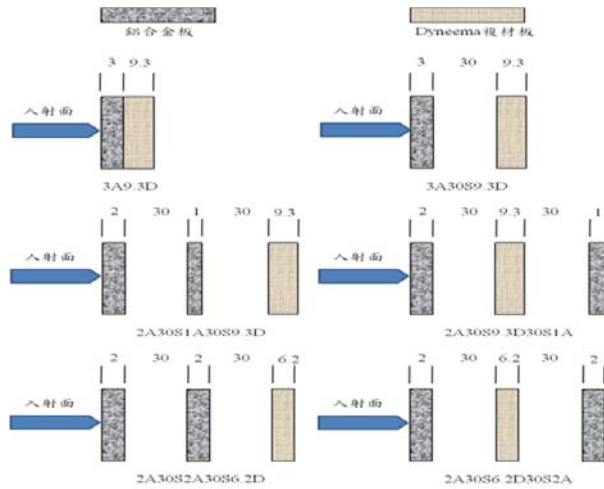


圖2.2 混層複材板組合型態示意圖。

2.4 槍擊測試結果

探討鋁合金板與Dyneema HB2複材板槍擊試驗後之破壞現象，本實驗用實彈之射擊速度為847 m/s，測試結果如表2.1所示

表2.1 測試紀錄表

射擊順序	各型間隙組合型式	面密度 (kg/m ²)	入射速度 (m/s)	殘餘末速 (m/s)
1	3A9.3D	15.93	850.5	731.1
			847.7	737.8
2	3A30S9.3D	15.91	850.2	745.7
			849.9	735.6
3	2A30S9.3D30S1A	15.83	841.1	694.4
			847.9	707.7
4	2A30S1A30S9.3D	16.00	850.2	712.4
			847.7	718.5
5	1A30S9.3D30S2A	15.98	843.4	720.3
			846.0	722.4
6	1A30S2A30S9.3D	15.89	849.5	729.4
			850.2	729.8
7	4A6.2D	15.88	861.0	763.0
			856.7	763.0
8	4A30S6.2D	15.98	849.7	765.0
			850.8	768.6
9	2A30S6.2D30S2A	15.87	859.6	763.4
			854.5	754.5
10	2A30S2A30S6.2D	15.96	849.7	772.2
			849.6	768.7
11	1A30S6.2D30S3A	15.90	849.9	748.7
			849.3	746.5
12	1A30S3A30S6.2D	15.76	843.6	766.8
			852.5	772.9
13	3A30S6.2D30S1A	15.88	844.5	766.9
			842.8	769.1
14	3A30S1A30S6.2D	15.86	837.5	754.9
			841.0	757.9

三、數值模擬分析

3.1 軟體簡介

LS-DYNA 是目前最受人們使用之非線性有限元素分析軟體，能夠有效模擬各種複雜問題，應用之範圍包括生物力學、板金成型、掉落與撞擊測試、飛彈爆炸、葉片鳥擊、汽車撞擊等問題，且已經廣泛的被運用在電子、汽車、航太、機械等工業領域，本文選用之LS-DYNA模擬軟體進行數值分析，其模擬選項包括元素種類、材料選用、邊界設定等條件，最後比對實驗數值結果與模擬數值結果，作為對混層間隙複材板抗彈性能分析之相關參數修正。

3.2 數值模擬選用與計算條件

LS-DYNA 3D模擬軟體內數值包含材料種類、單位種類、模型種類、邊界條件設定等模擬選擇項目，在開始進行模擬疊層複材衝擊前，需選出最合適模擬環境及符合實際物理現象之計算種類，這些種類包含數值的單位、材料性質之模式、簡化模型、邊界條件、接觸模式、網格(Mesh)大小等條件，才能使模擬結果與實際狀況相結合。

3.3 模型建立與描述

- (1)模型建立時，選用Lagrange演算法，所有物理量值及建模的單位，皆採用cm、gram、microsecond來輸入參數。
- (2)建立簡化模型時，區分複合材料結構靶板及投射體二部分，靶板以長寬為10 cm×10 cm 的尺寸來建立1/4對稱模型，以節省電腦運算所需時間。
- (3)7.62 mm投射體模型建立

投射體為直徑7.62 mm投射體，包含銅及鉛兩種金屬，建模時分成兩個部分，且在投射體部分網格劃分時與靶板均採用八節點六面體固體元素(SOLID 164)，網格大小均相同，以增加數值計算之準確性，其網格數分為銅176個，鉛128個，如圖3.1所示。另在模擬時設定子彈初速度與實彈之射擊初速度相同，使用模擬與實彈之殘餘速度進行比對。

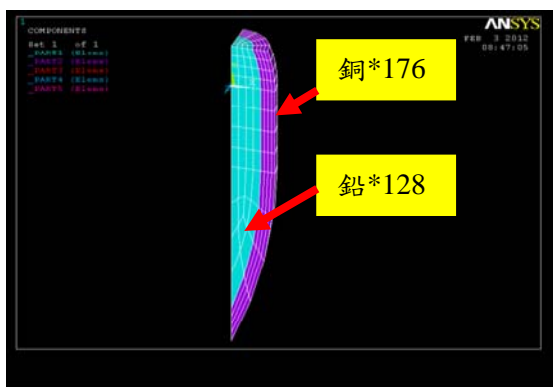


圖3.1 7.62(mm)投射體模型。

(4)複材板模型建立

建立1/4複材板靶體模型，長寬各為10 cm，厚度依序為0.2 cm鋁板、0.93 cm纖維板、0.1 cm鋁板，靶體網格數為鋁板7,500個及纖維板22,500個，如圖3.2所示。

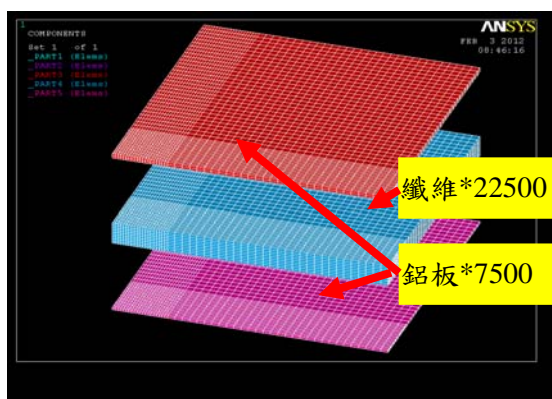


圖3.2 複材板模型。

(5)材料參數之選定

模型的建構時，在選擇材料方面，區分投射體及兩部分，投射體、鋁質靶板及纖維靶板材料特性如表3.1~表3.3所示，因7.62 mm FMJ 投射體為銅包鉛材質，而Kurtaran[12]於2003年發表對防彈車輛的板金抗彈模擬研究中，其鈹金材料亦採用10號材料來作運算，10號材料為一種憑藉應變率來控制的彈塑性材料模型，對金屬遭撞擊變形的模擬，需搭配適當的破壞準則進行；10號材料也可配合不同金屬之狀態方程式來描述遭撞擊時材料之變形狀況。

表3.1 投射體材料參數值 (針對10號材料)

	密度 ρ_0 (g/cm ³)	剪力模數 G(Mbar)	降伏強度 Y_0 (Mbar)	塑性硬化指數 E_h (Mbar)
鉛	11.34	0.086	8E-5	2.1E-4
銅	8.93	0.477	1.2E-3	2.88E-3

表3.2 鋁質靶板材料之屬性 (針對3號材料)

	密度 ρ_0 (g/cm ³)	剪力模數 G(Mbar)	降伏強度 Y_0 (Mbar)	塑性硬化指數 E_h (Mbar)	損蝕失效應變 fs
鋁	2.7	0.26	2.7E-3	2.35E-3	0.3

表3.3 超高分子量聚乙烯纖維材料之屬性 (針對22號材料)

ρ [g/cm ³]	$E_{11,22}$ [GPa]	E_{33} [GPa]	ν_{21}	$\nu_{31,32}$	G_{12} [GPa]	$G_{23,31}$ [GPa]
0.97	22	5	0.25	0.3	0.77	2.715
X_t [MPa]	Y_t [MPa]	X_c [MPa]	Y_c [MPa]	S_{12} [MPa]	$S_{23,31}$ [MPa]	ϵ_t
911	911	911	911	442	315	0.03

ρ : 密度, E_{ij} : 楊氏模數, G_{ij} : 剪切模數, ν_{ij} : 波松比
 X_t, X_c : x 軸方位拉伸、壓縮最大強度
 Y_t, Y_c : y 軸方向拉伸、壓縮最大強度
 S_{ij} : 剪切強度值, 下標1-3材料軸方向, ϵ_t : 拉伸失效應變

故投射體材料參數區分為銅及鉛材料輸入，在材料參數使用上採用具有彈塑性材料模式MAT_ELASTIC_PLASTIC_HYDRO (10號材料)設定。在靶板材料參數的使用上，6061-T651 鋁板以 MAT_PLASTIC_KINEMATIC (3號材料)彈塑性體進行模擬與實驗狀況較相符。另將超高分子量聚乙烯纖維疊層屬假設為理想正交性均質材料纖維排列角度[0/90]方式編織，在超高分子量聚乙烯纖維疊層選用上，使用LS-DYNA所提供Mat_COMPOSITE_DAMAGE (22號材料)材料參數，來進行模擬。

3.4 接觸模式

一般而言，LS-DYNA在進行高速貫穿模擬時，常採用材料失效和侵蝕接觸(Eroding Contact)之接觸方式，其優點相較於其他接觸種類，所花費的計算時間可大幅減少，故本文在設定數值模擬接觸模式時，投射體與靶板之間採用定義為CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE，靶板與靶板之間定義亦為CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE，以利後續投射體和各個疊層靶撞擊之間接觸的設定和計算。

3.5 邊界條件

在數值模擬之邊界條件設定計有兩種設定：第一種為非反射面 BOUNDARY_NON_REFLECTING 邊界設定，因實際試片為 20cmx20cm 之靶板，對模擬試片而言，靶板邊界之應力波尚未反射，仍然向外擴張；第二種為設定對稱平面 BOUNDARY_SYMMETRY_FAILURE，因本文所建立之模型為四分之一的模型，在符合其物理特性（移動、轉動）情況下，針對對稱面給予限制。上述兩種設定其目的在於模擬現實條件下，減少運算程式時所產生的錯誤及減少電腦不必要的資源浪費。

四、結果分析與討論

4.1 無(單)間隙組合殘餘速度實驗與模擬分析

無間隙及單間隙抗彈複材板實驗與數值模擬結果如表 4.1 所示，以 3A9.3D 無間隙複材板抗彈性能較優於其他組合，說明較薄的鋁板在前搭配較厚的纖維板在後可得到最佳的抗彈效果；此外，間隙效應在本研究並未產生效果，或許是本研究所取的間隙為約等於投射體長度的 30 mm，不足以讓投射體產生偏離而降低其侵徹力之故。另模擬與實驗之數據整體誤差值均在 3% 以內，說明所建立的模型與選用的材料參數均屬合理。

表 4.1 無、單間隙抗彈板實驗與模擬結果

各型間隙組合型式	平均實驗末速 (A) (m/s)	模擬末速 (B) (m/s)	平均吸能值 (J)	誤差值 (C) (%)
3A9.3D	734.4	753.4	880.7	2.6
3A30S9.3D	740.7	755.5	843.8	2.0
4A6.2D	763.0	773.4	753.7	1.4
4A30S6.2D	766.8	769.5	654.5	0.4

$$\text{註：} C = \frac{|A-B|}{A} \%$$

4.2 多間隙組合之殘餘速度實驗與模擬分析

(1) 多間隙 30 層抗彈複材板實驗與模擬結果如表 4.2 所示，在 30 層纖維布以 2A30S9.3D30S1A 複材板抗彈性能較優於其他組合，這說明了三明治結構前後層為鋁板，中間夾層為纖維可收到最大抗彈效果。模擬與實驗之數據整體誤差值均在 2% 以內。

表 4.2 多間隙(30層)抗彈板實驗與模擬結果

各型間隙組合型式	平均實驗末速 (A) (m/s)	模擬末速 (B) (m/s)	平均吸能值 (J)	誤差值 (C) (%)
2A30S9.3D30S1A	701.1	700.3	1075.0	0.1
2A30S1A30S9.3D	715.5	724.8	1012.8	1.3
1A30S9.3D30S2A	721.4	732.9	936.8	1.6
1A30S2A30S9.3D	729.6	735.4	921.0	0.8

$$\text{註：} C = \frac{|A-B|}{A} \%$$

(2) 多間隙 20 層抗彈複材板實驗與模擬結果如表 4.3 所示，在 20 層纖維布以 2A30S6.2D30S2A 抗彈複材板抗彈性能較優於其他組合，結果顯示和多間隙 30 層之抗彈效果具有一致性，亦即前後層為鋁板，中間夾層為纖維。模擬與實驗之數據整體誤差值均在 6% 以內。

表 4.3 多間隙(20層)抗彈板實驗與模擬結果

各型間隙組合型式	平均實驗末速 (A) (m/s)	模擬末速 (B) (m/s)	平均吸能值 (J)	誤差值 (C) (%)
2A30S6.2D30S2A	758.9	765.5	768.9	0.9
2A30S2A30S6.2D	765.6	762.4	658.8	0.4
1A30S6.2D30S3A	767.2	790.7	644.8	3.1
1A30S3A30S6.2D	769.8	796.0	613.5	3.4

3A30S6.2 D30S1A	768.0	784.9	590.9	2.2
3A30S1A 30S6.2D	756.4	796.9	640.9	5.3

(3) 在14組組合中可清楚看出，在面密度相當情形下，任一30層纖維織物無間隙、單間隙及雙間隙組合皆優於20層纖維織物之不同排列組合，此形成原因為纖維織物的拉伸斷裂、應變能量、密度等吸能特性而具有良好之抗彈效率，較鋁板增厚對抗彈性能有更佳之貢獻度。殘餘速度隨時間變化如圖3.3所示。

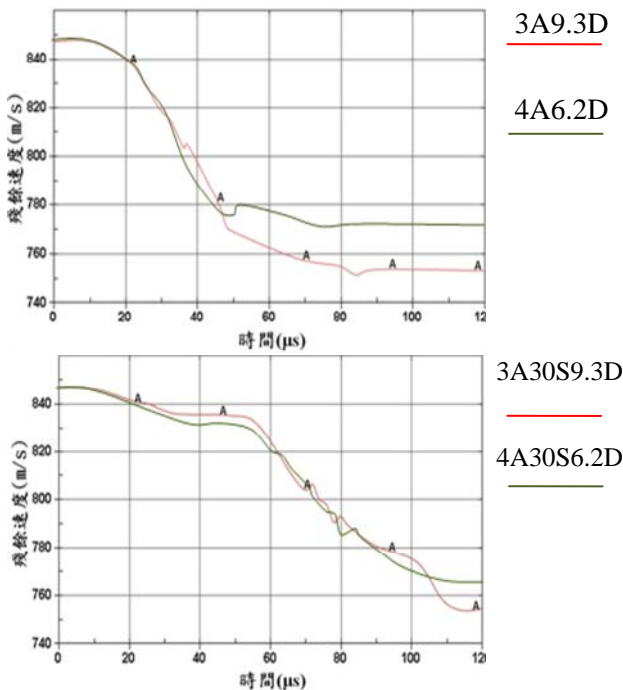


圖3.3 單、無間隙速度分析。

(4) 纖維織物20層組合中，2A30S6.2D30S2A的吸收能較其他組合之抗彈能力佳，與30層最佳組合同樣是將纖維板置於中間層，可得知，投射體撞擊第一塊鋁板時可先損耗部分動能，再經纖維織物拉伸破壞有效降低投射體速度，最後由背襯鋁板抵消投射體部分動能。如圖3.4-圖3.5所示。

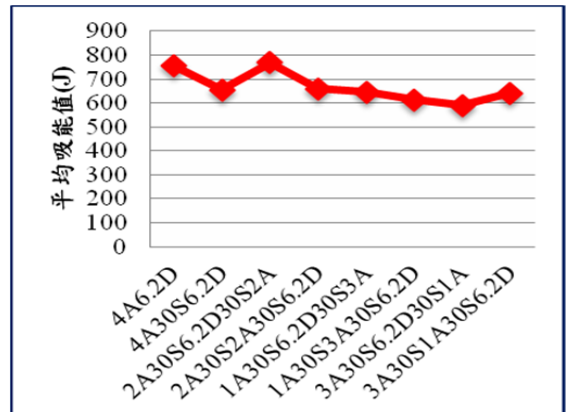


圖3.4 20層抗彈複材板吸能圖。

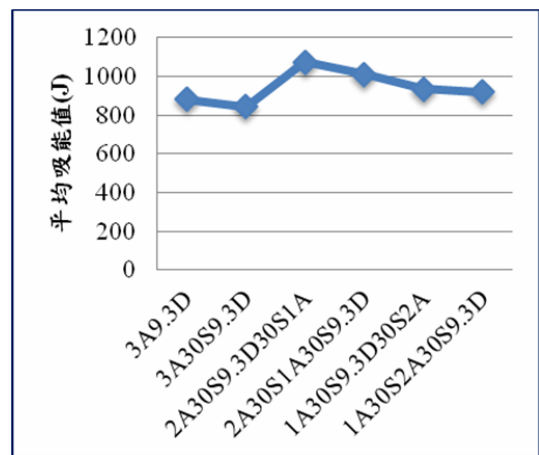
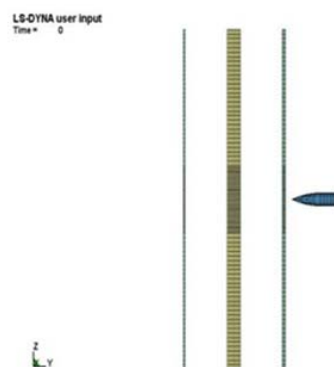


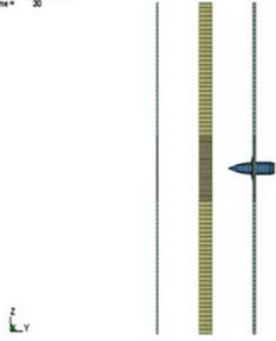
圖3.5 30層抗彈複材板吸能圖。

(5) 觀察雙間隙組合，可得知將纖維板置於中間位置，其抗彈性能皆優於將纖維板置於背襯板。圖3.6模擬中顯示，投射體在貫穿纖維板時，投射體又接觸背襯鋁板，故投射體同時會因為纖維板之脫層、拉伸破壞及鋁板延性擴孔破壞，致速度大幅下降，達到較佳之抗彈效果。



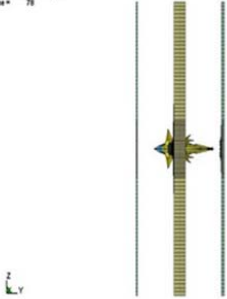
(a) $t=0 \mu s, V_r=847 (m/s)$ 。

LS-DYNA user input
 Time = 30



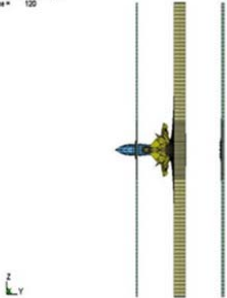
(b) $t=30 \mu s$, $V_r=840$ (m/s)。

LS-DYNA user input
 Time = 75



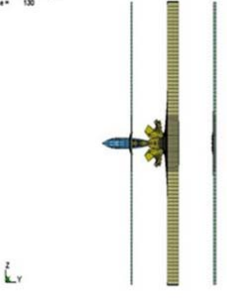
(c) $t=78 \mu s$, $V_r=792$ (m/s)。

LS-DYNA user input
 Time = 120



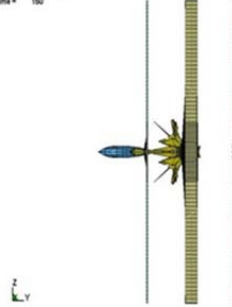
(d) $t=120 \mu s$, $V_r=738$ (m/s)。

LS-DYNA user input
 Time = 130



(e) $t=130 \mu s$, $V_r=701$ (m/s)。

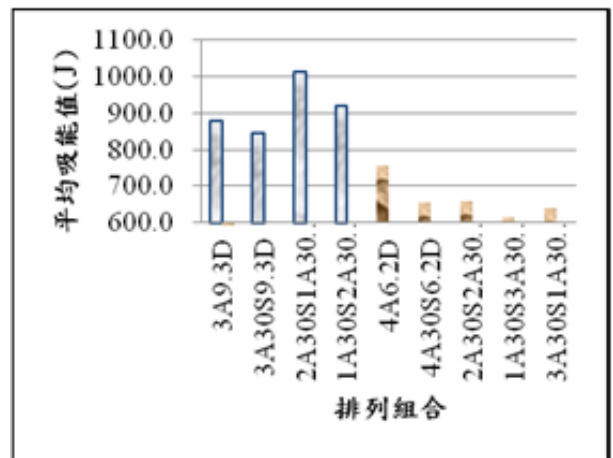
LS-DYNA user input
 Time = 150



(f) $t=150 \mu s$, $V_r=700$ (m/s)。

圖3.6 投射體撞擊靶板破壞模擬。

(6) 當背襯板為纖維疊層板時，投射體在貫穿鋁板因厚度不足以讓投射體產生變形，需由背襯板纖維編織的高強度特性吸收能量，使抗彈效果提升。故纖維疊層板在厚度增加時，纖維之斷裂、彎曲、脫層破壞效應完全發揮，可大幅抵消投射體剩餘能量，達到較佳抗彈性能，平均吸能統計如圖3.7所示。



30層 20層

圖3.7 抗彈複材板平均吸能統計。

(7) 在本實驗所設定之參數中，比較纖維織物30層組合，2A30S9.3D30S1A吸收能較其他組合有較好之抗彈能力。在總實體厚度固定下而間距若大於投射體之特徵長度時，其雙間隙抗彈性能較總厚度相同之無間隙靶板為佳；另無間隙由於整體彎曲變形所引起之作用較單間隙大，而有更佳之抗彈性能；由外觀觀察而言，將實驗與模擬進行比對，結果顯示各層靶板破壞與模擬相近，實驗與模擬分析如圖3.8所示。

伍、結論與建議

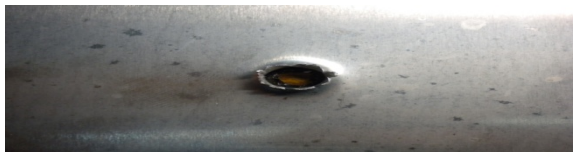
本研究為以超高分子量聚乙烯纖維織物及鋁合金板以無間隙、單間隙及雙間隙之不同排列組合，在面密度為相當 $16(\text{kg}/\text{m}^2)$ 情形下，遭受 $7.62(\text{mm})$ 普通彈以 $847(\text{m}/\text{s})$ 速度衝擊來加以探討其抗彈性能，並完成相關槍擊試驗、撞擊模擬後，依據實驗現象之觀察、模擬比對作抗彈能力分析。

5.1 研究結論

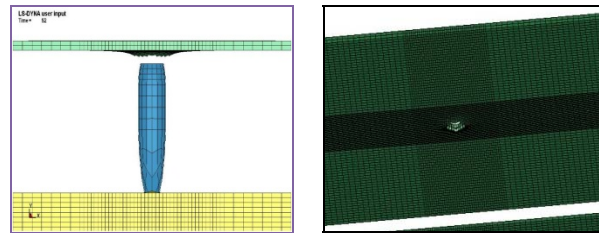
經以上各節分析討論及射擊實驗過程，綜整出以下之結論：

- (1)使用ANSYS/LS-DYNA有限元素分析軟體，建立超高分子量聚乙烯纖維織物與6061-T651鋁板進行模型分析，將數值模擬分析的殘餘速度與槍擊實驗實施比較，其誤差值都在6%以內說明所建立的模型與選用的材料參數合理，計算的結果有一定之可信度，可供後續類似實驗項目先行實施模擬分析，再完成槍擊實驗，有效降低成本及時間之損耗。
- (2)在無間隙與單間隙之4組抗彈性能比較，可得知在面密度相當情形下，互相比較無間隙及單間隙之吸收動能，得到結果皆是無間隙抗彈性能優於單間隙，推測為間隙約等於投射體長度，不足以讓投射體產生偏離而降低其侵徹力之故。
- (3)在雙間隙10組不同排列組合中，可得知超高分子量聚乙烯纖維織物在置放於中間層較優於置放在背襯板，且在面密度相當情形下，前後鋁板厚度相同時，會比前薄後厚或前厚後薄之排列組合有更好之抗彈性能。

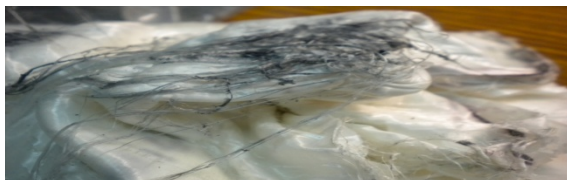
(4)在數值模擬過程中，投射體的網格建立是非常困難的，尤其投射體包含兩種不同之材料，且投射體形狀為尖形，在作網格切割時，若投射體與靶體接觸面的網格大小相同，在有限元求解力量傳遞及時間間隔運算時，比較不容易產生負體積形成發散，造成無法繼續運算的結果，此外，投射體尖端的網格劃分也要較投射體其他部份為細，故在建立網格時應特別注意網格大小與數量，以兼顧運算的準確性與運算時間的節省。



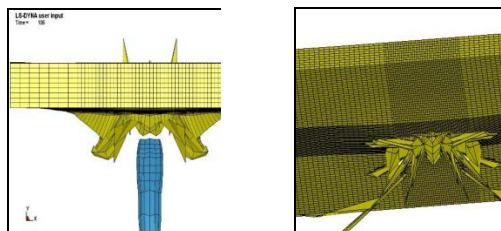
(a)2A30S9.3D30S1A第一層靶板(背彈面)受實彈撞擊破壞狀況。



(b)2A30S9.3D30S1A第一層靶板(背彈面)受模擬撞擊破壞狀況。



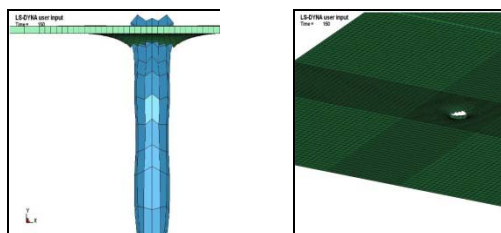
(c)2A30S9.3D30S1A第二層靶板(纖維板)受實彈撞擊破壞狀況。



(d)2A30S9.3D30S1A第二層靶板(纖維板)受模擬撞擊破壞狀況。



(e)2A30S9.3D30S1A第三層靶板(背彈面)受實彈撞擊破壞狀況。



(f)2A30S9.3D30S1A第三層靶板(背彈面)受模擬撞擊破壞狀況。

圖3.8 實驗與模擬比較圖。

5.2 後續研究建議

本論文僅針對超高分子量聚乙烯纖維織物及鋁合金板以無間隔、單間隔及雙間隔遭受不同速度衝擊來加以研究探討，對於未來抗彈複合材料在實驗及模擬之驗證分析，以下幾點研究方向及建議，供有興趣人員參考。

- (1) 本文以抗彈材料超高分子量聚乙烯纖維及鋁合金板為主要模擬分析及測試對象，可增加多種材料進行比較分析，改變其組成之面密度配比、間隙寬度及排列次序等參數，並輔以數值模擬加以分析驗證，得到最佳抵抗不同速度之組合方式。
- (2) 速度對於抗彈性能來說相對重要，由於本實驗射速限制於847(m/s)的抗衝擊性能分析，建議可運用不同速度差，比較高速與低速衝擊下的抗彈性能差異。
- (3) 在撞擊入射方面本論文採投射體正向(90°)撞擊不同組合之抗彈複材板。然在實際碰撞問題中，正向垂直入射僅是所有撞擊之其中一種情況，斜入射仍佔有絕大部份之比例，建議可變化不同之入射角度參數，進一步探討以不同入射角度對抗彈複材之影響。
- (4) 在材料破壞準則方面，建議可選擇不同投射體形狀實施撞擊測試，進一步探討不同投射體破壞模式對於複材板抗彈性能之影響。

參考文獻

- [1] 陳弘昌，“複合材料抗彈性能評估研究”，碩士論文，國防大學中正理工學院兵器系統工程研究所，桃園，第 1-60 頁，2004。
- [2] 鍾湘台，“鋁/克維拉混成複合材料抗彈性能之研究”，碩士論文，國防大學中正理工學院兵器系統工程研究所，桃園，第 1-30 頁，1986。
- [3] Espinosa, H. D., Dwivedi, S., Zavattieri, P. D., and Yuan, G., “A Numerical Investigation of Penetration in Multilayered Material/Structure Systems,” *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 22, pp. 2975-3001, 1998.
- [4] 宋力、胡時勝，“纖維增強鋁層壓板複合材料(FRALL)的彈道衝擊貫穿”，*彈道學報*，第 11 卷，第 2 期，第 1-4 頁，1999。
- [5] 呂逸豐，“探討混層及間隙複合材料抗彈性能研究”，碩士論文，國防大學中正理工學院兵器系統工程研究所，桃園，第 62-63 頁，2002。
- [6] 梅志遠、朱錫、任春雨、侯海量、洪江波，“彈道衝擊下層合板破壞模式及抗彈性能實驗研究”，*海軍工程大學學報*，第 16 卷，第 1 期，第 1-5 頁，2005。
- [7] 王元博、王肖鈞、胡秀章、王峰，“Kevlar 層合材料抗彈性能研究”，*工程力學*，第 22 卷，第 3 期，第 76-81 頁，2005。
- [8] 梅志遠、譚大力、朱錫、劉潤泉，“鋁質艦體輕型複合裝甲試驗研究”，*爆炸與衝擊*，第 26 卷，第 2 期，第 1-6 頁，2006。
- [9] 管公順、朱耀、遲潤強、哈跃、龐寶君，“鋁雙層板結構撞擊損傷的板間距效應實驗研究”，*材料科學與工藝*，第 16 卷，第 5 期，第 1-4 頁，2008。
- [10] 丁書禎，“淺談單兵防護裝備的現況與發展”，*高科技纖維與應用*，第 25 卷，第 2 期，第 14-18 頁，2000。
- [11] 趙國志，“穿甲工程力學”，兵器工業出版社，北京，第 143-146 頁，1992。
- [12] Kurtaran, H., Buyuk, M., and Eskandarian, A., “Ballistic Impact Simulation of GT Model Vehicle Door Using Finite Element Method,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 40, pp. 113-121, 2003.