

## 高強力纖維不同組合方式之抗彈能力分析

陳幼良<sup>1\*</sup> 吳俊育<sup>1</sup> 朱政崑<sup>2</sup> 薄慧雲<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 國防大學理工學院動力及系統工程系

<sup>2</sup> 國防大學理工學院國防科學研究所

<sup>3</sup> 中山科學研究院

### 摘要

本論文在探討兩種高分子纖維材料（芳香族聚醯胺纖維、超高分子量聚乙烯纖維(PE)）以不同的編織方式（單向角度鋪層(UD)、梭織）組合，受到 9 mm 手槍彈正向（90°）入射時之抗彈行為。針對不同材料和不同編織方式在總層數相同、不同厚度比例變化下，得到最佳抗彈性能組合。根據槍擊試驗及數值模擬結果，芳香族聚醯胺纖維梭織布與 UD 結構織物疊層，隨著面密度增加時 UD 結構織物的抗彈極限速度(V<sub>50</sub>)趨勢往上升，而梭織布 V<sub>50</sub> 增加趨勢趨緩。在複合纖維材料組合下，以 400 m/s 左右速度撞擊複合纖維組合靶板，得到在經濟考量下最佳抗彈組合。

**關鍵詞：**芳香族聚醯胺纖維，超高分子量聚乙烯纖維，單向角度鋪層，梭織，抗彈極限速度

## Ballistic Resistance Analysis of High Strength Fibers with Different Combination

Yu-Liang Chen<sup>1\*</sup>, Chun-Yu Wu<sup>\*</sup>, Cheng-Kun Chu<sup>2</sup> and Hui-Yum Bor<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Department of Power Vehicle and Systems Engineering, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University

<sup>2</sup>School of Defense Science, Chung-Cheng Institute of Technology, National Defense University

<sup>3</sup>Chung-Shan Institute of Science and Technology

### ABSTRACT

The objective of this paper is to analyze the ballistic resistance behavior of two macromolecular polymer materials (Aromatic Polyamide, UHMWPE) with different combination and weave (Unidirectional, Tatting) experiencing normal impact of 9 mm Full Metal Jacket (FMJ) bullet. The optimal ballistic resistance capability of materials with different weave and ratio of thickness was obtained. According to simulation and impact experiments, ballistic limit (V<sub>50</sub>) of both Aromatic Polyamide woven and UD laminated increases with the increasing area density but UD keeps constant increasing rate while woven fabric turns smooth. In economic consideration, the optimal ballistic resistance of compound fiber materials under around 400 m/s impact was obtained.

**Keywords:** Aromatic Polyamide, UHMWPE, Unidirectional, Tatting, V<sub>50</sub>

## 一、前言

在早期以單一材質或金屬作為防彈裝備，由於高分子複合材料因應而生，而漸漸取代較受重量及形狀所限的防護裝備。目前在市面上的防彈背心大部份採用的是美國杜邦(Du Pont)公司所發展的芳香族聚醯胺(Aromatic Polyamide)纖維系列產品(Kevlar)為主，在其商品中具備低密度、高抗拉強度、高彈性模數等特性，經過實彈測試也具備良好的抗彈性能，因此大量被使用在防護裝備上；另外由美國 Allied Signal 公司生產的高強力 PE 纖維（光譜纖維），此種纖維密度  $0.97\text{g/cm}^3$ ，比 Kevlar 的密度  $1.44\text{g/cm}^3$  還要低，這表示在使用者身上的負擔更加減輕，而根據文獻資料顯示抗彈性能亦不比 Kevlar 纖維差，且具有比較高的韌度及耐腐蝕等優點。目前更有另一種利用薄膜將超高分子量聚乙烯纖維平鋪成型的新產品為光譜盾纖維(Spectra Shield)，是由黏合方式將兩層單方向纖維層(Unidirection Layer)交疊而成，完全發揮纖維強力，表現抗彈的功效與柔軟舒適性，受衝擊後能量的吸收性也比一般纖維好，因此常使用於防彈裝備[1]。

1992 年間，Zhu 等人[2]對 Kevlar 單向和織物複合材料使用錐形彈作為彈道衝擊（130 m/s）實驗研究發現局部變形和纖維斷裂是主要能量吸收的現象。正交鋪層單向複合材料的破壞區域呈現矩形，而織物複合材料的破壞區域呈現圓形。1994 年 Lee 等人[3]對於低樹酯含量 Spectra 高分子聚乙烯織物和單方向纖維層材料抗 1.1 g FSP 彈道衝擊性能做了研究，發現在低面密度時單方向纖維層材料和織物複合材料兩者有相同的彈道極限速度（150-300 m/s）。在高面密度時，單方向纖維層材料的分層比較小而且有比較高的彈道極限速度。2000 年 Kang 及 Kim 等人[4]研究不同編織之單軸向纖維疊層板對衝擊行為及容損性質(Damage Tolerance)的特性，在不考慮整個實驗系統操作時所消耗的能量及不考慮纖維斷裂能及基材斷裂能的情況下，將衝擊能量分為下列四種吸收能—脫層能(Delamination Energy)、薄膜能(Membrane Energy)、彎曲能(Bending Energy)及系統消耗能(System Energy)。最後歸納出不同編織方式的疊層板，對上述四種能量的吸收反應也不相同。2005 年王元博等人[5]以 Kevlar 纖維增強層合材料為研究對象，透過彈道衝擊試驗，研究了疊層板的抗彈性能，分析了彈頭、纖維鋪設方式以及板厚等因素對靶板抗侵徹能力的影響，同時對靶板的破

壞模式做分析。此外，使用一種工程近似方法，分析了不同彈頭的彈道極限速度，預測值與實驗值具有良好的一致性。

因為 UD 布的高強力纖維完全直向排列平鋪  $90^\circ$  交疊無織造點，可以完全發揮高強力纖維的抵抗撞擊力，將分散撞擊力，也因為無織造點，相對柔軟度優於梭織布；梭織布卻因有織造點，所以結構穩定性高於 UD 布，受到子彈撞擊時，撞擊處力量受到局部侷限，因此後方凹陷度相對低於 UD 布。由於芳香族聚醯胺纖維密度較高，而超高分子量聚乙烯纖維韌性較佳，因此本研究使用此兩種纖維材料，以芳香族聚醯胺纖維組織在前，超高分子量聚乙烯纖維組織在後的疊層方式結合而成。以抗彈極限速度、衝擊能量吸收等纖維複合層板的彈道特性和受衝擊破壞情形分析其抗彈能力並找出最佳組合為主要研究目的。

## 二、實驗與模擬

### 2.1 實驗內容

本研究實驗部分主要探討兩種複合纖維材料(芳香族聚醯胺纖維和超高分子量聚乙烯纖維)以不同組合及編織方式之抗彈性能。以芳香族聚醯胺纖維梭織布、超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物與芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物的組合，測試以 9 mm 投射體衝擊之抗彈能力。並探討單一材料多層組合靶板之抗彈性能。

兩種複合纖維材料在總層數為 12 層的情形下，以不同組合型態並以芳香族聚醯胺纖維梭織布在前、超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物在後與芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物在前、超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物在後的方式組成試片，利用電子測速儀器測得貫穿後之殘餘末速，並計算其靶板吸收能量。

### 2.2 實驗材料

本論文實驗主要採用的材料有兩種，一為芳香族聚醯胺纖維；另一為超高分子量聚乙烯纖維。纖維結構為非織物( $0^\circ/90^\circ$ 疊層)和梭織物，

單層厚度0.5 mm。靶板尺寸100 mm×100 mm，層數有5、10、12、15、17等，測試子彈為9 mm 普通彈。其實驗材料單層規格如表1所示。

表 1. 實驗材料

實驗材料	規格	結構	面密度 (kg/m <sup>2</sup> )	樣本代碼
芳香族聚醯胺纖維	1000D×1000D 31×31/吋	梭織布	0.3	KW
芳香族聚醯胺纖維	four plies crossplied at 0°/90°/0°/90°	UD	0.6	KUD
超高分子量聚乙烯纖維	two plies crossplied at 0°/90°	UD	0.31	PUD

### 2.3 實驗配置

本研究使用之彈道實驗室設備包含槍枝、子彈、測速光閘，測速儀、靶架等，槍擊實驗示意圖如圖 1 所示

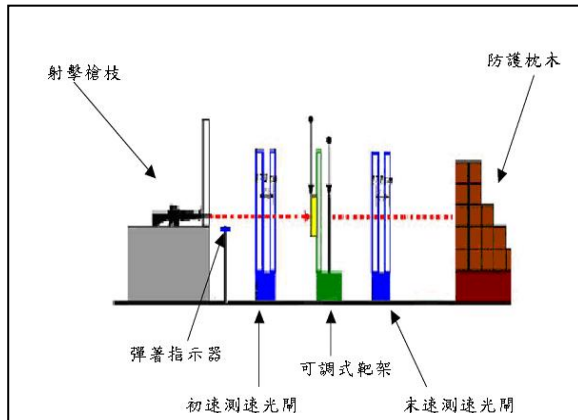


圖 1. 槍擊實驗示意圖。

### 2.4 模擬工具

本研究所使用的模擬軟體採用 ANSYS 做為前處理，建構模擬所需之模型，輸出.K 檔再交由 LS-DYNA 的計算器求解，在 LS-DYNA 後處理，擷取我們所需要的數據。

### 2.5 模型建立

本研究選擇之投射體材料為 LS-DYNA 規

範之 3 號材料(\*MAT\_ELASTIC\_PLASTIC\_HYDRO)，材料參數如表 2 所示。9 mm 投射體網格切割如圖 2 所示，纖維疊層尺寸為 100 mm×100 mm。模擬撞擊模型，如圖 3 所示。接觸模式設定為 CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE，邊界條件設定為 NON- REFLECTING 與 SYMMETRIC。

表 2. 投射體銅包鉛殼體之材料參數[6]

$E$	$\nu$	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$\sigma_y$ [MPa]	$m$
105	0.346	9	97	7.45

$E_{ij}$ : 楊氏模數,  $\nu_{ij}$ : 波松比,  $\rho$ : 密度,  $\sigma_y$ : 降伏強度,  $m$ : 質量

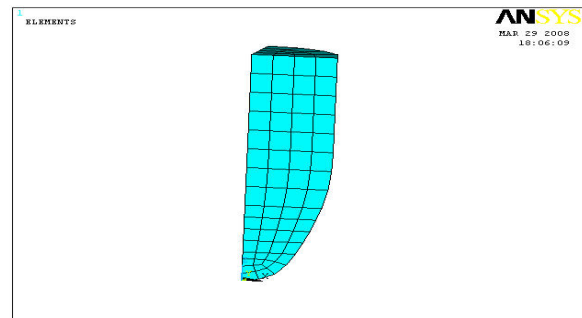


圖 2. 投射體網格切割正面圖。

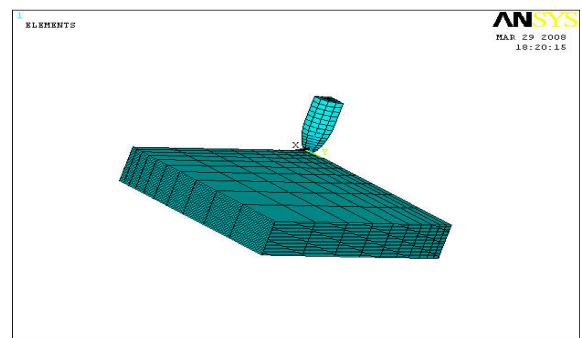


圖 3. 模擬撞擊模型。

### 2.5.1 材料定義

芳香族聚醯胺纖維梭織布疊層選用 LS-DYNA 所提供的 (59 號材料) 材料參數 MAT\_COMPOSITE\_FAILURE\_SOLID，芳香族聚醯胺纖維UD結構織物與超高分子量聚乙烯纖

維UD結構織物選用LS-DYNA所提供的(22號材料)材料參數Mat\_COMPOSITE\_DAMAGE, 根據模擬與實驗的結果, 使疊層板在破壞上的表現也更接近實際的狀況, 其材料特性如表3、4所示[2][3]。

表 3. 芳香族聚醯胺纖維織物基本材料參數[6]

$E_{11,22}$ [GPa]	$E_{33}$ [GPa]	$G_{12}$ [GPa]	$G_{23,31}$ [GPa]	$V_{22}$	$V_{31,32}$
18.5	6.0	0.77	2.715	0.25	0.33
$X_t$ [MPa]	$Y_t$ [MPa]	$X_c$ [MPa]	$Y_c$ [MPa]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
555	555	555	555	1.23	

$E_{ij}$ : 楊氏模數,  $G_{ij}$ : 剪切模數,  $V_{ij}$ : 波松比,  $\rho$ : 密度  
1-3: 材料軸方向  
 $X_t$ 、 $X_c$ : x軸方向拉伸、壓縮最大強度  
 $Y_t$ 、 $Y_c$ : y軸方向拉伸、壓縮最大強度

表 4. 超高分子量聚乙烯纖維織物基本材料參數[7]

$E_{11,22}$ [GPa]	$E_{33}$ [GPa]	$G_{12}$ [GPa]	$G_{23,31}$ [GPa]	$V_{22}$	$V_{31,32}$
22	5.0	0.77	2.715	0.25	0.30
$X_t$ [MPa]	$Y_t$ [MPa]	$X_c$ [MPa]	$Y_c$ [MPa]	$\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]	
430	430	150	150	0.97	

$E_{ij}$ : 楊氏模數,  $G_{ij}$ : 剪切模數,  $V_{ij}$ : 波松比,  $\rho$ : 密度  
1-3: 材料軸方向  
 $X_t$ 、 $X_c$ : x軸方向拉伸、壓縮最大強度  
 $Y_t$ 、 $Y_c$ : y軸方向拉伸、壓縮最大強度

### 三、 結果與討論

#### 3.1 單一材料疊層抗衝擊殘餘速度分析

本節以芳香族聚醯胺纖維梭織布、芳香族聚醯胺纖維UD結構織物、超高分子量聚乙烯纖維UD結構織物等材料, 分別以實驗及模擬計算各單一材料、不同層數承受投射體衝擊後之末速度。

##### 3.1.1 芳香族聚醯胺纖維梭織布

以 9 mm 手槍彈撞擊芳香族聚醯胺纖維梭織布, 分別取5~17層等5個層數來進行實驗與模

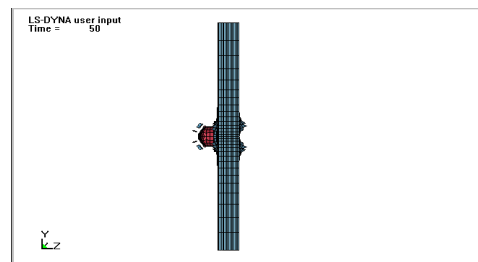
擬計算, 結果詳見表5所示。顯示以LS-DYNA 3D 計算之結果與實際進行槍擊試驗之實驗值以入射速度為比較基礎之相對誤差很小, 驗證本研究建立的有限元素分析模型的可靠性。

表 5. 芳香族聚醯胺纖維梭織布疊層實驗與模擬結果

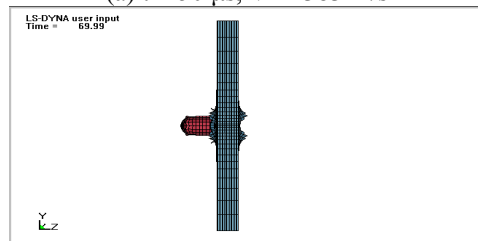
試片材料	層數	入射速度 (m/s)	實驗末速 (m/s)	模擬末速 (m/s)	相對誤差 (%)
芳香族聚醯胺纖維梭織布	5	434	—	430	—
	10	434	394	387	1.6
	12	425	—	375	—
	15	434	369	365	0.9
	17	414	339	330	2.2

相對誤差(%) = |實驗值末速 - 模擬值末速| / 入射速度

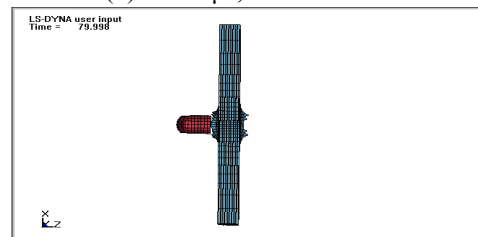
圖4為模擬17層芳香族聚醯胺纖維梭織布受衝擊貫穿過程, 由圖中可得到, 當  $t=70 \mu s$  時, 子彈已貫穿靶板, 末速為 330 m/s。



(a)  $t = 50 \mu s$ ,  $V_r = 383 \text{ m/s}$



(b)  $t = 70 \mu s$ ,  $V_r = 330 \text{ m/s}$



(c)  $t = 80 \mu s$ ,  $V_r = 330 \text{ m/s}$

圖 4. 17 層芳香族聚醯胺纖維梭織布受衝擊貫穿過程。

### 3.1.2 芳香族聚醯胺纖維UD結構織物

以 9 mm 手槍彈撞擊芳香族聚醯胺纖維UD結構織物，層數選取和芳香族聚醯胺纖維梭織布一致。實驗與模擬結果見表6所示。模擬與實驗值相對誤差值都在合理的範圍內。

表 6. 芳香族聚醯胺纖維 UD 疊層實驗與模擬結果

試片材料	層數	入射速度 (m/s)	實驗末速 (m/s)	模擬末速 (m/s)	相對誤差 (%)
芳香族聚醯胺纖維UD結構織物	5	403	373	365	2.0
	10	402	352	338	3.5
	12	425	—	200	—
	15	407	50	56	1.5
	17	418	36	41	1.2

圖5為模擬15層芳香族聚醯胺纖維UD結構織物受衝擊貫穿過程，圖中顯示在 $t = 130 \mu\text{s}$ 時(末速56 m/s)，子彈貫穿靶板，且靶板之脫層、變形非常顯著，有別於圖4所得的結果。

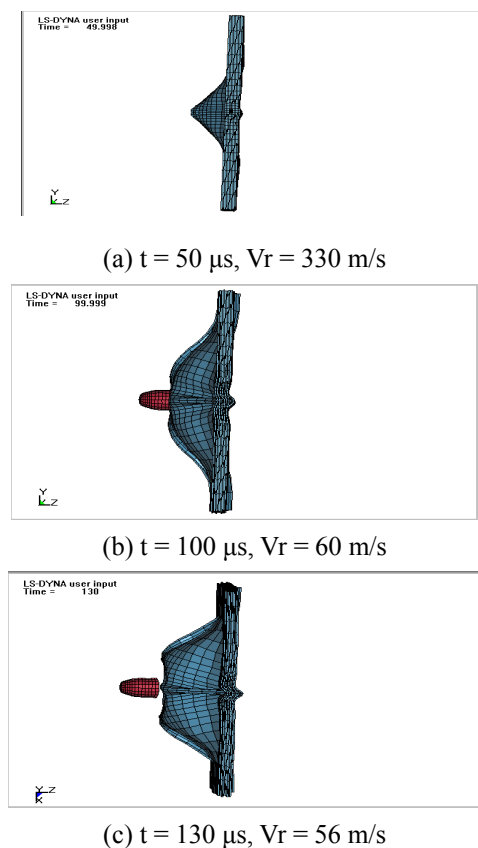


圖 5. 15 層芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物受衝擊貫穿過程。

### 3.1.3 超高分子量聚乙烯纖維UD結構織物

以 9 mm 手槍彈撞擊超高分子量聚乙烯纖維UD結構織物，分別取介於5至30層之5個層數來進行實驗與模擬計算，結果見表7所示，其中30層有效擋住子彈未被貫穿。

表 7. 超高分子量聚乙烯 UD 疊層實驗與模擬結果

試片材料	層數	入射速度 (m/s)	實驗末速 (m/s)	模擬末速 (m/s)	相對誤差 (%)
超高分子量聚乙烯纖維UD結構織物	5	403	—	380	—
	10	402	—	356	—
	20	412	324	320	0.9
	25	416	326	323	0.7
	30	415	0	—	—

圖 6 顯示 25 層超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物之模擬貫穿過程，在  $t = 75 \mu\text{s}$  時(末速 323 m/s)，子彈完全貫穿靶板。

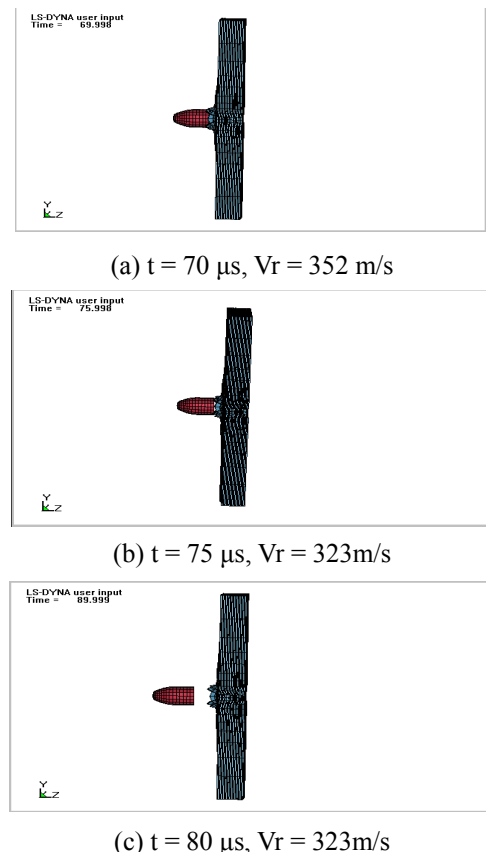


圖 6. 25 層超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物受衝擊貫穿過程。

經由芳香族聚醯胺纖維梭織布、芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物與超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物疊層，個別在 5~30 層間的實驗與模擬計算結果發現在 15 層的芳香族聚醯胺纖維 UD 結構要比 15 層以上的芳香族聚醯胺纖維梭織布與超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構疊層，靶板的變形脫層情形都要來得明顯，靶板吸收能量大。

### 3.2 複合纖維疊層抗衝擊殘餘速度分析

本節分別以芳香族聚醯胺纖維梭織布、芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物與超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物疊層，以實驗及模擬計算各不同層數組合下承受投射體衝擊後之末速度。由於 UD 結構試片係本研究自行加工壓製而成，在製程中包含水性樹脂、油性樹脂等。圖 7 所示為三種結構疊層面密度與層數之關係，均來自實際量測所得。

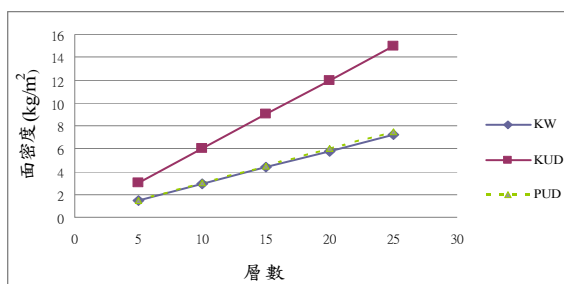


圖 7. 單一材料疊層面密度之關係圖。

#### 3.2.1 芳香族聚醯胺纖維梭織布與超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物疊層

以 9 mm 手槍彈撞擊芳香族聚醯胺纖維梭織布與超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物，在以總層數相同 (12 層) 下，取 10KW×2PUD、7KW×5PUD、6KW×6PUD 等層數配比來進行實驗與模擬計算，結果見表 8 所示。在 12 層的 KW×PUD 組合，各種組合面密度近乎相同的情況下，根據其結果可以得知需要有足夠 KW 的層數來鈍化投射體，投射體鈍化後靶板受力面積增大，這時更能發揮 PUD 的材料特性來吸收其能量，6KW×6PUD 吸收能在此類組合中為最高。

表 8. KW×PUD 實驗與模擬結果

試片組合	入射速度 (m/s)	面密度 (kg/m <sup>2</sup> )	實驗末速 (m/s)	模擬末速 (m/s)	速度降低率 (%)
10KW×2PUD	413	3.5	352	353	14.5
7KW×5PUD	412	3.5	352	338	18.0
6KW×6PUD	407	3.5	312	275	32.4
2KW×10PUD	413	3.6	—	350	15.3

速度降低率(%)=(入射速度-模擬末速)/入射速度

#### 3.2.2 芳香族聚醯胺纖維 UD 與超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物疊層

以 9 mm 手槍彈撞擊芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物疊層與超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物疊層，在以總層數相同下，取 10KUD×2PUD、7KUD×5PUD、6KUD×6PUD 等層數配比來進行實驗與模擬計算，結果見表 9 所示。速度降低率基本上和各種試片組合的面密度成正比，然而並非呈線性比例，比較 7KUD×5PUD、6KUD×6PUD 兩種組合，面密度差別不大但抗彈能力卻有很大的差異。

表 9. KUD×PUD 實驗與模擬結果

試片組合	入射速度 (m/s)	面密度 (kg/m <sup>2</sup> )	實驗末速 (m/s)	模擬末速 (m/s)	速度降低率 (%)
10KUD×2PUD	450	6.6	—	20	95.6
7KUD×5PUD	450	5.7	—	30	93.3
6KUD×6PUD	412	5.4	254	273	33.7
2KUD×10PUD	412	4.2	—	337	18.2

### 3.3 芳香族聚醯胺纖維梭織布及 UD 結構織物面密度對彈道性能的影響

經由實驗與模擬結果得到改變結構面密度對抗彈能力  $V_{50}$  的影響，詳如圖 8。在低面密度下，芳香族聚醯胺纖維梭織布的  $V_{50}$  較芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物來得高，但隨著面密度增加，芳香族聚醯胺纖維梭織布的  $V_{50}$  增加趨勢趨緩，而芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物  $V_{50}$  增加趨勢則近乎線性，故在一定的面密度以上 KUD 要比 KW 的  $V_{50}$  來得高。究其原因為在低面密度下，UD 結構承受衝擊時纖維易被排開，故抗彈能力表現不若梭織布。當面密度增加時，UD 結構纖維被排開的機會大為降低，且因梭織布纖維上有節點會反射衝擊波，限制了能量瞬間擴散範

圖，而 UD 結構織物無節點限制，有助於能量的快速擴散，導致 UD 纖維疊層的吸收能反較梭織布來得好。

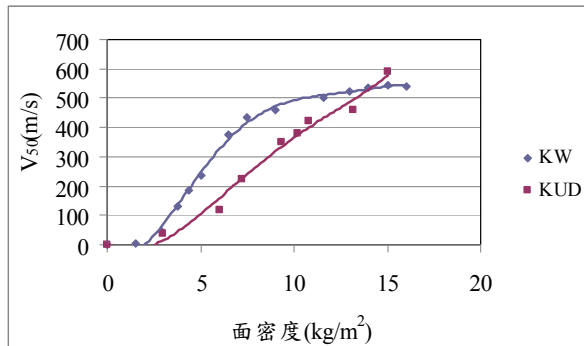


圖 8. KW 與 KUD 面密度與 V<sub>50</sub> 關係。

### 3.4 複合纖維材料疊層板能量吸收分析

子彈撞擊靶板的動能消耗即為層板的吸收能，計算式為

$$E=1/2(mv_{in}^2 - mv_{out}^2)$$

式中  $E$  表能量； $v_{in}$ 、 $v_{out}$  分別表示子彈入射及殘餘速度。在初速 400 m/s~430 m/s 之間的衝擊速度下，由圖 9 所示得知，在總層數(12 層)不變下，以 KW×PUD 比例組合疊層材料，在 6KW×6PUD 組合的吸收能較其他組合和 12 層芳香族聚醯胺纖維梭織布要來得好，所以複合纖維組合要比單一纖維材料要有好的抗彈能力。以 12 層比例下芳香族聚醯胺纖維梭織布(KW)在前，超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物(PUD)在後，隨著 PUD 增加 KW×PUD 的吸收能也跟著增加，但是在 KW 少於 6 層吸收能卻逐漸往下，這表示並不一定是 PUD 層數越多越好，而在 12 層比例下，6KW×6PUD 的吸收能在此類組合最高。

另以 KUD×PUD 比例組合疊層材料，卻在 7KUD×5PUD 與 10KUD×2PUD 上表現比其他組合要好的吸收能。在 KUD×PUD 靶板組合的情形下，12KUD 表示只有 KUD 單一材料，卻沒有 PUD 的材料特性來作為輔助，再次證明複合纖維下能同時擁有兩種材料特性結合，比只有單一材料有較好的抗彈性能。另在 9 mm 手槍彈以 400 m/s 左右速度撞擊 10KUD×2PUD、7KUD×5PUD 靶板試片後觀察發現，在以 12 層總層數組合下，彈體貫穿時需要有 7 層以上的芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物將彈頭鈍化，再以其後超高分子量聚乙烯將彈體擋住，而其他組合在 400 m/s 的撞擊速度下，彈頭鈍化不是很明顯，故頭

部較尖的彈頭比較容易將纖維推擠侵入未斷纖維的縫隙而穿越。彈頭在穿越靶板時，由於彈頭材料軟，受阻即變形，變得越來越鈍最後形成扁平狀，彈頭變形過程會吸收一部分的衝擊能，使變形彈頭穿越靶板纖維縫隙能力變弱。許多文獻的結果表明超高分子量聚乙烯纖維具有比較高的能量吸收能力，結果顯示 10KUD×2PUD 及 7KUD×5PUD 較佳。

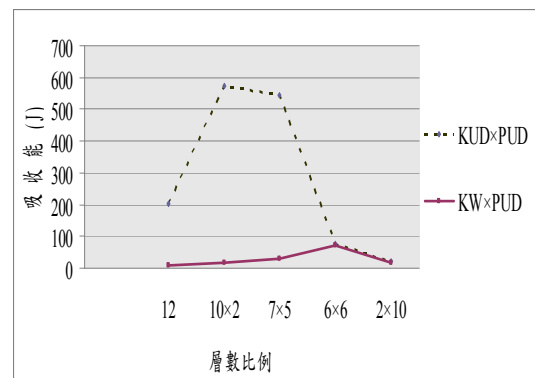


圖 9. 複合纖維不同組合能量吸收比較。

由圖 9 知，在 400 m/s~430 m/s 的子彈初速衝擊下，7KUD×5PUD 和 6KUD×6PUD 的吸收能有很大的差異。圖 10 顯示在以不同初速衝擊下，7KUD×5PUD 和 6KUD×6PUD 靶板所吸收的能量比較。6KUD×6PUD 組合靶板在衝擊初速 400 m/s 以下時，吸收能比衝擊初速 400 m/s 以上要來得好，且在初速 300 m/s 左右(彈道極限速度)衝擊下，靶板發揮其最大的抗彈吸能作用。初速達 412 m/s 時，子彈快速穿過，靶板反而無法充分發揮吸收能量的作用。而 7KUD×5PUD 在衝擊初速 400 m/s 左右時，靶板產生脫層現象，得以發揮最大的吸收能量作用，但當初速高於 412 m/s 以上時吸收能又往下降，可知圖 400 m/s 左右應為其彈道極限速度。圖 11(a)、(b)之實驗結果顯示彈頭在 400 m/s 左右速度衝擊下，6KUD×6PUD 組合被貫穿且末速仍達 254 m/s，但 7KUD×5PUD 組合遭撞擊後靶板背部隆起，顯示該組合充分發揮纖維張力，順利將彈頭擋下。圖 11(c)、(d)顯示在相同初速 412 m/s 下彈頭鈍化之模擬情形，很明顯看出 7KUD×5PUD 使彈頭鈍化程度較 6KUD×6PUD 來得好。當初速降低至 300 m/s 時，6KUD×6PUD 使彈頭產生比較大的鈍化情形，如圖 11(e)所示。圖 11(f)的模擬結果則和圖 11(b)實驗結果一致，彈頭無法

貫穿靶板。

由圖 10 的結果及圖 11 的分析知，不同的疊層組合具有不同的彈道極限速度。當子彈的入射速度在穿透靶板的彈道極限速度以下時，材料靶板變形脫層、子彈鈍化和子彈初速成正比；當入射速度超過彈道極限速度時，彈體與靶板之間的作用時間變短，靶板所吸收的能量減小，破壞程度變小。

超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物價格高於芳香族聚醯胺纖維梭織布與芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物，雖然 10KUD × 2PUD 組合的吸收能稍遜於 7KUD × 5PUD 的組合，然純就經濟效益考量，10KUD × 2PUD 應為最佳選擇。

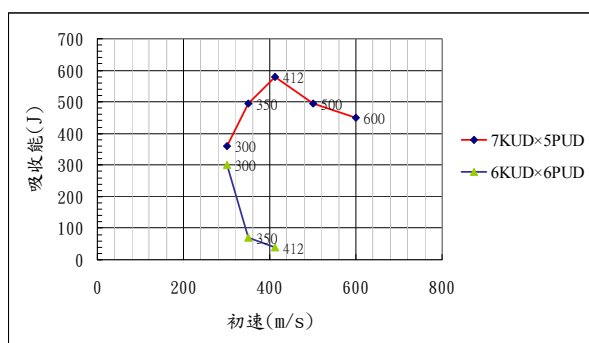


圖 10. KUD×PUD 初速與吸收能關係。

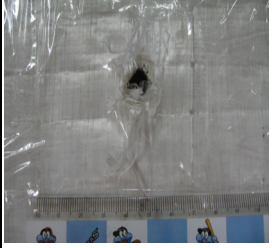

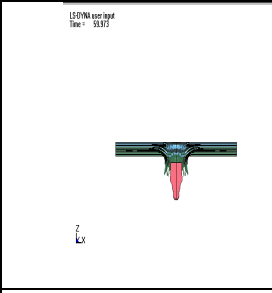
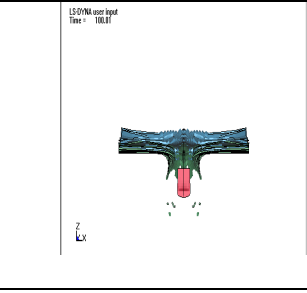
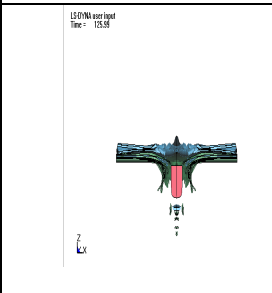

	
(a) 6KUD×6PUD	(b) 7KUD×5PUD
初速 412 m/s 末速 254 m/s	初速 400 m/s 末速 0 m/s
	
(c) 6KUD×6PUD	(d) 7KUD×5PUD
初速 412 m/s 末速 273 m/s	初速 412 m/s 末速 30 m/s
	
(e) 6KUD×6PUD	(f) 7KUD×5PUD
初速 300 m/s 末速 20 m/s	初速 400 m/s 末速 0 m/s

圖 11. 複合纖維靶板破壞情形。

#### 四、結論

1. 利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元素分析軟體對於芳香族聚醯胺纖維與超高分子量聚乙烯纖維材料組合靶板進行模擬分析。將數值模擬分析得到的彈體穿透靶板的殘餘速度與實驗結果相比較，兩者誤差不大，說明本研究所建立的模型與選用的材料參數為合理，計算結果有一定的可信度。
2. 芳香族聚醯胺纖維梭織布與芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物疊層，隨著面密度增加時 UD 結構織物的  $V_{50}$  趨勢呈近線性往上升，而梭織布  $V_{50}$  增加趨勢為起始斜率較高而後趨於



- 平緩。
3. 在複合纖維疊層組合下，子彈的速度在穿透靶板的彈道極限速度以下時，材料消耗彈體動能導致靶板變形與子彈鈍化和子彈初速成正比；當入射速度超過彈道極限速度時，彈體與靶板之間的作用時間變短，靶板所吸收的能量減小，破壞程度變小。
  4. 以 400 m/s 左右速度撞擊複合纖維組合靶板，芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物和超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物組合的抗彈能力表現優於芳香族聚醯胺纖維梭織布和超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物的組合，純就經濟效益考量，10 層芳香族聚醯胺纖維 UD 結構織物加 2 層超高分子量聚乙烯纖維 UD 結構織物應為最佳抗彈組合選擇。

### 參考文獻

- [1] 張佐光，功能複合材料，化學工業出版社，北京，第 7-8 頁，2004 年。
- [2] Zhu G, Goldsmith W., and Dharan C. K. H., “Penetration of Laminated Kevlar by Projectiles,” Experimental Investigation, International Journal Solid Struts, Vol. 29, pp. 399-420, 1992.
- [3] Lee B. L., Song J. W., and Ward J. E., “Failure of Spectra Polyethylene Fibre Reinforced Composites under Ballistic Impact Loading,” Journal of Composite Materials, pp.1202-1226, 1994.
- [4] Kang T. J., and Kim C., “Energy-absorption Mechanisms in Kevlar Multiaxial Warp-knit Fabric Composites under Impact Loading,” Composites Science and Technology, Vol. 60, pp.773-784, 2000.
- [5] 王元博、王肖鈞、胡秀章、王峰，“Kevlar 層合材料抗彈性能研究”，第 22 卷第 3 期，第 76-81 頁，2005 年。
- [6] 林盈志，“疊層複材板結構抗衝擊能力最佳化研究”，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 iii 頁，2006 年。

- [7] 李琦，龔烈航，張庚申，顧冰芳，“芳綸與高強聚乙烯纖維疊層組合對彈片的防護性能”，纖維複合材料，第 3 期，第 3-5 頁，2004 年。

