

陶瓷/纖維混雜複材結構抗彈性能分析

陳逸恩 陳幼良* 趙子豪 張雅智

國防大學理工學院動力及系統工程學系

摘 要

本研究探討 0.3" 穿甲彈對於陶瓷複合混雜纖維板的抗彈性能，試片由 9 片 5*5 cm 的碳化矽(SiC)陶瓷拼接而成，纖維則是 Kevlar 纖維及超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纖維組成的複合纖維板。以本實驗室之前研究「碳化矽基陶瓷纖維複合材料抗彈性能」成果得知，當碳化矽(SiC)8 mm 及 9 mm 分別搭配 UHMWPE 纖維板 9 mm 或 7 mm 時，即可成功抵擋 0.30" 穿甲彈，最小面密度為 33.21(kg/m²)，此面密度作為本研究的限制條件。為降低在相同重量之複合抗彈板厚度，本研究以碳化矽陶瓷搭配 Kevlar 與 UHMWPE 的複合纖維板，以田口法進行分析，採兩因子三水準，陶瓷厚度為 7 mm、8 mm 及 9 mm，纖維比例(Kevlar/UHMWPE)為 1:1、1:1.5 及 1:2，田口法分析結果顯示 Kevlar/UHMWPE 比值為 1:1.5 時有最佳抗彈性能，且抗彈板加入部份的 Kevlar 取代 UHMWPE 可有效降低整體抗彈板厚度。

關鍵詞：陶瓷複合材料、碳化矽、Kevlar、UHMWPE

Analysis of Ballistic Resistance of Ceramic/Hybrid Fabric Composite Structure

Yi-En Chen, Yu-Liang Chen*, Tzu-Hao Chao, Ya-Chih Chang

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

ABSTRACT

This study discuss the ballistic resistance capability of ceramic/fabric composite subjected to 0.3" armor-piercing projectile impact. The specimens were made of 9 pieces of 5x5 cm silicon carbide (SiC) ceramics, combined with Kevlar and ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) fibers as bake plates. Based on the previous research outcome of our laboratory: ballistic resistance of silicon carbide based ceramics / fiber composites. It was known that when SiC 8 mm or 9 mm thick, combined with UHMWPE fiber of 9 mm or 7 mm, respectively, they could successfully resist 0.30" armor-piercing projectiles with minimum areal density 33.21 (kg/m²) and this density is design criteria of present research. In order to reduce the thickness of the composite ballistic plate at the same weight, this study used SiC ceramic combined with Kevlar and UHMWPE hybrid fabric. Taguchi method was used adopting 2 factors, each with 3 levels. The thickness of ceramic was chosen 7 mm, 8 mm and 9 mm and the fiber ratio (Kevlar/UHMWPE) was 1:1, 1:1.5, 1:2. Adding Kevlar to replace some UHMWPE can reduce the thickness of the fiber plate and improve the anti-ballistic performance of the overall specimen.

Keywords: Ceramic composites, Silicon carbide(SiC), UHMWPE, Kevlar

文稿收件日期 95.12.20; 文稿修正後接受日期 97.00.00;*通訊作者
Manuscript received Dec 20, 2006; revised...;* Corresponding author

一、前言

科技的發展使現代戰爭武器威力日趨增長，而戰車的防護裝甲以及人員穿戴的防護裝備亦須不斷的提升。現今最為廣泛使用及發展的是陶瓷複合裝甲的設計，自西元 1960 年代起由西方國家將多種材料與構型的陶瓷複合裝甲運用至主戰坦克以及裝步戰鬥車中，並以防護力及輕量化為目的進行開發。而最廣泛運用的是陶瓷搭配纖維材料。利用兩者個別的特性，子彈撞擊可分為兩階段，第一階段因陶瓷本身高硬度的特性，於高速撞擊產生的粉碎區，使子彈尖端產生鈍化的效果，如圖 1(A-C)，第二階段則是利用纖維抗拉伸特性，抵擋子彈的殘餘能量[1]，如圖 1(D-E)。

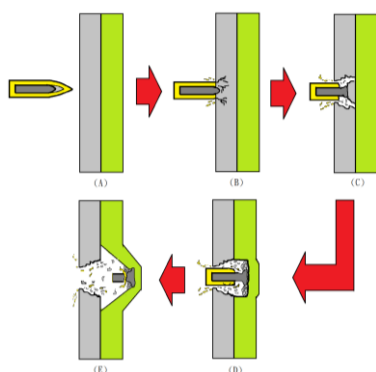


圖 1. 陶瓷複合材料之抗彈原理示意圖

高硬度及低密度普遍被認為是陶瓷裝甲的理想性能，研究指出當陶瓷的硬度越高，彈丸撞擊陶瓷時彈頭越容易鈍化和破碎，目前廣泛運用的陶瓷材料為氧化鋁(Al_2O_3)、氮化鋁(AlN)、氮化矽(Si_3N_4)、碳化矽(SiC)、碳化硼(B_4C)等，如表 1[2]。

表 1. 各種陶瓷特性比較表[2]

材料	密度 g/cm^3	硬度 HV	彈性模 量 Gpa
氧化鋁(Al_2O_3)	3.6-3.9	1800	340
氮化鋁(AlN)	2.9-3.2	1200	33
碳化矽(SiC)	3.1-3.3	2500	408-451
氮化矽(Si_3N_4)	3.2	1700	310
碳化硼(B_4C)	2.51	2900	400

纖維材料的比強度、比模數、抗拉、減震、耐磨等性能都優於金屬材料，使其有良好的吸收撞擊能量性能，在抗彈纖維材料中，主要使用超高分子量聚乙烯(UHMWPE)、芳香族聚醯

胺(Aramid)、玻璃纖維與碳纖維，而目前應用最為廣泛的為前兩者[3]。

現代戰爭多為城鎮戰，戰甲車或是人員的機動性更為重要，因此在不改變原抗彈性能之下發展更輕更薄的裝甲勢必成為趨勢，由陳一忠之「碳化矽基陶瓷/纖維複合材料抗彈性能研究」[4]中得出，當碳化矽(SiC)陶瓷為 8 mm，搭配 UHMWPE 疊層纖維板 9 mm 以上時，或當碳化矽(SiC)陶瓷為 9 mm，搭配 UHMWPE 疊層纖維板 7 mm 以上時，可有效抵擋 0.30" 穿甲彈破壞，最小面密度為 $33.21(\text{kg/m}^2)$ ，該面密度為本研究設計的限制條件。

物體的碰撞會產生應力波，應力波於不同介質中傳遞時，因波阻抗不同，波在兩種之間的交界上會同時產生反射波和透射波，而波在介質中不斷地以反射及透射的現象傳遞，本研究以前者研究[4]的最小面密度為基礎，加入 Kevlar 纖維，期能在抗彈複合結構重量不變的狀況下獲得抵抗同樣威脅且具有更小厚度的抗彈板並分析不同纖維配比的抗彈性能以及厚度的優化[5-10]。

二、實驗內容

2.1 研究規劃說明

在李樹濤先生纖維層厚度對陶瓷複合靶板抗彈性的影響研究得到在不含陶瓷的 Kevlar 與 UHMWPE 纖維板組合中 1:2 優於 1:1[11]，依田口實驗設計採 2 因子 3 水準，因子 1 為陶瓷厚度(7、8、9 mm)，因子 2 為 Kevlar 纖維與 UHMWPE 纖維厚度比例(1:1、1:1.5 及 1:2)，以田口法 L_9 表進行實驗配置，如表 2，每組均重複實驗 3 次。

表 2. 實驗配置表

實驗編號	SiC (mm)	Kevlar:UH -MWPE厚度比例	面密度 (kg/m^2)
S7K1X1	7	1:1	32.93
S7K1X1.5	7	1:1.5	32.4
S7K1X2	7	1:2	32.92
S8K1X1	8	1:1	32.99
S8K1X1.5	8	1:1.5	32.83
S8K1X2	8	1:2	32.83
S9K1X1	9	1:1	32.90
S9K1X1.5	9	1:1.5	32.89
S9K1X2	9	1:2	32.59

2.2 彈道測試

2.2.1 實驗設備

本實驗使用 0.30" 穿甲彈進行測試，探討不同厚度陶瓷搭配不同比例的複合纖維板的抗彈能力，吸收能量越高，代表其抗彈能力愈佳，並由式 1 計算出吸收能量。

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

其中 E_A 為靶板吸收能量(J)， m 為彈頭重(kg)， v_i 為彈頭初速(m/s)， v_r 為彈頭貫穿靶板後殘餘末速(m/s)。

除進行吸收能量分析外，為達到輕量化抗彈板為目的，在實際應用上將面密度納入評估條件，陶瓷複合式材料的 areal density (A) 計算公式如式 2：

$$A = \rho_c h_c + \sum \rho_f h_f \quad (2)$$

其中 A 為複合材料面密度(kg/m^2)， ρ_c 為陶瓷板體積密度(kg/m^3)， h_c 為陶瓷板厚度(m)， ρ_f 為纖維疊層板體積密度(kg/m^3)， h_f 為纖維疊層板厚度(m)。

測試執行以國防大學理工學院彈道館全套設備進行測試，測試示意圖如圖 2 所示：

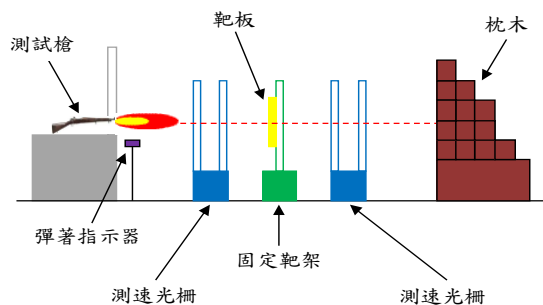


圖 2. 測試示意圖

2.2.2 實驗靶板製作

碳化矽陶瓷製作，是以碳化矽粉壓製成型再燒結而成。首先加入粘結劑、分散劑、潤滑劑、水，利用球磨機研磨分散，形成陶瓷漿料後再使用噴霧造粒機製作成碳化矽陶瓷粉，將

粉狀的陶瓷粉末倒入模具中，依照實驗規劃所需陶瓷的方形大小與厚度，經粉末成型機加壓成生胚，再放入素燒爐，以溫度約 600-800°C 進行脫脂，其目的是去除粘結劑、混合劑的有機質，增加胚體強度，最後放入高溫燒結爐，以溫度約 2000°C 進行燒結，製作流程圖及成品如圖 3。

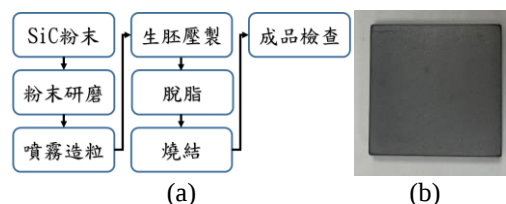


圖 3. 陶瓷製作：(a)流程圖；(b)成品圖

纖維背板選擇 Kevlar 及 UHMWPE 兩種，製作方式為將纖維布卷以人工手繪成實驗需要之尺寸，再裁剪成 15*15 cm 之方形布，接著依實驗規劃將 Kevlar 及 UHMWPE 纖維布堆疊成所需的厚度，再放入熱壓機成型，製作過程如圖 4，因為兩種纖維的材料特性不同，故熱壓的溫度也不同（Kevlar 為 165°C、UHMWPE 為 130°C）。

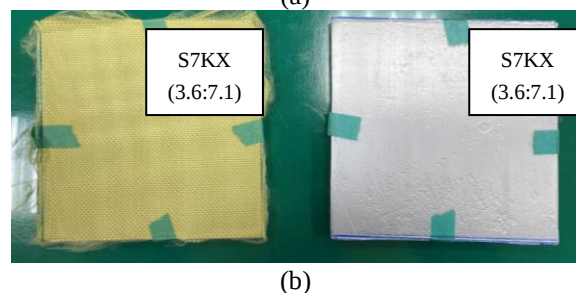
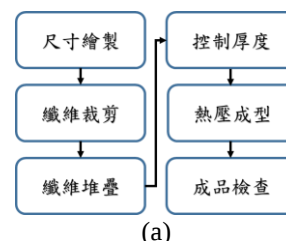


圖 4. 纖維製作(a)流程圖；(b)成品圖

實驗靶板成形，採用環氧樹脂(8338)作為陶瓷板與纖維板之黏著劑，將環氧樹脂 A、B 劑混合後均勻塗抹於各層板之間進行組裝(陶瓷與陶瓷間亦需塗抹薄層環氧樹脂 A、B 劑)，組裝完成後，以常溫方式壓置於陶瓷面以確保陶瓷與纖維板瓷接合性，最後於陶瓷外黏上膠帶以保持受衝擊後之陶瓷完整性（如圖 5）。

三、模擬分析

3.1 軟體介紹

本研究使用 ANSYS/LS-DYNA 模擬軟體，其主要針對高速撞擊及貫穿的數值分析研究，廣泛運用於國防及民用領域的動態有限元素軟體分析之一，主要是以顯性(Explicit)積分演算法為主，隱性(Implicit)積分演算法為輔，並且兼具 Lagrangian、Eulerian 及 ALE(Arbitrary Lagrangian Eulerian)等三種的數值描述方式，除可進行一般靜態荷載分析外，更適合分析作用時間短、變形量大、非線性結構衝擊及複雜接觸碰撞等短暫與瞬時的動態行為[12]，本研究採 Lagrangian 方法，將元素的網格定義在分析的物體上，當物體移動或產生變形時，網格上的節點會隨著材料質點一起移動，使物體的邊界較容易被描述，計算速度較快。

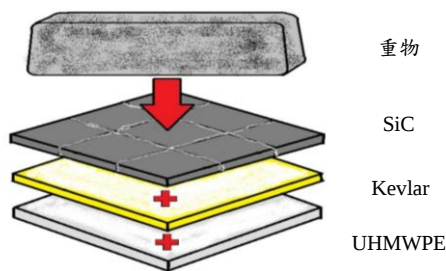


圖 5. 陶瓷複合纖維板組裝示意圖

本研究模擬處理程序可分為二部分：首先以 ANSYS 程式作為前處理器，進行子彈與各類型材料組合靶板的高速撞擊數值分析模型的建置，包含模型繪製、網格劃分、定義材料特性、材料模型選用、接觸方式及控制參數與邊界條件設定，並產生一資料輸入檔(Keyword File)。接續編輯資料輸入檔之材料、撞擊、損傷模型等參數設定，再將此資料輸入檔輸入 LS-DYNA 軟體的求解器(Solver)進行計算求解後，交由後處理器(LS-PrePost)進行靶板貫穿的破壞模式的模擬、分析子彈的速度變化及貫穿深度等。此軟體亦可將相關計算結果轉換為圖表可視化的編輯，數值模擬的分析流程如圖 6。

3.2 材料模型建立

本實驗的子彈及靶版均屬於對稱的幾何

形狀，為減少後處理運算時間，故本實驗可採用 1/4 模型建模，接續分別針對各部位的建模方式說明。

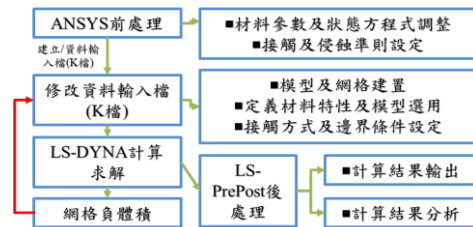


圖 6. 數值模擬分析流程

本研究使用 0.30" 穿甲彈如圖 7 (a)，其構造分別為鋼、鉛和銅，因 0.30" 穿甲彈的彈頭非常特殊，且鉛在彈頭僅占很少比例，且對子彈侵蝕能力無太多幫助，為了簡化模擬複雜度，模擬時將其簡化為鋼性材質與銅材，在材料參數使用上，引用 Fawaz 等學者[9]，且將彈頭撞擊區的部份以較密集的網格劃分以增加數值計算收斂性，因本研究均使用 0.30" 穿甲彈，故各組合的鋼芯及銅殼網格數量均為 7,252 及 4,858 個，如圖 7 (b)。

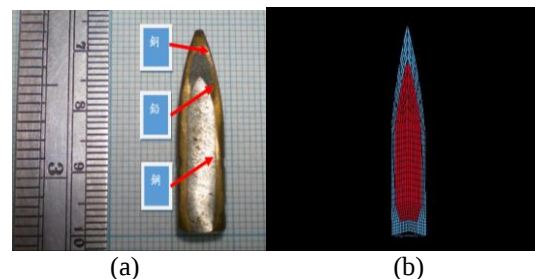


圖 7. 0.30" 穿甲彈剖面圖(a)實彈；(b)網格

由於靶板的對稱性，迎彈面陶瓷共建立 4 塊陶瓷的 1/4 模型(1 塊 25*25 mm、2 塊 25*50 mm 及 1 塊 50*50 mm)，因為本研究的陶瓷厚度差異(7、8 及 9 mm 的 4 片陶瓷)，迎彈面的 1/4 網格數量總和分別為 39,375、45,000 及 50,625 個。

背彈面纖維共建立 2 部分，尺寸均為 75*75 mm 的 Kevlar 及 UHMWPE 纖維板，1/4 及全模型如圖 8。

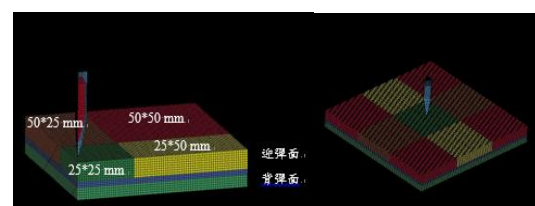


圖 8. 1/4 及全模型圖

3.3 接觸模式設定

設定接觸模式主要為確保在計算過程中，接觸介面不會產生元素間互相穿透之現象，使相對運動與摩擦力作用可表現出來[13]。ANSYS/LS-DYNA 將兩個或多個物體接觸面分別定義其主面(Master)與從面(Slave)的屬性，並依不同接觸類型可區分為單向接觸（即點對面 Node-to-Surface 接觸）與雙向接觸（即面對面 Surface-to-Surface 接觸）等類型。本研究在子彈鋼與銅之間以及子彈與陶瓷板及纖維疊層板之間、陶瓷板與纖維疊層板之間的接觸模式，採用 CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE 的接觸模式。

3.4 邊界條件設定

邊界條件能有效抑制各節點的運動方向，藉由各種不同的邊界條件設定，可使數值分析的結果能夠趨近真實的物理現象。本研究數值模擬邊界條件設定為 BOUNDARY_SYMMETRY_FAILURE，主要原因是在數值模擬時只建立四分之一的靶板與子彈，為了讓模擬結果可以映射出其餘的四分之三的模型，故對稱軸與對稱面上的所有節點，須依照實際狀況針對 X、Y 及 Z 軸的移動與轉動方向進行束制，以避免產生不合理的損傷行為與物理現象，模擬模型選定範圍，如圖 9。

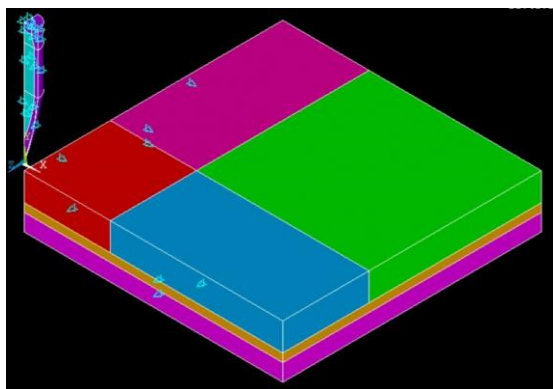


圖 9. BOUNDARY_SYMMETRY_FAILURE 邊界條件選定範圍

3.5 材料參數設定

3.5.1 鋼芯選用 3 號材料(Mat_Plastic_Kinematic)：

此模型適用於各向同性的材料，且具有塑

性硬化的特性，通常用於樑、殼及固體的網格，相關參數如表 3[9,14]。

表 3. 鋼芯材料參數[9,14]

材料	密度 ρ (g/cm ³)	楊氏係數 E(Gpa)	蒲松比 v	降伏應力 SIGY (Gpa)
鋼	7.89	202	0.3	1.07

3.5.2 銅殼選用 10 號材料(Mat_Elastic_Plastic_Hydro)：

此模型適用於彈塑性流體動力材料的描述，使用相當廣泛，其具有隨著壓力而產生降伏的性質，使用此模型時如未定義材料的有效應力與有效塑性應變的曲線時，降伏應力和塑性硬化模數可在自行定義的參數中獲得，相關參數如表 4[9,14]

另 10 號材料需要加入狀態方程式(*EOS_GRUNEISEN)輔助模擬，是用以定義材料在高速撞擊下受到壓力及拉力的參數，此固體材料可視為無黏性且可壓縮的液體，故採用此狀態方程式描述體積變形行為

表 4. 銅殼材料參數[9,14]

材料參數				
參數代號	密度 ρ (g/cm ³)	降伏應力 SIGY (Gpa)	塑性硬化模量 EH(Gpa)	剪力模數 G(Gpa)
數值	8.93	0.12	0.288	47.7
狀態方程式 EOS_GRUNEISEN				
參數代號	衝擊波速度 C_0 (cm/ μ s)	曲線參數 S_1	GRUNEISEN GAMMA 常數 γ_0	γ_0 一階體積修正量 a
數值	0.394	1.489	2.02	0.47

3.5.3 纖維板使用 22 號材料(MAT_Composite_Damage)：

此模型適用於正交各向異性材料，可用於複合材料的失效情形，兩種纖維相關參數如表 5[6-10]

3.5.4 陶瓷使用 JH-2 材料模型參數：

此模型是近年來諸多學者廣為使用，其能描述陶瓷或脆性材料等受到的大變形、高應變率、高壓下的損傷破壞等行為，其所有參數如表 6。

表 5. 纖維板材料參數[6-10]

參數代號	Kevlar	UHMWPE
ρ (g/cm ³)	1.44	0.97
E11,22 (GPa)	18.5	30.7
E33 (GPa)	6.0	1.97
ν_{12}	0.25	0.008
ν_{31}, ν_{32}	0.33	0.00282
G12 (GPa)	0.77	1.97
G23,31 (GPa)	5.43	0.67
Sc (GPa)	0.077	0.36
Xt (GPa)	1.85	3.0
Yt (GPa)	1.85	3.0
Yc (GPa)	0.185	2.5
Sn (GPa)	3.6	0.95
Syz, Sxz (GPa)	1.086	0.95

ρ ：密度，Eij：楊氏係數， ν_{ij} ：蒲松比
Gij：剪切模數，1-3：材料軸 x、y、z 方向
Sc：纖維板面內方向剪切強度
Xt：纖維縱向拉伸最大強度
Yt、Yc：纖維橫向拉伸、壓縮最大強度
Sn：纖維板正向拉伸強度
Syz, Sxz：纖維板橫向剪切強度

表 6. 陶瓷材料參數

符號	獲得方式	數值
Density ρ (g/cm ³)	阿基米德排水法	3.148
Shear modulus G(GPa)	超音波實驗換算	175
Intact normalized strength parameter A	依據 Holmquist, T. J., Templeton, D. W. and Bishnoi K. D[15]	0.96
Fractured normalized strength parameter B		0.35
Strength parameter C		0
Fractured strength parameter M		1.0
Intact strength parameter N		0.65
Reference strain rate EPSI		1E-6
Maximum tensile pressure		0.0037

strength T(Mbar)		0.8
Maximum normalized fractured strength SFMAX		
Hugoniot elastic limit HEL(Mbar)		
Pressure component at the Hugoniot elastic limit. P_{HEL} (Mbar)		0.14567
Parameter for plastic strain to fracture. D ₁	依彈道實驗後調 整	0.059
Parameter for plastic strain to fracture D ₂	依彈道實驗後調 整	0.48
bulk modulus K ₁ (Mbar)	超音波實驗換算	2.1
Second pressure coefficient K ₂ (Mbar)	-	0
Third pressure coefficient K ₃ (Mbar)	-	0

四、結果與討論

4.1 第一階段靶板模型確認

本實驗參考陳一忠之「碳化矽基陶瓷/纖維複合材料抗彈性能研究」[4]，以能夠成功抵擋 0.30" 穿甲彈中的構型中，挑選陶瓷厚度為 9 mm，搭配 UHMWPE 疊層纖維板 7 mm 配比為基礎，經彈道測試發現改以拼接陶瓷的設計多數可成功抵擋 .30" 穿甲彈，故本實驗持續以拼接陶瓷板的設計進行實驗。

4.2 第二階段陶瓷複合纖維板抗彈測試

4.2.1 彈道測試結果

執行陶瓷厚度 7、8 及 9 mm 搭配纖維比例 1:1、1:1.5 及 1:2 之彈道實驗測試(9 組，含重複實驗共 27 片)，測試結果如表 7。7 mm 陶瓷的靶板組合 9 發均可抵擋 0.30" 穿甲彈，

8 mm 有 8 發可以抵擋 1 發無法抵擋，而 9 mm 均無法抵擋且有 7 組纖維脫層的現象。

因為本實驗陶瓷破碎程度嚴重，致陶瓷碎片無法蒐集完整，僅探討纖維板吸收能與凹陷深度、凹陷體積的關聯，有鑑於 S7K1X1 組合的第 3 發彈初速過低的情形，所有實驗均僅以第 1、2 次測試數據來進行後續包含田口法的分析。

4.2.2 纖維凹陷深度量測及分析

纖維板的凹陷深度量測是以鐵尺貼平纖維板平面作為基準，使用油標卡尺的「深度尺」進行深度量測（如圖 10），量測平面至 Kevlar 及 UHMWPE 纖維的深度，並取其平均值為凹陷深度，而脫層的纖維板不納入討論，如表 8。



圖 10. 纖維深度量測

陶瓷的各厚度中纖維凹陷深度(S_d)與能量吸收(J)的關係可換算成單位凹陷深度吸收能(J_d)，算式如式(3)（如圖 11），可知纖維總厚度與每單位的凹陷深度所吸收的能量為正相關，當纖維厚度越大（陶瓷厚度越小）時其纖維吸收能量的效率越佳。

$$J_d = \frac{J}{S_d} \quad (3)$$

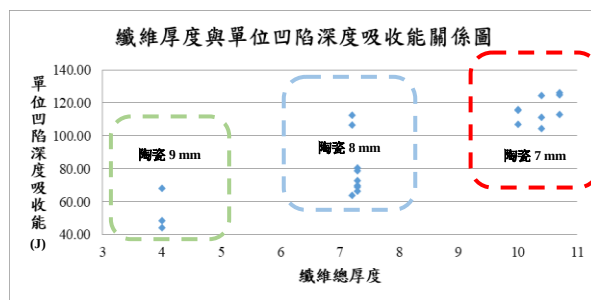


圖 11. 纖維厚度與單位凹陷深度吸收能關係圖

表 7. 測試結果表

實驗編號	總厚度 (mm)	面密度 (kg/m ²)	初速 (m/s)	末速 (m/s)	靶板吸收能(J)	平均值(J)
						標準差
S7K1 X1	17.4	32.93	844	0	3775.4	3568.4
			838	0	3721.9	
			778	0	3208.0	313.3
S7K1 X1.5	17.0	32.40	837	0	3713.0	3710.2
			843	0	3766.4	
			830	0	3651.2	57.7
S7K1 X2	17.7	32.92	833	0	3677.6	3657.1
			825	0	3607.3	
			834	0	3686.4	43.4
S8K1 X1	15.2	32.99	828	342	3013.7	3482.9
			840	0	3739.7	
			835	0	3695.3	406.9
S8K1 X1.5	15.3	32.83	840	0	3739.7	3754.5
			842	0	3757.5	
			843	0	3766.4	13.6
S8K1 X2	15.3	32.83	833	0	3677.6	3654.1
			831	0	3660.0	
			827	0	3624.8	26.9
S9K1 X1	13.0	32.90	830	399	2807.4	2983.2
			840	473	2553.9	
			835	142	3588.4	539.2
S9K1 X1.5	13.2	32.89	834	282	3265.0	3542.6
			839	107	3670.1	
			837	62	3692.6	240.6
S9K1 X2	12.9	32.59	833	285	3247.1	3484.3
			832	161	3531.4	
			836	75	3674.3	217.5

註：S 後數字代表陶瓷厚度；K 及 X 後數字代表纖維厚度比例。

4.2.3 纖維凹陷體積量測及分析

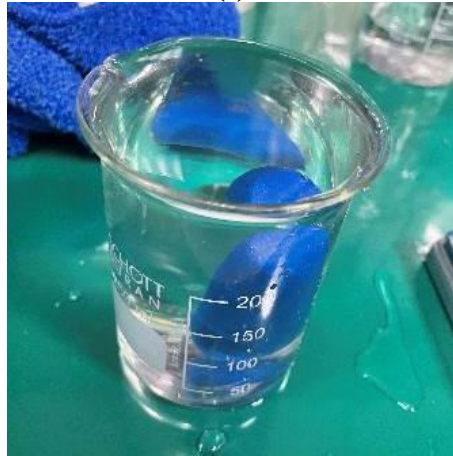
纖維凹陷體積量測亦是以纖維板平面為基準，填補油土後將其放入滿水的燒杯，利用油土與水分離的特性量測滿水與排水後的重量差異(M_w)，除以水密度($D_w=1.0 \text{ g/cm}^3$)後即

為排出水的體積(V_w)，亦為纖維凹陷體積(V_f)，算式如式(4)，量測圖及數據如圖 12 及表 9，針對脫層的纖維板不納入討論。

$$V_f = V_w = \frac{M_w}{D_w} \quad (4)$$



(a)



(b)

圖 12. 體積量測圖(a)油土測量圖；(b)油土排水圖

陶瓷的各厚度中纖維凹陷體積(S_v)與能量吸收(J)的關係可換算成單位凹陷體積吸收能(J_v)，算式如式(5) (如圖 13)，可知纖維總厚度與每單位的凹陷體積所吸收的能量亦為正相關。

$$J_v = \frac{J}{S_v} \quad (5)$$

陶瓷的各厚度中纖維凹陷體積(S_v)與能量吸收(J)的關係可換算成單位凹陷體積吸收能

(J_v)，算式如式(5) (如圖 13)，可知纖維總厚度與每單位的凹陷體積所吸收的能量亦為正相關。

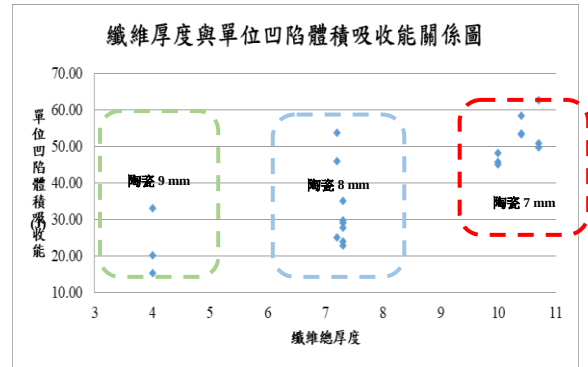


圖 13. 纖維厚度與單位凹陷體積吸收能關係圖

接續探討纖維佔總靶板厚度之比例(以下稱纖維佔比)對於吸收能量的關係，纖維佔比公式如式 6，由於陶瓷厚度 7 mm 的組合均可抵擋 0.30" 穿甲彈，纖維佔比介於 58%~61%；8 mm 仍有一定比率無法抵擋威脅，纖維比佔比介於 47%~48%；9 mm 均無法抵擋，纖維佔比介於 30%~32%。由此可知靶板中的纖維比例對抗彈能力具有一定的影響，在研究所選擇的三種陶瓷厚度下，纖維佔比與抗彈效能是成正比的，如圖 14。

$$r_f = \frac{h_k + h_x}{h_c + h_k + h_x} \quad (6)$$

其中 r_f 為纖維佔比， h_c 為陶瓷板厚度(mm)， h_k 為 Kevlar 纖維疊層板厚度(mm)， h_x 為 UHMWPE 纖維疊層板厚度(mm)。

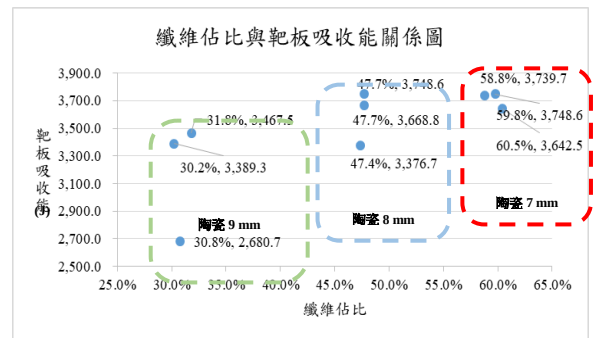


圖 14. 纖維佔比與靶板吸收能關係圖

由研究可知，纖維的比率對靶板的抗彈能力具有一定的影響，就研究結果而言，纖維佔比須達 60% 以上才能全數抵擋威脅。

表 8. 纖維凹陷深度量測表

實驗編號	纖維板總厚度(mm)	總厚度(mm)	凹陷深度(mm)	平均值(mm)	備考
				標準差	
S7 K1 X1	10.4	17.4	30.37	31.6	彈速過低
			35.62	3.6	
			28.84		
S7 K1 X1 .5	10.0	17.0	32.02	33.5	
			36.94	3.0	
			31.63		
S7 K1 X2	10.7	17.7	29.13	30.2	
			28.86	2.1	
			32.69		
S8 K1 X1	7.2	15.2	26.75	42.3	穿
			(35.13)	-	脫層
			57.87		
S8 K1 X1 .5	7.3	15.3	46.47	51.6	
			51.70	5.1	
			56.58		
S8 K1 X2	7.3	15.3	53.37	50.6	
			52.45	4.1	
			45.93		
S9 K1 X1	4.0	13.0	63.27	8.2	穿
			37.5	-	穿
			(76.20)		穿&脫層
S9 K1 X1 .5	4.2	13.2	(70.87)	(61.3)	穿&脫層
			(67.18)	-	穿&脫層
			(45.81)		穿&脫層
S9 K1 X2	3.9	12.9	(58.02)	(59.2)	穿&脫層
			(68.81)	-	穿&脫層
			(50.71)		穿&脫層

表 9. 纖維凹陷體積量測表

實驗編號	纖維板總厚度(mm)	總厚度(mm)	凹陷體積(cm2)	平均值(mm)	備考		
				標準差			
S7 K1 X1	10.4	17.4	64.6	64.9	彈速過低		
			70.0				
			60.1	5.0			
S7 K1 X1.5	10.0	17.0	77.0	80.2			
			82.3	2.8			
			81.3				
S7 K1 X2	10.7	17.7	72.5	68.0			
			72.5	7.8			
			59.0				
S8 K1 X1	7.2	15.2	56.2	102.1	穿		
			(81.3)	-	脫層		
			148.0				
S8 K1 X1.5	7.3	15.3	106.9	133.8			
			129.5	29.2			
			164.9				
S8 K1 X2	7.3	15.3	132.5	135.9			
			153	15.6			
			122.3				
S9 K1 X1	4.0	13.0	138.9	108.2	穿		
			77.4	-	穿		
			(236.6)				
S9 K1 X1.5	4.2	13.2	(153.7)	-	穿&脫層		
			纖維脫層變形嚴重致無法測量	-	穿&脫層		
					穿&脫層		
S9 K1 X2	3.9	12.9			穿&脫層		
					穿&脫層		
					穿&脫層		

4.2.4 田口法分析

本研究敘述藉由田口法來探討陶瓷與纖維對於抗彈效果的影響程度，分析採兩因子(陶瓷厚度、纖維比例)及三水準針對靶板「吸收能量」轉換為 S/N 比，如圖 15，算式如式(7)。

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (7)$$

從圖 15 可知陶瓷厚度(以下簡稱 A 因子)的變化較纖維比值(以下簡稱 B 因子)來得顯著，選擇最佳因子水準為 S/N 比最高的，A、B 因子分別為陶瓷厚度 7 加上纖維比值 1.5。

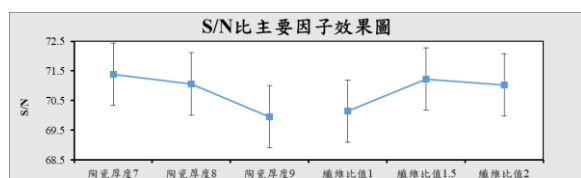


圖 15. S/N 比主要因子效果圖

接續藉由 ANOVA 分析輔助確認各因子的影響程度，如表 10，表中平方和(SS)、均方(MS)及檢定值(F)計算方式如下[16]：

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2 \quad (8)$$

$$SS_{Tr} = \sum_{i=1}^a n_i (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (9)$$

$$MS = SS / DOF \quad (10)$$

$$F = MS_{Tr} / MS_E \quad (11)$$

其中 T 代表總和， T_i 為個別因子，E 為殘差，a 為組數，n 為重複數， $\bar{y}$ 為組平均， $\bar{y}$ 為總平均，DOF 為自由度。

因為兩因子交互作用原因，本實驗殘差的自由度為 0，然 F 值需與 MS_E 進行運算，故將交互作用因子的 SS 及 DOF 均 polling 到 Error 中。

由表 10 及圖 16 顯示若在信心水準 78% 上，顯示 A、B 因子皆為重要影響因子 (F_0 值大於 $F_{0.22}$)，而就兩者貢獻度而言，A 因子的 47.52% 相較於 B 因子的 28.30% 明顯，因此可知陶瓷厚度影響較為顯著；另在「A、B 因

子」交互作用部分，貢獻度達 24.18%，由此可見「陶瓷厚度」和「纖維比值」間之關聯相當密切。

表 10. ANOVA 分析表

Source	SS	DOF	MS
A	3.3706	2.00	1.69
B	2.0074	2.00	1.00
AXB	(1.7147)	(4.00)	-
Error	1.7147	4.00	0.4287
Total	7.0928	8.00	至少 78%信心水準
Source	F_0	$F_{0.22}$	貢獻率
A	3.93	2.2640	47.52%
B	2.34	2.2640	28.30%
AXB	-	-	24.18%
Error	-	-	
Total	-	-	100.00%

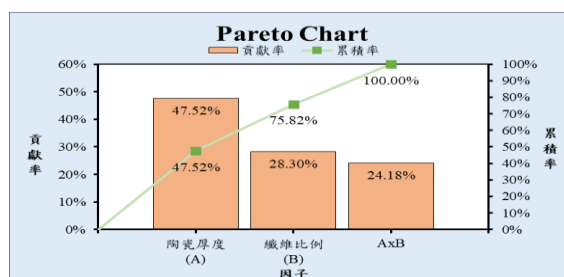


圖 16. 柏拉圖

對照前述分析結果可知道，不同厚度的陶瓷在同纖維比例的條件下，抗彈性能有明顯差異，而在同厚度的陶瓷中，改變纖維比例抗彈效果無明顯差異，這也說明 A 因子貢獻度較 B 因子高的現象。

而兩因子交互作用大的原因則是因為本實驗限制條件為面密度，當改變陶瓷厚度時，纖維厚度亦隨之調整，而當陶瓷厚度增加，然支撐的纖維厚度卻減少，導致背板支撐效果降低，以至於無法成功抗彈，這也呼應 5.2.4 纖維配比對於整體靶板的影響。

4.3 數值模擬分析

抗彈材料觀察指標除了靶板本身外，子彈的磨耗亦為重要的觀察指標，然因為穿靶的殘餘彈頭蒐集不易故可藉由模擬來輔助觀察。本實驗組合中分別有未穿靶及穿靶的組合，為確保模擬的參數符合實況，首先針對未穿靶的組合 S7K1X1 進行探討，透過纖維拉伸度及子彈殘餘質量以確認子彈的損傷參數(FS)。確認子彈損傷參數合宜後再觀察穿靶的組合，即可

模擬彈頭穿靶的過程及其殘餘質量，進而推算出更準確的殘餘能量。

4.3.1 未穿靶組合模擬模型比較

針對未穿靶的 S7K1X1 組合中，量測 Kevlar 及 UHMWPE 纖維個別的凹陷深度分別為 16.45 mm 及 42.74 mm，平均纖維凹陷深度為 29.60 mm，模擬的結果兩種纖維凹陷深度分別為 15.90 mm 及 46.46 mm；纖維平均凹陷深度 31.18 mm，由表 11 可知實際與模擬之誤差均小於 10%；另實驗彈頭殘餘質量為 5.60 g，模擬出彈頭殘餘質量為 1.31 g，因為本實驗為 1/4 建模，故全模型為 5.24 g，與實際差距為 0.36 g，誤差約 6.4%。

表 11. S7K1X1 比較表

樣本編號	比較項目		實際	模擬	誤差 %
S7K1X1	纖維凹陷深度 (mm)	Kevlar	16.45	15.9	3.3
		UHMWPE	42.74	46.5	8.7
		平均	29.60	31.2	5.3
	彈頭殘餘質量		5.6	5.24	6.4

4.3.2 穿靶組合模擬與比較

針對穿靶的 S9K1X1 組合中，子彈平均末速為 436 m/s，模擬結果平均末速為 421.1 m/s，與實際末速差距 14.9 m/s，誤差約 3.54%。

而彈頭部分，因實驗殘餘彈頭已破壞蒐集不易，以模擬的方式呈現彈頭殘餘質量為 6.6 g，如表 12。

表 12. S9K1X1 比較表

樣本編號	比較項目	實際	模擬	差距	誤差 %
S9K1X1	子彈末速 (m/s)	436	421.1	14.9	3.54
	彈頭殘餘質量 (g)	-	6.6 (1.65*4)	-	-

4.3.3 數值模擬穿靶能量比較

依據田口法分析結果 S7K1X1.5 為最佳組合，接續以此構型進行數值模擬分析，子彈以 833m/s 初速垂直方式撞擊靶體，可以發現時間從 0 μ s 到 43.9 μ s 期間，子彈速度變化最大，靶板吸收 0.30" 穿甲彈大部份的動能，在 44 μ s

之後應力慢慢傳遞到纖維部份，由纖維背板來吸收剩餘動能，如圖 17。

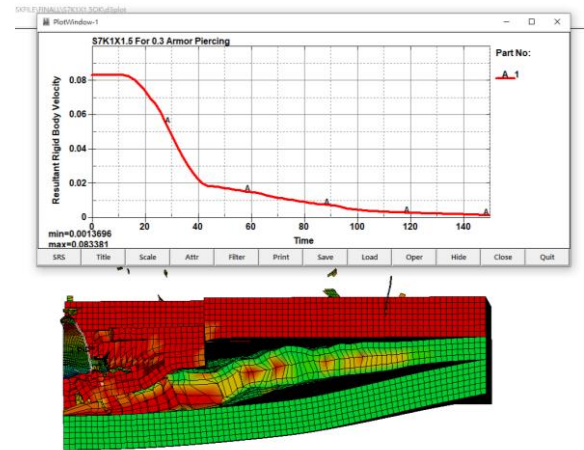


圖 17. S7K1X1.5 子彈速度變化圖

五、結論

本研究探討以不同厚度的碳化矽陶瓷，搭配 Kevlar 與 UHMWPE 纖維板組成的複合材料靶板，經由模擬分析與 0.30" 穿甲彈實施實彈測試，分析其抗彈性能，研究成果歸納如下：

- (1)纖維厚度與每單位的凹陷深度吸收能及凹陷體積吸收能均成正相關，基於本研究的組合中，當纖維厚度越大（陶瓷厚度越小）時纖維吸收能量的效率越佳。
- (2)如靶板在重量（面密度）受限時，陶瓷厚度 7 mm 在所有配比的纖維組合均可抵擋 0.30" 穿甲彈，纖維比率約佔整體靶板厚度 60%。
- (3)如靶板在重量（面密度）受限時，於陶瓷厚度不變的情況下，加入一定比例的 Kevlar 纖維可降低整體厚度，惟比例不可大於 UHMWPE 纖維。
- (4)如靶板在空間（厚度）受限時，改變陶瓷厚度為最有效的方式，然其纖維厚度比例亦需提高或增加背彈面的支撐，方能使陶瓷更有效率的發揮彈頭鈍化的效果。
- (5)如靶板在重量（面密度）及空間（厚度）均受限時，陶瓷厚度 8 mm 搭配纖維比例 1：1 的組合仍有無法抵擋的情形，建議朝增加 UHMWPE 纖維比例至 1：1.5，而纖維厚度佔整體厚度需大於 48%。
- (6)在纖維層厚度對陶瓷複合靶板抗彈性的影響中顯示不含陶瓷的 Kevlar 與 UHMWPE 纖維板組合中厚度，1：2 優於 1：1[11]，

而本研究加上陶瓷後，1：1.5 及 1：2 抗彈效果均優於 1：1，證明不同的纖維比例運用到陶瓷複合纖維板上趨勢一致。

參考文獻

- [1] Feli, S, Yas, M.H., and Asgari, M.R., "An Analytical Model for Perforation of Ceramic/ Multi-Layered Planar Woven Fabric Targets by Blunt Projectiles," Composite Structures, Vol. 93, pp. 548-556, 2011.
- [2] 孫志杰, 吳燕, 張佐光, 仲偉虹, 沈建明, "防彈陶瓷的研究現狀與發展趨勢", 宇航材料工藝, 第 5 期, 第 10-23 頁, 2000 年。
- [3] 吳俊育, "高強力複合纖維之抗彈能力分析", 碩士論文, 國防大學理工學院, 桃園, 第 1-10 頁, 2008 年。
- [4] 陳一忠, "碳化矽基陶瓷纖維複合材料抗彈性能研究", 碩士論文, 國防大學理工學院, 桃園, 第 1-117 頁, 2020 年。
- [5] Cronin, D. S., Bui, K., Kaufmann, C., McIntosh, G., Berstad, Todd., "Implementation and Validation of the Johnson-Holmquist Ceramic Material Model in LS-Dyna," 4th European Ls-Dyna Users Conference, pp.47-60, 2004.
- [6] 魏文福, "抗彈陶瓷複合材料最佳厚度組合之研究分析", 碩士論文, 國防大學理工學院, 桃園, 第 1-81 頁, 2014 年。
- [7] Suratkarnon A., "Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites", Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering, Pages 649-667, 668e, 2013
- [8] Manes A., "Ballistic performance of multi-layered fabric composite plates impacted by different 7.62 mm calibre projectiles", ScienceDirect, Procedia Engineering 88, 208 – 215, 2014.
- [9] Fawaz, Z., Zheng, W., and Behdinan, K., "Numerical simulation of normal and oblique ballistic impact on ceramic composite armours," Composite Structures, Vol. 63, No.3-4, pp. 387-395, 2004.
- [10] 胡年明, 朱錫, 侯海量, 陳長海, "高速片侵徹下高分子聚乙烯層合板的彈道極限估算方法", 中國艦船研究, 第 9 卷,

第 4 期, 2014 年。

- [11] 李樹濤, 田時雨, 鐘濤, 趙寶榮, 武新, "纖維層厚度對陶瓷複合靶板抗彈性的影響", 兵器材料科學與工程, 第 31 卷, 第 6 期, 2008 年。
- [12] Dov Sherman, "Impact failure mechanisms in alumina tiles on finite thickness support and the effect of confinement", International Journal of Impact Engineering, pp. 313-328, 2000.
- [13] Goncalves, D. P., Melo, F. C. L. de, Klein, A. N., and Al-Qureshi, H. A., "Analysis and investigation of ballistic impact on ceramic/metal composite armour," International Journal of Machine Tool & Manufacture, Vol. 44, No.2-3, pp. 307-316, 2004.
- [14] 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 1-155 頁, 2017 年。
- [15] 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, No. 3, pp. 211-231, 2001.
- [16] 蘇朝墩, "品質工程：線外方法與應用", 前程文化事業有限公司, 新北, 2015 年初版二刷。

符號表

英文符號	
A	材料常數
B	材料常數
C	應變率效應常數
C_0	波速
D	材料損傷量
D_1	損傷模型的材料常數
D_2	損傷模型的材料常數
E	楊氏係數
E_A	能量吸收(J)
E_h	塑性硬化模數
E_t	切線模數
G	剪切模數
HEL	Hugoniot 彈性極限(GPa)
h_c	碳化矽陶瓷厚度
h_k	Kevlar 纖維厚度
h_x	UHMWPE 纖維厚度
J_d	單位凹陷深度吸收能

J_v	單位凹陷體積吸收能
K_1	體積模數(GPa)
K_2	常數
K_3	常數
M	強度模型的材料常數
m_i	彈體初始質量(Kg)
m_r	彈體殘餘質量(Kg)
N	強度模型的材料常數
P	靜水壓力
P^*	標準化壓力
P_{HEL}	HEL 處的靜水壓力
ΔP	靜水壓力差
R	半徑
S_1	狀態方程式的係數
S_d	纖維凹陷深度
S_v	纖維凹陷體積
$SFMAX$	標準化的最大破裂強度
T	拉伸強度
TD	相對密度
t	時間
v_i	彈體初始速度
v_r	彈體殘餘速度
W_1	空氣中的重量
W_2	水中的重量
x, y, z	座標軸
Y_c	動態壓縮強度
Z	波阻抗
希臘符號	
γ_0	狀態方程式的材料常數
$\dot{\epsilon}$	應變率
$\dot{\epsilon}_0$	參考應變率
$\dot{\epsilon}^*$	標準化應變率
ϵ_f^P	破壞塑性應變
$\Delta \epsilon^P$	每個時間步幅積分計算時的等效塑性應變
ρ_0	密度
ρ_c	碳化矽陶瓷密度
ρ_k	Kevlar 纖維密度
ρ_x	UHMWPE 纖維密度
ρ_{water}	水密度
ρ_{ex}	實驗用碳化矽陶瓷密度
ρ_{pu}	純碳化矽密度
μ	體積應變
ν	蒲松比
σ	真實等效應力

σ_{HEL}	HEL 處的等效應力
σ_y	降伏強度
σ^*	標準化等效應力
σ_i^*	標準化材料完整強度
σ_f^*	標準化材料破壞強度
計量單位	
cm/ μ s	公分/微秒
g	公克
g/cm ³	克/立方公分
GPa	十億帕 (1×10 ⁹ 帕)
J	焦耳
kg	公斤
m	公尺
mm	公厘
m/s	公尺/秒
μ s	微秒 (1×10 ⁻⁶ 秒)
"	英吋(in)