

題目：由防彈衣演進論液態盔甲發展之研析



作者簡介：

王金印上尉，中正理工學院 92 年班，曾任排長、連長、補給官，現任職於步校特業組通化小組。

提要：

- 一、防彈衣的防彈原理為防制貫穿及緩衝作用，往往為了增加防護效果，會使總重量及製造成本增加。
- 二、將輕量化、舒適性及彈性佳為主要研發目標，在安全前提之下，減少防彈衣在使用上之缺點，並使防彈衣具備多元化之功能。
- 三、液態盔甲可防護現有防彈衣無法保護的部位，例如現有防彈衣根本無法保護士兵的許多關鍵部位，如手臂、頸部、腿部及肘部，因為這些部位需要經常活動和彎曲。液態盔甲防護範圍更加廣泛，防護效果更加顯著。
- 四、現有防彈衣在長時間穿著下，會消耗戰鬥人員的體力及增加疲勞度。而液態盔甲因輕量化，可有效改善此種狀況。
- 五、液態盔甲較現有防彈衣更輕、更軟及更具保護性，戰鬥人員穿著不會影響戰術動作的靈活度，增加作戰時攻擊及防禦上的優勢。

關鍵字：非貫穿性傷害、緩衝層、剪切增稠液體、奈米粒子溶劑

壹、前言：

防彈衣的效能除了基本的防制彈頭貫穿外，在防護非貫穿性傷害部分亦是現今防彈衣發展之重要方向。防彈衣的發展有一百餘年的歷史，雖對一般制式手槍（初速小於 500 m/s）之貫穿性傷害能有效防護，但在高速槍械或特種子彈防護上

及非貫穿性傷害方面仍存在相當程度之問題¹。

緩衝層之引入有助於提升防彈衣在非貫穿性傷害方面之防護，所以尋求適當之緩衝材料或結構，並且在不影響防彈衣原有之防護性能的前提下，將有助於提升防彈衣在使用上之安全性。減弱衝擊係設計人體防護產品時所考慮的主要目標，針對不同的應用場合，對防護產品的要求亦不同，不僅追求高防護性能，甚至於要求完全“消除衝擊”。實際上，任何防護產品抗拒外部衝擊的能力都是有一定的限度。透過材料之複合及結構之設計可在不影響防護性能之情況下，具備消除衝擊之能力，甚至在整體之效益上能有所提升。

防彈材料於抗彈裝甲之應用，係將抗彈緩衝概念發揮至極致的表現。而緩衝概念的引入確實導引了防彈或抗彈裝備的發展。早期之防彈衣係以防貫穿性傷害為主，所以大多選取單一材料進行疊層組合以達到防止彈頭貫穿之目的。隨後亦有研究者將尼龍(Nylon)織物與克維拉(Kevlar)織物疊層後再利用車縫結構完成補強疊層方向之結合，期望以此種結構達到緩衝之效果，但其緩衝效果仍有限。直到非貫穿性傷害受到重視，才有部分研究以橡膠(Rubber)或聚氨酯(PU)加入防彈裝備結構中以耗散彈頭剩餘部分的衝擊能，進而改善防彈衣之非貫穿性傷害，但此種緩衝結構仍有其強度不足之缺點，在受特種彈頭衝擊時仍有可能發生貫穿現象。故液態盔甲可將上述缺點作進一步的改善，更符合使用上需求。

貳、防彈衣發展現況

一、防彈原理

軟式防彈衣吸收能量的方式主要包括織物的變形及破壞。織物的變形包括彈頭入射方向的變形和入射點臨近區域的拉伸變形(如圖 1 所示)。另外能量通過摩擦以熱能的方式散發亦是軟式防彈衣吸收能量的方式。軟式防彈衣對彈頭衝擊後之能量吸收的關鍵在於：拉伸防彈織物的紗線並使其斷裂，且使織物內部

¹丁書禎，淺談單兵防彈裝備的現狀與發展，高科技纖維與應用，第二十五卷第二期，p.14~18 (2000)。

紗線之間和織物不同層面之間的相互作用，造成織物整體形變(如圖 2 所示)。在上述能量吸收過程中，亦有一小部分的能量通過摩擦(纖維/纖維、纖維/彈頭)轉化為熱能。彈頭擊中織物後，會在彈著點區域產生一個徑向的振動波，並通過紗線高速擴散。當彈頭衝擊多層克維拉織物時，它的高強度擋住彈頭，藉由纖維本身受力變形，消耗掉彈頭的動能。當彈頭衝擊多層克維拉織物時，產生夾彈現象，前面數層發生貫穿現象。彈孔表觀形態為：彈頭衝擊之一側，彈孔近似菱形，纖維斷裂面不很光滑，除剪切破壞外，纖維有一定程度的拉伸破壞。

彈頭衝擊時，克維拉疊層織物的破壞過程可分為 3 個連續的階段：

- (1)剪切破壞階段：彈頭作用在疊層織物，纖維被剪切，同時伴有後層纖維的拉伸變形。
- (2)拉伸破壞階段：隨著彈頭速度降低，纖維開始受到拉伸作用而變形，彈頭的動能轉化為纖維的形變能，當纖維的拉伸應變超過複合抗彈緩衝織物研製時最大性能後，纖維被拉伸破壞。
- (3)“凹陷”形成階段：由於彈頭的減速，纖維的拉伸變形受到了後層織物纖維的組織限制，參與阻止彈頭前進的後部纖維數量增多，疊層織物開始形成“凹陷”，彈頭的動能進一步被纖維的拉伸變形所消耗。彈頭在完成對疊層織物的穿透以後嵌在後一層織物上，該層織物的背面發現明顯的球冠形的塑性變形，之後疊層織物的變形越來越大形成“凹陷”²。

² Lee B.L., Song J.W., Ward J.E., “Failure of spectra polyethylene fiber-reinforced composites under ballistic impact loading”, Journal of Composite Materials, 28 (13), p.1202~1226 (1994).

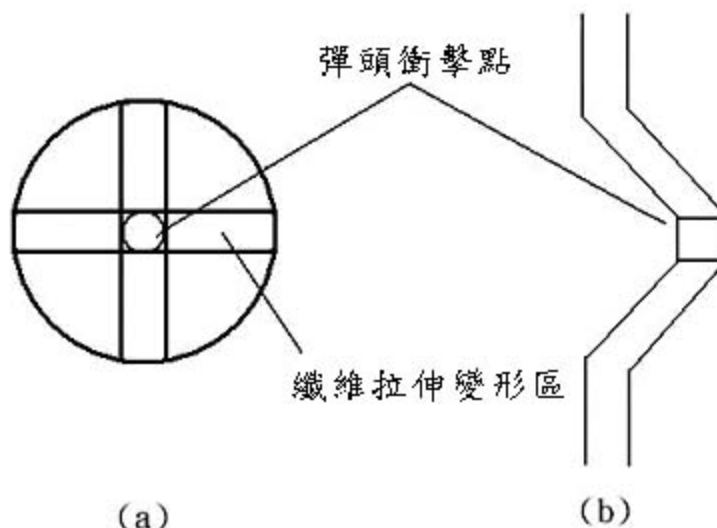


圖 1 彈頭衝擊防彈織物之示意圖³

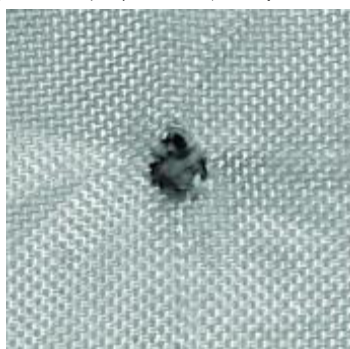


圖 2 彈頭衝擊面之彈孔型態（第 1 層）⁴

緩衝的概念源於抗撞擊結構及包裝材料，主要係利用材料之減震性能及特殊之緩衝結構設計達到耗散應力或能量之目的以減低被保護物品或人員之傷害⁵。而抗彈緩衝的概念源於軟硬複合式防彈衣，其作用機制係由硬質防彈材料承受彈頭衝擊使彈頭及硬質防彈材料發生形變或斷裂，消耗了彈頭大部分的衝擊能，再由軟式防彈材料如克維拉織物吸收、擴散彈頭剩餘部分的衝擊能，達到緩衝的作用，進而降低非貫穿性傷害。

³ 羅應鈞、黃鼎貴，“防彈複合材料(一)：個人防護裝備用之複合材料”，強化塑膠廣用新知，第二十八期，p.80~88 (1986)。

⁴ 夏軍佳、衛甘霖、張征定，“纖維力學性能與防彈性能的關係”，高科技纖維與應用，第二十八卷第五期，p.45~48 (2003)。

⁵ 陶俊林、蔣平、餘作生，“一種描述材料動態緩衝特性的新參數”，振動與衝擊，第 20 卷第 4 期，p.12~15 (2001)。

現今之防彈衣大多以軟式防彈材料為主，決定其防彈性能的主要因素包括纖維材料之強度及模數、織物重量及厚度；其次係製成防彈背心材料的組織結構。織物結構在防彈性能上雖非主要影響因素，但在緩衝效果上仍為重要影響因素之一⁶。以期改善防彈衣之非貫穿性傷害(如圖 3 所示)，進一步增加防彈衣在使用上之安全性。



圖 3 人體穿著防彈衣受彈頭射擊所造成之非貫穿性傷害⁷

二、防彈材料之發展：

(一) 防彈材料之發展歷經三個重要時期：

1. 第一個時期是以硬式材料如金屬（包括合金材料）、陶瓷等為主，此種硬式材料之防彈原理係利用其高剛性之特性，阻擋彈頭並使彈頭變形耗散其部分動能，再經材料破裂或破碎以吸收衝擊能。此時期之材料大多為板塊狀，且其重量大常導致穿著人員機動性不佳，此外在防護多次彈頭射擊上較不利。
2. 第二個時期之防彈材料以尼龍、克維拉等軟式材料為主，其防彈原理係憑藉高強度、高模數之纖

⁶ 羅應鈞、黃鼎貴，“防彈複合材料(一)：個人防護裝備用之複合材料”，強化塑膠廣用新知，第二十八期，p.80~88 (1986)。

⁷ <http://www.gunammo.cn/alse/index/Bullet%20proof%20vest.htm>

維材料受彈頭衝擊造成彈頭變形、纖維拉伸變形及破壞而吸收衝擊能達到防彈之目的⁸。此時期之材料大多以織物型態經疊層組合而成，重量輕且較柔軟，在機動性方面已大幅改善，但在防護超高速（初速大於 1000 m/s）槍械上仍無法達到較佳之效果。就材料吸收能量的型態不同而有不一樣的能量吸收，一般就材料而言通常越硬的材料其彈性延伸率較低，吸收能量的能力較低，作為防彈衣的材料除考慮其吸收能量的大小外，還需考慮能量的擴散速度，最好是能兼具吸收大能量且擴散速度非常快的材料為最佳。結合了上述兩項的特點的複合防彈衣即是採用硬質材料使彈頭破碎變形消耗彈頭的穿透能力，以軟質材料吸收彈頭的剩餘能量，完成抗彈防護的全過程，解決了非貫穿性衝擊對人體的間接損傷，也使防彈材料正式邁入第三個時期。

3. 第三個時期即是以軟硬複合式材料的組合為主，為達到較佳之防護效果及改善非貫穿性傷害。主要結構是以軟式材料為內襯，以硬式材料作為表面層和補強材料，利用硬式材料阻擋彈頭並造成變形再由軟式材料耗散衝擊能，由二者之相互配合能有效提升防彈衣之防護性能及改善非貫穿性傷害。此種軟硬複合式材料所發展出之防彈衣則是由防彈背心搭配防彈插板組合而成，可依不同防彈需求設計，將其插於防彈背心的前片和後片，以提高特定部位之防彈能力。

（二）目前發展：

此外隨著複合材料的發展，目前使用於防彈衣上的硬式防彈材料大部分是纖維複合材料。其作用機制係由纖維作為補強材料，承受大部分應力，再藉由樹脂基體通過界面將應力以應力波方式傳遞

⁸ 王浩，防彈衣及防彈用複合材料，高科技纖維與應用，第二十六卷第五期，p.21~24 (2001)。

給纖維，使應力能夠均勻分散，達到耗散衝擊能之目的。此種防彈複合材料大多係以各種熱固性或熱塑性樹脂為基體，以克維拉纖維、超高分子量聚乙烯(UHMWPE)纖維、玻璃纖維等為補強材料所製成，可將其應用於其他防彈領域如防彈盾牌、抗彈裝甲等⁹。

複合材料的結構隨著複合材料加工技術的發展而迥異。由於在這類材料中，纖維所受的制約較小，在高速彈體的衝擊下容易被擠壓而產生側向移動，使相應的斷裂纖維根數較少，導致較低的材料吸收能量能力和較低的彈道極限速度¹⁰。這類材料的彈道損傷主要包括整體變形、局部壓陷、基體開裂、分層和纖維斷裂等型態，有時還存在少量的纖維拔出¹¹。

近年來在材料上備受青睞的是採用衝擊抵消力的“氣墊層材料技術”製造的軟式防彈衣，氣墊層在彈頭衝擊抗衝擊層與緩衝層時，能吸收最大負荷的衝擊能並迅速釋放，最大限度的發揮了抗衝擊層材料與緩衝層材料的抗剪切柔韌能力，亦降低了軟式防彈衣的製造成本。

三、防彈標準之演進：

彈頭衝擊於防彈衣上，雖未穿透，但其衝擊能透過防彈衣作用於人體，亦可能造成人體的內臟傷害，嚴重者甚至可能致死。所以測試彈頭作用於人體動能量的傷害評估就非常必要了。歐美許多國家採用的方法係利用仿人體肌肉的膠泥或者肥皂，作成模型將防彈衣固定在此模型上，在遭到槍擊後彈頭的衝擊動能通過防彈衣傳給模型而使模型變形，產生的所謂的衝擊凹陷。用測量衝擊凹陷的深度，來衡量接受到的衝擊動能量。但對於人體可以承受多大的衝擊凹陷，現

⁹ 梁大同、謝新龍，“複合防彈裝甲先進材料應用簡介”，材料與社會，第 68 期，p.89~93 (1992)。

¹⁰ Jenq S.T., Mo J.J., “Ballistic impact response for two-step braided three-dimensional textile composites”, AIAA Journal, 34 (2), p.375~383(1996).

¹¹ Cuniff P M., “An Analysis of the System Effects in Woven Fabrics under Impact”, Textile Review J, 62, p.495~509 (1992).

在還難無定論，其原因首先係因應每個人的身體素質和胖瘦不同，其承受能力都有很大差異，其次，除了深度以外，凹陷坑的寬度和形態都與接受的動能大小有關，這一點常被研究者所忽略。不過現在亦只能用測凹陷深度的方法來測試防彈衣的防衝擊動能的能力，用來評價防彈衣的品質。

從美國和德國等許多歐美國家的測試標準來看，他們關於規定合格防彈衣的凹陷深度不盡相同，但一般皆在 2 至 4.4 公分之間，一般認為超過 4.4 公分就會對人體造成嚴重傷害。軟式防彈衣通常以多層克維拉材料製成，可以擋住一般手槍子彈，如果要防護衝鋒槍或步槍子彈，還要另外加上特製硬板。

四、防彈衣的防彈等級：

防彈衣防護等級各國有不同分類標準，一般最常用的是美國美國司法學(The National Institute of Justice, NIJ) 的標準 NIJ 0101.03 和 0101.04¹²。所謂防彈衣的防護等級就是符合 NIJ 所頒訂之 NIJ 0101.03 和 0101.04 防彈衣分級標準(如表 1、2 所示)，並通過實驗室實彈測試合格。目前美國國內有兩家 NIJ 認證合格的實驗室。一家為 United States Test Laboratory 另一家為 H. P. White Laboratory。這兩家實驗室目前為美國國內僅有的權威測試及認證實驗室。

防彈衣的級數是以美國懷特實驗室(H. P. White Laboratory)作出的實驗，後來被美國國家司法協會(The National Institute of Justice, NIJ)定為一個防彈衣的通用標準。分別為 NIJ 0101.03 與 NIJ 0101.04，前者是 1987 年，後者是 2001 年訂立。NIJ 0101.04 規範中防彈衣總共分為六級：

¹² NIJ 0101.04 Body Armor Standard

Type I / Type IIA / Type II /Type IIIA /Type III /Type IV（按照防禦力順序排列，左邊 I 最弱而 IV 最強）

前面四個的測試距離是 5 公尺，後面兩個測試距離是 15 公尺，原因是因為前面四個設計是用來抵擋手槍彈，後面兩個測試基準是步槍。標準是彈頭打中後，其凹陷度不可以超過 4.4 公分。

表 1 NIJ0101.04 標準之防彈等級規範¹³

Threat Level	Bullet caliber and type	Bullet Image (Fit to scale)	Bullet mass (grains)	Impact velocity	
				ft/s	m/s
I	.22 caliber long rifle, round nose lead		40	1080	329
	.380 ACP full metal jacket, round nose		95	1055	322
IIA	9mm full metal jacket, round nose		124	1120	341
	40 S&W full metal jacket		180	1055	322
II	9mm full metal jacket, round nose		124	1205	367
	.357 magnum jacketed soft point		158	1430	436
IIIA	9mm full metal jacket, round nose		124	1430	436
	.44 magnum jacketed hollow point		240	1430	436
III	7.62 NATO full metal jacket (M80 Ball)		148	2780	838
IV	.30 caliber armor piercing (AP M2)		166	2880	869
Special	User defined	User defined		User defined	

¹³ 同註 12

表 2 防禦等級跟彈種整理(參考表 1，作者整理)

防 禦 等 級 跟 彈 種 整 理					
防彈等級	彈頭種類	彈頭重量	初速	測試距離	備註
等級 I	.22LR(.22 Long Rifle 底緣底火式子彈)	2.6 公克	329m/s	5m	
	.38ACP(9mm*17) (穿甲彈)	6.2 公克	322m/s	5m	
等級 IIA	9mm FMJ (Full Metal Jacket)	8 公克	341m/s	5m	
	.40S&W(10mm*21) (10mm 手槍彈藥)	11.7 公克	322m/s	5m	
等級 II	9mm FMJ	8 公克	367m/s	5m	
	.357Magnum(9mm*33) (.357 麥格農子彈)	10.2 公克	436m/s	5m	
等級 IIIA	9mm FMJ	8 公克	436m/s	5m	一般來說要衝鋒槍的槍管長度才會達到這個速度
	.44Magnum(10.97mm*33)	15.6 公克	436m/s	5m	使用大型轉輪手槍
等級 III	7.62mmNATO(7.62mm*51) (步槍子彈)	9.6 公克	838m/s	15m	國軍的 57 步槍使用此種彈藥
等級 IV	.30cal(7.62mm*63)	10.8 公克	869m/s	15m	國軍古早的 30 機槍跟 30 步槍(春田 M1903)，即是此種口徑
超過等級 IV	沒有規範	沒有規範	沒有規範	沒有規範	
1 公克=15.38galns					

參、液態盔甲介紹：

鑑於現今防彈衣重量重、防護範圍小、靈活度差，英國研究人員在防彈材料上做一大突破。目前在防彈材料的發展即將要進入一個新紀元，突破以往以固體材料為主，改以液態材料。這項科技究竟隱含何種秘密，使之足以顛覆傳統設計經驗，以下則由傳統材料觀念逐步剖析，藉此揭開此先進材料的神秘面紗。

一、運用原理：

剪切增稠液體材料(如圖 4 所示)可歸類為高分子基複合材料 (Polymer Matrix Composite Material)。所謂複合材料，係將二種（含）以上材料依使用目的混合後，互相損長補短其性質所獲者，日常生活應用屢見不鮮，用於建築的鋼筋混凝土即屬此例，其中量少且可提昇整體強度者，稱為強化材

(Rein-forcement)，量多而負責吸收能量或增加韌性者，稱為基材 (Matrix)，其複合性質可經內含各材料比例與性質之乘積相加後概算獲得。一般高分子基複合材料係將較低比例微米尺度之高強度顆粒、纖維或薄片均勻混合於固態塑膠，故使用方式近似傳統塑膠材料；剪切增稠液體則係將奈米尺度之硬質顆粒，均勻加入高分子合成「膠體」內，其應用方式自亦全然不同。剪切增稠液體材料的作用機制係以“非牛頓流體”理論所主導，可產生不同於尋常流體運動方式。此成果是全新研發思維，顛覆傳統設計¹⁴。

¹⁴ 〈美新式防彈衣材料的神秘面紗〉《青年日報》(台北)，民國 99 年 6 月 2 日，軍事新聞版。



圖 4 玻璃小瓶裏裝的淡藍色液體為“剪切增稠液體”¹⁵

二、使用效能：

此材料受到和緩應力作用時，內部仍可自由流動，顯現膠體原有可任意塑變之性質；然當強大外力驟至，其內部顆粒與基材分子卻產生互相連鎖阻隔作用，材料整體瞬間展現極其堅硬之特質，直到外力消失後即恢復原有狀態。剪切增稠液體的外力阻絕效果明顯優於目前使用克拉維織物的防彈材料，在等厚度條件下相較，其吸能效果至少可達其克拉維織物的三倍，且隨厚度增加，吸能效果亦呈正比關係遞增。

三、美英兩國目前發展狀況：

（一）美國陸軍研究實驗室(ARL)發展現況¹⁶：

自 2002 年起，美國陸軍研究實驗室(U. S. Army Research Laboratory)對外發表液態盔甲研究成果。其“剪切增稠液體”技術由“美國陸軍研究實驗室”和“美國特拉華州立大學合成物質研究中心”下屬的“武器和原料研究理事會”共同開發，主要以添加「剪切增稠液體(Shear-Thickening Fluid, STF)」之織物製作，其柔軟質輕之特性，使身著此衣者活動自如，完全脫離以往笨重累贅的

¹⁵ 《GIZ MAGAZINE》(英國倫敦)，2010 年 8 月 13 日。

¹⁶ 美國陸軍研究實驗室(ARL)網站(www.arl.mil/wmrd/Tech/NanoMat.pdf)。

印象，且無損其防彈效果。採用”剪切增稠液體”材料的防護衣已經過試驗，能夠防止刀刺、炸彈碎片、低速子彈、甚至皮下注射器針頭的傷害。在這個研制階段，它適合警察和獄警使用。下一步是提高這種防護材料的堅固性，使它足以抵擋高速子彈和路邊炸彈的襲擊。

（二）英國航太系統公司(BAE)發展現況¹⁷：

一種新的液態盔甲物質由英國科學家開發出，能在遭受子彈衝擊時變得黏滯以降低衝擊力，產生防彈效果。研發人員認為，可利用這種物質製造出更輕、更有效的防彈衣，提升戰場士兵的人身保護。

英國航太系統公司（BAE Systems）研究人員開發的這種液態盔甲(如圖 5 所示)，被稱為「防彈奶黃」(bullet-proof custard)。它結合一種具有「剪切稠化」(shear thickening)特性的液體，即流體黏度會隨剪切率增加而提高，以及現今用於防彈衣的「克維拉」纖維製成。研究人員對這種新液體的化學成分保密，僅表示這種液態盔甲是利用被子彈撞擊時變得濃稠、帶有黏滯性來發揮防彈效果，跟奶黃遇熱和攪拌後變稠的特性相似，因而被稱為“防彈奶黃”。

BAE 設計與材料技術業務開發經理佩尼形容，從遭到撞擊時分子鎖在一起的角度來看，這種材料技術與奶蛋糊很像。研究人員在測試時，以一把大型空氣槍分別對著未經新液態盔甲處理過的 31 層克維拉，和結合新液態盔甲的 10 層克維拉，以每秒超過三百公尺的速度擊發球狀金屬子彈，結果顯示後者的防彈效果較好。

當前的標準防彈衣使用厚重又多層的克維拉，會限制行動、造成疲勞，這種新的輕量液態盔甲效果更好，也可以減少士兵疲勞感，最終將能用

¹⁷ 〈英國研發出新式防彈衣〉《自由日報》(台北)，民國 99 年 7 月 14 日，國際新聞版。

於製造更輕、更有彈性、防彈效果更好的防彈衣。。

“防彈奶黃”這種高度機密的物料，能夠透過即時變厚和硬化，來吸收子彈或榴彈衝力。英國防部相信，這種高科技的“液態盔甲”經進一步改良後，將變得更輕身和更具彈性，更能保護士兵。目前英國(2010)已預計2年內可供英軍使用。



圖5 英國目前研發的液體盔甲¹⁸

四、測試實況

傳統防彈保護衣由數十層克維拉人造纖維布料製造，研究人員在每層克維拉布料之間，注進“剪切增稠液體”，從而製成“液態盔甲”。

研究人員以一件以31層克維拉布製成的防彈背心，與10層克維拉布但在每層之間注入“剪切增稠液體”的防彈背心比較，再以9毫米口徑手槍射擊(如圖6所示)，發現後者不但能防彈，而且卸掉子彈衝力的面積更闊(如圖7，上圖3所示)。不像軟式防彈背心，子彈卸力集中一個細小面積，易導致士兵出現瘀傷、碎骨甚至內臟受傷。¹⁹

¹⁸同註15。

¹⁹革命性“液態盔甲”輕軟遇彈即硬〉《文匯報》(香港)，2011年1月15日，國際新聞版。



圖 6 軟式防彈背心與液態盔甲的示意比較圖²⁰

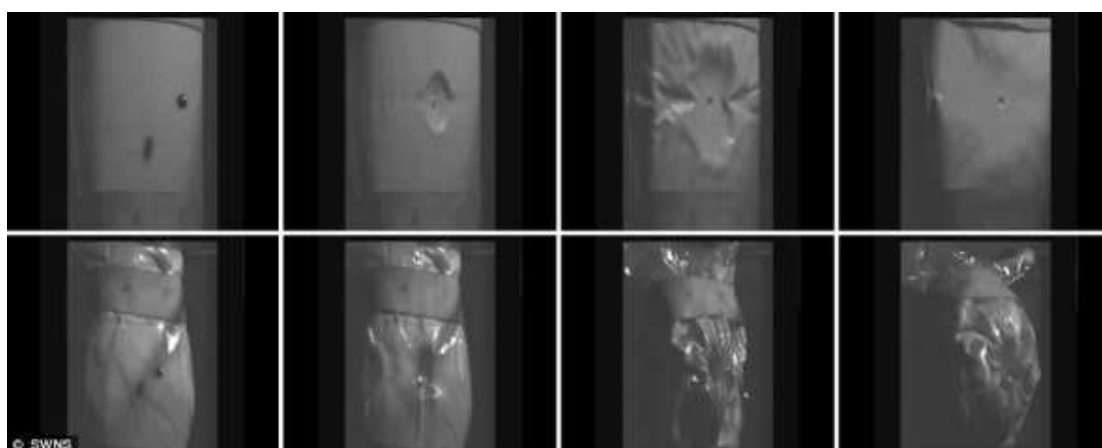


圖 7 液態盔甲與軟式防彈背心的實彈射擊比較圖²¹

上圖顯示的是一顆子彈射向 10 層與克維拉纖維結合的液體防護衣。

下圖顯示的是一顆子彈射向 31 層未經處理的克維拉纖維。

肆、防彈衣效能比較

一、防彈衣材質、價錢、重量及防彈效果比較

以我國的戰術 II 型防護背心、美國的 IBA（攔截

²⁰ 同註 19。

²¹ 同註 19。

者)防彈背心及英國的新式液態盔甲對於材料、價錢、防護範圍、重量及防彈效果做比較(如表 3 所示)。此三款防彈衣的防彈效果皆為 IIIA 等級,但在材料、重量、防護範圍及價錢不盡相同。材料的不同,直接影響到防彈衣的重量,其中以美國的 IBA(攔截者)防彈背心為 7.4 公斤最重,我國的戰術 II 型防護背心與英國的液態盔甲較輕,但液態盔甲的防護範圍為全身(頸部以下,不含頭部),重量僅比防護上半身的戰術 II 型防護背心多 1 公斤。甚至價錢以液態盔甲最低。

表 3 各式防彈衣比較表(作者整理)

國別	款式	材料	價錢	防護範圍	重量	防彈能力
中華民國	戰術 II 型防護背心	纖維疊層不織布	25000 台幣	上半身 (不含頸部以上、手臂)	4 公斤	IIIA 級
美國	IBA(攔截者)防彈背心	軟質的防彈背心(OTV)加上硬質的防彈插板(SAPI)	1600 美金	上半身 (不含頸部以上、手臂)	7.4 公斤	IIIA 級
英國	液態盔甲	剪切增稠液體(SFT)加克維拉(Kevlar)織物	500~600 美金	全身 (頸部以下,不含頭部)	5 公斤	IIIA 級

二、液態盔甲之優缺點：

(一) 優點：

1. 材質輕，防護力不減：

沉重的防彈衣讓士兵動彈不得,防彈衣的重量是在使用上所面臨的窘境;部隊需要受到保護,但是,假如不減少防護面積的話,防彈衣的重量就無法降低,而士兵就必須承受這些負擔。液態盔甲比美國現用的攔截者防彈衣減少三分之一的重量,且防護面積增加,讓士兵在戰場上多了喘息的機會。

2. 可保護其他的關鍵部位：

眾所皆知，現有防彈衣根本無法保護士兵的許多關鍵部位，如手臂、頸部、腿部及肘部，因為這些部位需要經常活動和彎曲。如今的防彈衣，通常叫做防彈背心，不但厚重，而且硬梆梆，不使用來製造彎曲折疊的褲子和袖子，因此只能護住軀幹部份。而利用“剪切增稠液體”處理升級的液態盔甲，柔軟堅韌，可以製造連袖子帶腿褲的全套衣服，保護士兵的任何部位。

3. 增加士兵靈活度：

現有防彈衣不僅不舒服，且因機動性降低而造成危險，更會產生如壓力性骨折等身體傷害。液態盔甲中的“剪切增稠液體”提升防彈衣的舒適度和彈性，對於防護裝備等級更提高一個層次，可稱為「不限制行動之護具」。

4. 可自行固態恢復液態：

“剪切增稠液體”是一種處在固液混合狀態的奈米粒子溶劑。“剪切增稠液體”滲入織物中，通常是以液態形式存在，但是，織物一但受到衝擊、壓緊，“剪切增稠液體”就會變成堅硬的固體，使織物更強韌，難以被穿透。

因此，利用“剪切增稠液體”製造的新型防彈衣，平時柔軟舒適，一旦遭到刀等利器砍、刺，或高速子彈、彈片衝擊，就在受到衝擊的瞬間變得堅硬無比，而且能將衝擊力沿織物迅速分散開來，大大降低單位面積的壓力。當衝擊力消失，“剪切增稠液體”又恢復液態狀態，織物也重新變軟。

(二) 缺點

“剪切增稠液體”為全新開發材料，雖有前述多項優點，然因開發迄今歷時甚短，故仍有諸多疑慮尚待了解：高分子材料老化問題；極端溫度使用限制與壽期；受力變化時域測定；承載負荷最大限；其他物理性質測量等訊息，皆須確切掌握，方

能將材料做最有效之利用²²。

伍、對本軍防護裝備未來規劃運用之我見

單兵裝備在各國軍方的採購預算清單向來是敬陪末座，畢竟和亮麗炫目的高科技裝備相比之下，防彈衣之類的單兵裝備實在算不上什麼能夠拿出來見人的東西。正因這種心態作祟，因此單兵裝備的進步和變革也非常的緩慢，簡直可說是原地踏步。在萊特兄弟首次動力飛行一百年之後，航空科技已經邁入了超音速巡航時代，但是今天各國軍方的單兵裝備和二戰時期相比卻沒有多大進展，甚至有不少國家依然使用和二戰設計基本相同的單兵裝備。

目前本軍所使用的防彈衣質量重且體積大，且無法在各大演習中，供給所有參演人員；裝備不精良且數量不足，無法與美、英各國於作戰當中裝備齊全的狀況相比。倘若發生戰爭或攻擊行動，官士兵遭到槍擊，容易斃命或影響作戰。訓練一個士兵所花費的人事成本皆高於一件防彈衣的價格，但一個子彈可能就會讓這些投資付諸流水。甚至還有之後撫卹的問題，皆不是一筆小數目。目前本軍只有在實彈射擊時，才讓少數人穿著防彈衣，或是接替輪流穿著。甚至視同作戰的演習，無法讓每個人員皆有一件屬於自己型號大小的防彈衣。

本軍早期所使用的防彈衣，只有在心臟重要部位，放置一片鋼板能防貫穿傷害，其餘防彈衣防護部位，只有緩衝功能，無法有效防貫穿傷害。目前英國所研發出的液態盔甲，不僅質量輕、防護效果佳、防護範圍廣及價格便宜，是值得推廣至我軍各戰鬥部隊使用。在有限的經費狀況下，戰爭時重要性或危險因子高的人員優先發放，如統帥、高階軍官、狙擊手、防爆人員及第一線戰鬥人員。不只是戰爭及演習可使用，包括平時在訓練時，也可防範訓練危安，避免不必要之傷亡。

陸、結論

在科技的進步下，防彈衣的材質也日新月異，從中

²² 同註 14。

古時代的貴族所用的胄甲，之後的軟式防彈衣、複合材料的防彈衣，到現在的液態盔甲，可說是全新研發思維，顛覆傳統設計。新式奈米材料的液態盔甲運用”剪切增稠液體”的受力就硬，力消就恢復的特性，讓防彈衣發展進入一個新紀元。新式液態盔甲突破現有防彈衣的限制：質量重、防護部位受限及靈活度降低，讓戰場上的人員的生命安全獲得保障，減少戰力的損耗。雖然液態盔甲上還有問題需要克服，但是已經可以實際運用在戰場上，英國的部隊已經計畫全面換裝。液態盔甲可以增加作戰攻擊及防禦上的優勢，且製作成本不高，是本軍值得投資的一項防護裝備。