



● 軍事材料革新

液態裝甲導入防護裝具之研析

提要

顏瑞良

- 一、奈米漿料研製剪切增稠液體(Shear Thickening Fluid, STF)，係一種新型的防彈材料，具輕巧及撓曲性佳且又有抗彈的特殊功能，在傳統的防彈材料要同時兼具這樣的特殊功能幾乎是不太可能，而研製這樣的新型防彈材料，不僅可以改善目前國軍所使用厚重的防彈衣，對於醫療的防護材料及民生工業的減震材料上，也將會有一般傳統材料所無法達到的物理特性。
- 二、本研究克服軟式防彈衣仍需要多層克維拉纖維之缺點，以剪切增稠液體材料取代部分層數克維拉纖維材料，利用實彈測試獲得子彈初速及末速差之數據，研究其剪切增稠液體抗彈效果，提供未來研製液體防護裝具之先驅研究。
- 三、利用奈米漿料的剪切增稠特性，研究高效能減震墊片之吸震效果，利用高G值衝擊試驗機進行減震墊片之衝擊測試，獲得其衝擊G值及撞擊減震墊片後剩餘G值，其G值差為減震墊片所吸收之能量，研析該材料運用在防爆桶、防爆毯等各式防護裝具及老人防護、醫療用具及民生工業減震材料之可行性。

關鍵詞：剪切增稠液體、液態裝甲、奈米顆粒、流變性質

壹、前言

人類自從有戰爭以來，對於盔甲（戰鬥服）的研製、改良就從未停止，最早在中國的周朝就有完整的甲冑出現，以皮製材質加上一層膠水來強化皮革，並且增加防護力。同時在西方也有以青銅材質所製成的甲冑，但這類材質只有貴族才用得起，一般仍處於以厚布材質所製成的防護衣。漢朝已經有鐵製的金屬材質甲冑出現，運用大量的片狀鐵製材質編織在大片的皮革上，甚至在魏晉南北朝時代，戰士們所騎乘的戰馬也披掛了皮製的馬甲等，其目的就是為了讓戰場上的士兵在戰鬥中減少傷害，到了宋朝鐵製的甲冑、兵器發展更加蓬勃，但也因為這些鐵製的甲冑重量太重，嚴重拖垮士兵的機動力。而西方羅馬時代所穿著的戰衣演進也不例外，一般士兵、貴族及將領等穿著的甲冑都是以銅或是金屬片所製成，其缺點都是因為厚重，且隨著兵器的演進，甲冑的防護力漸漸不足。從過去到現在，東西方國家穿著的戰衣從皮革、厚布、金屬甲冑演變迄今使用的防彈衣，其目的就是為了製造輕巧、不影響機動力且又能防止利器傷害的防護衣，甚至迄今能阻擋子彈攻擊的防彈衣。

世界各個國家對於防彈衣的防護性和舒適性之間不斷的在尋找平衡點，希望能製造出一種既刀槍不入、又輕便柔韌的完美防護服。我們都知道，傳統的防彈衣不但厚重且撓曲性不佳，根本無法保護戰鬥人員所有關節部位，尤其是手臂、頸部、腿部和肘部等，因為這些部位需要經常活動和大角度的彎曲，傳統的防彈衣只能保護軀幹部分，無法在肢體上獲得全方位的防護，因此輕柔且刀槍不入的衣服，一直都只存在於神話和小說中，而盔甲的柔韌性和防護性一直是不可調和的矛盾。

貳、美國、英國與中國對「剪切增稠液體」之研究與發展

美國陸軍研究中心對於「剪切增稠液體」的新型防彈衣¹已經研究多年，將這種新材料導入防護裝具，使士兵平時穿起來柔軟舒適，一旦遭到突如其來的利器砍、刺，或子彈、彈片高速衝擊時，新材料會瞬間變得堅韌無比，保護士兵的安全，而且新材料能將衝擊力沿著織物的纖維迅速分散，降低單位面積的壓力強度，利用這種新材料製造複合式的防護服通常稱為「液體裝甲」²；而世界

- 1 Lee,Y.S.,Wetzel,E.D.,Egres Jr,R.G.,and Wagner,N.J., “Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids,” in Proceedings of the 23rd Army Science Conference, Orlando, FL, December, 2002.
- 2 Egres Jr,R.G.,Lee,Y.S.,Kirkwood,J.E.,Kirkwood,K.M.,Wetzel,E.D.,and Wagner,N.J., “Liquid armor: Protective fabrics utilizing shear thickening fluids,” IFAI ,Vol.4, p.26-27, 2004.

各個國家對於防彈衣的防護性和舒適性之間不斷的在尋找平衡點，希望能製造出一種既刀槍不入、又輕便柔韌的完美防護服。

一、剪切增稠液體增加紡織物防刺的功能

(一) 2010年Tarig等人，研究將剪切增稠液體浸漬Kevlar和Nylon等紡織物，利用自由落體重力測試觀察紡織物經過浸漬剪切增稠液體後阻擋穿刺的實驗，利用長釘及刀刃以自由落體方式衝擊織物，觀察織物穿刺深度及紗線斷裂情形，進而分析剪切增稠液體阻擋穿刺的衝擊能量，並以Quasistatic測試方式，將長釘和刀刃以5mm/min的速度向織物進行穿刺測試³，其有別於自由落體重力測試，而是以低速率向目標物進行穿刺，也證明

了剪切增稠液體能增加紡織物的防刺功能。

(二) 2011年中國江南大學蔣玲玲等人，研究將二氧化矽及聚乙二醇製程剪切增稠液體，經過靜態及動態的流變儀檢測均具有明顯的剪切增稠現象，並且利用不同人造纖維材料製程剪切增稠液體複合材料，經過掃描式電子顯微鏡、熱重量分析儀、准靜態防刺測試，證明剪切增稠液體複合材料可以提高防刺的性能⁴。

(三) 2014年Hasanzaden等人，研究將剪切增稠液體應用在紡織材料上，同時進行了防刺及抗彈的測試，證明剪切增稠液體能夠增加防刺及抗彈材料的韌性，並從流變儀上觀察，也證實影響剪切增稠流變的行為因素

圖一 長釘及刀刃進行Quasistatic測試

資料來源：同註3



- 3 Hassan, T. A., Rangari, V. K., and Shaik J., "Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, p.2892-2899, 2010.
- 4 蔣玲玲、錢坤、俞科靜、駱冬冬、李鴻順、曹海建，〈剪切增稠液體在防刺材料中的應用研究〉《化工新型材料》，第39卷6期，西元2011年6月，頁121-124。

包含奈米粒子的特性、顆粒形狀、顆粒大小及流體的分布等，都會影響流變的性質，同時也會影響複合材料上的應用⁵。

二、運用不同介質開發剪切增稠液體軟式複合材料，具更好的抗衝擊性能

2014年Gong等人，研究將二氧化矽、聚甲基丙烯酸甲酯、聚苯乙烯-丙烯酸乙酯作為分散粒子，乙二醇、聚乙二醇200、聚乙二醇600作為介質，製程剪切增稠液體後，經過流變儀檢測證明具有剪切增稠的流變性能，並將紡織物浸漬於剪切增稠液體，經過刀砍及防穿刺的測試，均能夠證明浸漬過剪切增稠液體的織物其防刀砍及防穿刺的性能明顯變強⁶。

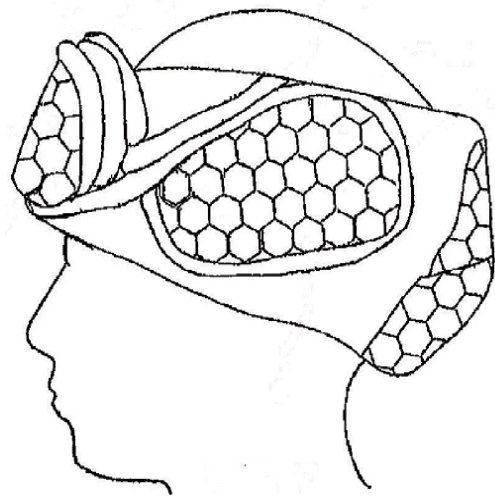
三、剪切增稠液體在防護裝具及醫療照護材料的應用

Ferguson等人在2008年也利用剪切增稠液體與各向異性的熱塑性材料作為防護材料之用途，而該材料是一個層狀的複合材料，設計減震層和剪切增稠層的蜂巢結構複合材料，減震層是利用各向異性的熱塑性材料，例如：熱塑性聚氨酯（Thermoplastic urethane, TPU）或乙烯醋酸乙烯酯共聚物（Expanded

vinylacetate, EVA）等發泡材料，以蜂巢結構設計，當衝擊來臨時，應力會隨著蜂巢結構擴散至整個減震層，部分的應力再傳到剪切增稠層，而剪切增稠層是由奈米漿料剪切增稠液體所組成，吸收應力後瞬間由液體轉變為類似固體阻擋衝擊應力，進而保護人員配戴的部位。這類型層狀複合材料設計運用在頭部醫療照護上，經過假人跌倒及摔傷測試可以減少90%的頭部損傷。而層狀的複合材料在運動員的防護裝備及醫療照護上已經被開發應用⁷。

圖二 利用TPU與STF開發醫療照護用品設計圖

資料來源：同註7



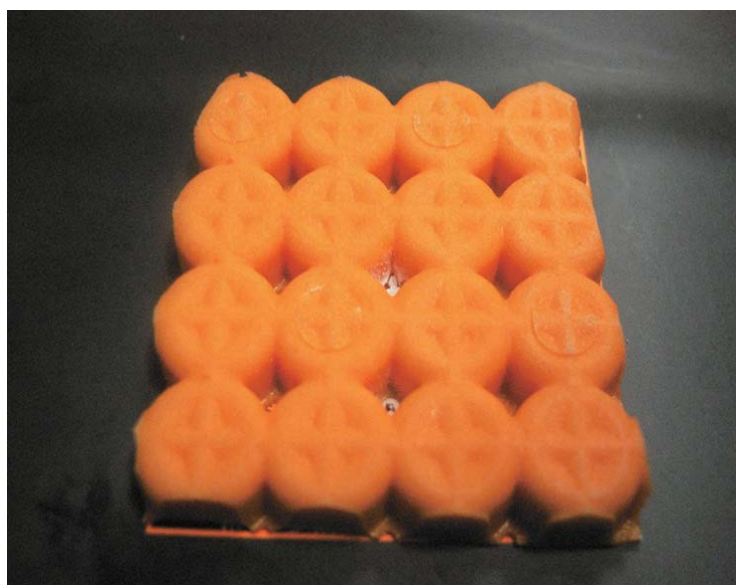
- 5 Hasanzaden,M.,Mottaghitalab,V., “The Role of Shear-Thickening Fluids(STFs) in Ballistic and Stab-Resistance Improvement of Flexible Armor,” Journal of Materials Engineering and Performance,Vol.23, p.1182-1196, 2014.
- 6 Gong,X.L., Xu,Y.L., Zhu,W., Xuan,S.H., Jiang,W.F., Jiang,W.Q., “Study of Knif stab and puncture-resistant performance for shear thickening fluid enhanced fabric,” Journal of Composite Materials,Vol.48, p.641-657, 2014.
- 7 Ferguson,J.R., “Impact shock absorbing material,” US Patent Application 20080172779.

四、熱塑性減震材料應用

對於剪切增稠液體防護功能的開發應用，在英國已經研發出一種具有剪切增稠效果且耐衝擊的防撞材料，d3o（是由Richard Palmer和Phil Green與英國赫福郡大學實驗室合作University of Hertfordshire所研發而成）商品⁸，這是一種柔軟的膠狀材料，當外力撞擊時，膠狀的撞擊區域立刻轉變成類似固體材料，而應力消失後，又立刻恢復成柔軟的膠體材料，一般大多用於機車防摔衣及頭盔等護具，然d3o在國內代理商僅提供販售商品，以發泡完成類似橡膠材料，並無法提供膠

圖三 英國d3o市售防撞材料

資料來源：作者拍攝



體原料作進一步分析研究。而利用奈米漿料剪切增稠之特性，研究開發高效能的防護材料，對於民生工業或醫療照護上等有其必要性。

參、奈米漿料剪切增稠形成原理

一、流變性質

流變學是在研究外力作用下材料產生形變或流動，而大部分流變學的特性是介於液體和固體之間來呈現，因此會有彈性及黏性的變化產生，當一材料受到外力的影響後，該

材料吸收外力所給予的力量產生形變，當外力消失後立即恢復原本的形狀，此稱之為彈性材料；當一材料受到外力的影響產生流動的形變，在外力消失後，該材料不會回到原本的形狀，而外力所給予的剪切應力使材料產生黏性，此稱之為黏性材料⁹。

眾所皆知一般流體由黏度曲線可以區分為牛頓流體（Newtonian Fluids）及非牛頓流體（Non-Newtonian Fluids）。當剪切速率增加，黏度不受剪切速率影響，在

8 a481146，D3O鐵鏈人生測試影片，mobile01，<http://www.mobile01.com/topicdetail.php?f=265&t=2614347>，3.2012。

9 Cheeseman,B.A.,and Bogetti,T.A., “Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates,” Composite Structures,Vol.61, p.161-173, 2003.

黏度曲線不變的情形下與剪切速率成一直線，稱之為牛頓流體。而非牛頓流體則依剪切速率不同使黏度產生不同的變化，區分為擬塑性流體 (Pseudoplastic Fluids)、膨脹流體 (Dilatant Fluids) 及塑性流體 (Plastic Fluids)¹⁰ (如圖四)。

剪切增稠液體是由二氧化矽及聚乙二醇所組合而成。目前剪切增稠液體已經被界定

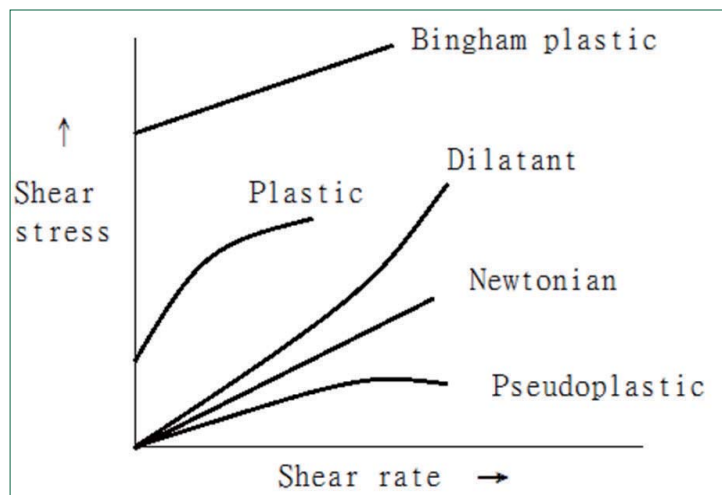
為剪切速率增加黏度會隨著增加的一種非牛頓流體行為¹¹，而會造成剪切增稠的機制，主要有2個原因，其一是二氧化矽在聚乙二醇懸浮液中，當剪切應力增加時，奈米二氧化矽粒子分子間產生強烈的作用力(如圖五)，使黏度曲線隨剪切應力增加而增加；其二是聚乙二醇與二氧化矽O-H官能基在系統中形成有如網狀的結構，當剪切應力增加時，整個網狀

結構會相互拉扯使黏度增加¹²。這種物質從液體轉變成固體和流體產生短暫的聚集現象，在流變儀的檢測下證實有這樣的機制存在。

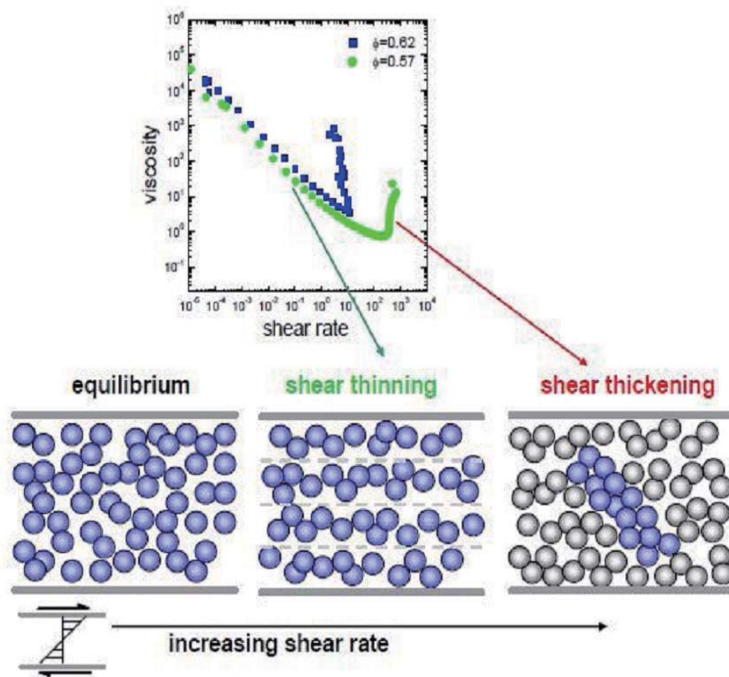
而能夠使流體產生剪切增稠的固體材料並不限於奈米二氧化矽粒子，材料可以選擇任何固體物質的粒子，包括碳酸鈣、二氧化鈦及石英等堅硬的材料，只要選擇適當的溶劑進行分散，經實驗證明都可以產生剪切增稠的現象¹³。

圖四 一般流體種類的區分

資料來源：同註10



- 10 Chassenieux, C., Nicolai, T., and Benyahia, L., "Rheology of associative polymer solutions," *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, Vol. 16, p. 18-26, 2010.
- 11 Hassan, T.A., Rangari, V.K., and Shaik J., "Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 527, p. 2892-2899, 2010.
- 12 Mahfuz, H., Clements, F., Rangari, V., Dhanak, V., and Beamson, G., "Enhanced stab resistance of armor composites with functionalized silica nanoparticles," *Journal of Applied Physics*, Vol. 105, p. 064307, 2009.
- 13 Hassan, T.A., Rangari, V.K., and Jeelani, S., "Sonochemical synthesis and rheological properties of shear thickening silica dispersions," *Ultrasonics 73 Sonochemistry*, Vol. 17, p. 947-952, 2010.

圖五 剪切增稠液體作用機制示意圖¹⁴

二、分散技術

剪切增稠液體是一種奈米分子和高分子溶液的混合物。在一般環境狀況下為流體，但這種混合物經撞擊時，材料瞬間會變的像固體一樣硬，而能夠使材料由液態瞬間轉變成為類似固態的相變材料，其奈米分散為關鍵技術之一。而奈米科技應用領域雖然廣

泛¹⁵，但是奈米粉體的分散技術¹⁶卻常成為應用及開發上的瓶頸，如何藉由物理分散設備得到奈米級分散粉體材料，為目前產業及學術界共同研究的重要課題。

物理分散大致可區分為乾式與濕式2種，乾式分散技術在製程中容易產生大量能量使系統溫度上升，且分散的粒徑極限僅到微米級，如果要得到次微米及奈米以下粉體，就必須使用濕式分散，濕式分散技術是將粉體與適當的溶劑與分散劑混合後再分散至奈米等級。選擇適當濕式奈米粉體分散設備，搭配適當化學分散劑，能使奈米粉體粒徑達到真正奈米

等級，發揮奈米化效應。

因二氧化矽奈米粒子的表面能高容易產生聚集，因此良好的攪拌或分散方式相對重要，一般常用的攪拌方式不外乎機械攪拌、超音波等方式，事實上漿料在濃稠的狀態很難均勻分散，本研究製程奈米剪切增稠液體

- 14 Egres Jr, R.G., Decker, M.J., Halbach, C.J., Lee, Y. S., Kirkwood, J. E., Kirkwood, K. M., and Wagner, N. J., "Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-kevlar composites for body armor applications," in Proceedings of the 24rd Army Science Conference, Orlando, FL, 2 December, 2004.
- 15 Xia, X., Hu, Z., and Marquez, M., "Physically bonded nanoparticle networks: a novel drug delivery system," Journal of Controlled Release, Vol. 103, p. 21-30, 2005.
- 16 Hui, C.L., Li, X.G., and Hsing, I.M., "Well-dispersed surfactant-stabilized Pt/C nanocatalysts for fuel cell application: Dispersion control and surfactant removal," Electrochimica Acta, Vol. 51, p. 711-719, 2005.

是以三滾軸攪拌機¹⁷對奈米漿料進行攪拌分散，三滾軸攪拌機雖然也屬於機械攪拌的一種，因三滾軸攪拌機剪切力大，可以使奈米漿料在滾軸與滾軸間反覆均勻攪拌，因此奈米漿料可以獲得良好的分散特性。

三、軟式防彈衣防彈機制

軟式防彈衣最早是在十九世紀末由當時的芝加哥神父嘉斯瑪·薩嘉蘭(Casimir Zeglen)所發明。材質是以蠶絲編織而成，厚度約1/8英吋，內含四層絲質材料所編織而成，也因當時火藥所推出來的子彈速度較慢，所以可以抵擋子彈的攻擊，因此該材料成為早期軟式的防彈衣¹⁸。

(一) 防彈纖維之材料結構

目前應用於軟性防彈衣織物材質主要有2種，其一是高性能聚乙烯纖維¹⁹，該材料利用凝膠抽絲-熱延伸法製程而成高順向高結晶性纖維，具有密度低、高強力及高模數之特性，加上質量輕且吸收高能量之特性，使高性能聚乙烯纖維在防彈織物材料的應用上，具有很大的發展優勢；其二是聚對苯二甲醯對苯二胺纖維，也就是1971年美國杜邦公司所

推出的Kevlar防彈纖維材料，利用乾噴-濕式紡絲法(dry-jet wet-spinning process)製程而成高強度高模數纖維。其結構上具有良好的熱穩定性，但耐強酸、強鹼較高性能聚乙烯纖維差。

(二) 防彈纖維材料破壞原理

軟式防彈衣因為具有高強度高模數纖維，對於吸收子彈高速衝擊能量的關鍵因素在於防彈纖維織物的紗線，衝擊時子彈拉伸防彈纖維的紗線使其斷裂，經紗線和多層的防彈織物之間相互拉伸作用，阻擋子彈的動能使其無法貫穿織物進而傷害人員。

織物紗線在子彈射入的方向產生形變或是拉伸變形，而在不同織物層數因受力不同所產生的形變均不相同²⁰，由圖六可以明顯發現織物經子彈撞擊後，織物正面產生輕微凹陷，背面產生突起的形變；在圖七子彈射入區域附近，產生一個以子彈為中心的十字形拉伸形變，由子彈撞擊位置也可以明顯看到紗線編織結構已經明顯被破壞。而織物經過子彈撞擊、摩擦後，部分能量轉化為振動波、熱能，也由層層交織綿密的紗線迅速

17 Gojny,F.H.,Wichmann,M.H.G.,Kopke,U.,Fiedler,B.,and Schulte,K., “ Carbon nanotube-reinforced epoxy-composites: enhanced stiffness and fracture toughness at low nanotube content,” Composites Science and Technology,Vol.64, p.2363-2371, 2004.

18 Lotysz,S. “Mnich wynalazca,” Polonia,Vol.13, p.68-71,and Vol.14, p.64-67, 2007.

19 Liu,S.,Wang,J.,Wang,Y.,and Wang, Y., “Improving the ballistic performance of ultra high molecular weight polyethylene fiber reinforced composites using conch articles,” Materials and Design,Vol.31, p.1711-1715, 2010.

20 黃英《玻璃鋼/複合材料》，第6期，頁35-39，西元1998年。

擴散至整個織物，而子彈的動能也在層層的織物阻擋下產生形變（如圖八）。

四、剪切增稠液體檢測方式

（一）粒子分散性分析儀（廠牌：立源興業，型號：LUMiSizer）

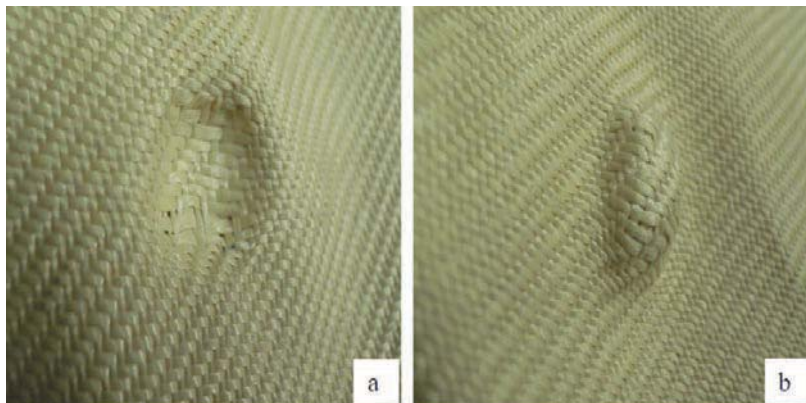
粒子分散性分析儀（如圖九），是藉由斯托克斯定律（Stokes Law）分析粒子在流體中受到離心力產生沉降的關係，以及朗伯-比爾定律（Lambert-Beer Law）分析溶液吸光度與該溶液的濃度、溶液厚度關係。奈米漿料在粒子分散性分析儀轉盤中運轉，經近紅外光檢測固體粒子受離心力運動情形，觀察固體粒子在溶劑中沉降或懸浮情形，藉由粒子位移圖譜分析剪切增稠液體之穩定度。

（二）9公厘實彈測試

9公厘實彈測試（如圖十），彈丸以銅包鉛之制式9mm半圓頭子彈，質量8克，彈丸經槍管內膛線穩定方向離開槍口飛行至目標物，其槍口距離目標物為3公尺，目標物距離木質擋彈牆為6公尺；槍口距離目標物設置第一組光柵，量測彈丸初速之作用，目標物至木質擋彈牆設置第二組光柵，為量測彈丸末速之作用（如圖十

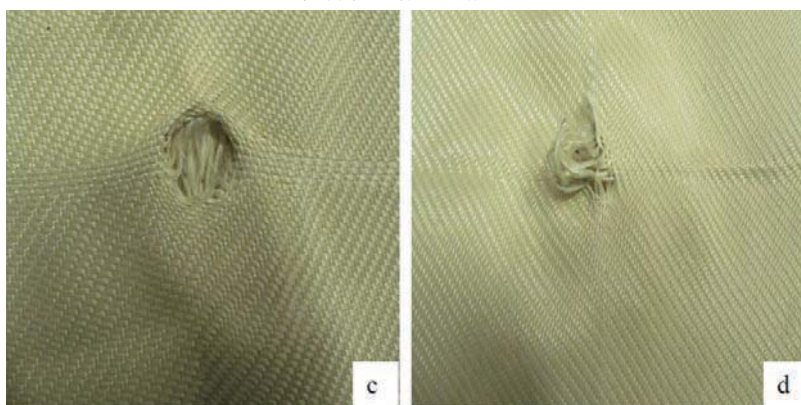
圖六 Kevlar受子彈應力產生形變正面(a)背面(b)

資料來源：作者拍攝



圖七 Kevlar結構破壞產生十字拉伸形變(c)紗線結構破壞(d)

資料來源：作者拍攝



圖八 彈頭形變圖

資料來源：作者拍攝



圖九 粒子分散性分析儀

資料來源：作者拍攝



圖十 實彈測試場地

資料來源：作者拍攝



一)，本研究期望獲得子彈初速及末速差之數據，研究剪切增稠液體抗彈效果，提供未來研製液體防護裝具、防撞或民生醫療用品之先驅研究。

(三) 穿刺試驗機 (如圖十二)

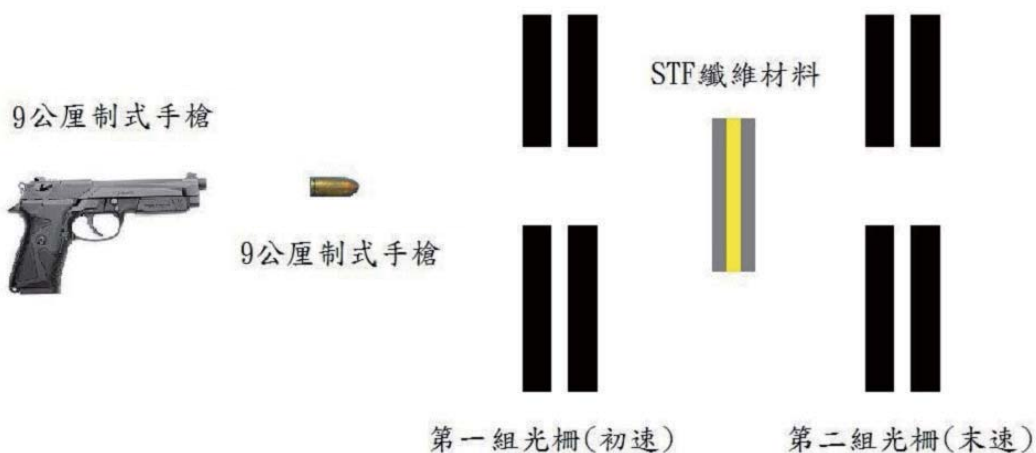
測試屬低速率之衝擊測試，其衝擊工具配附2組不同重量之砝碼、刀子、長釘及本實驗自製5種不同口徑之模擬彈頭，利用電磁鐵原理，電源開啟將砝碼及刀具（或其他衝頭）吸住後，可自行調整所需衝擊之高度，電源關閉後磁力隨即消失，砝碼及刀具依重力加速度向下衝擊碰撞目標物，而目標物即是剪切增稠複合材料，其複合材料之穿刺深度為本實驗觀察之重點。

(四) 衝擊試驗機

本研究為剪切增稠液體與室溫硬化型矽橡膠固化後進行測試，固化後之減震複合材料厚度為8mm，在51,000G~59,000G

圖十一 9公厘實彈測試示意圖

資料來源：本研究整理



圖十二 穿刺測試機

資料來源：作者拍攝



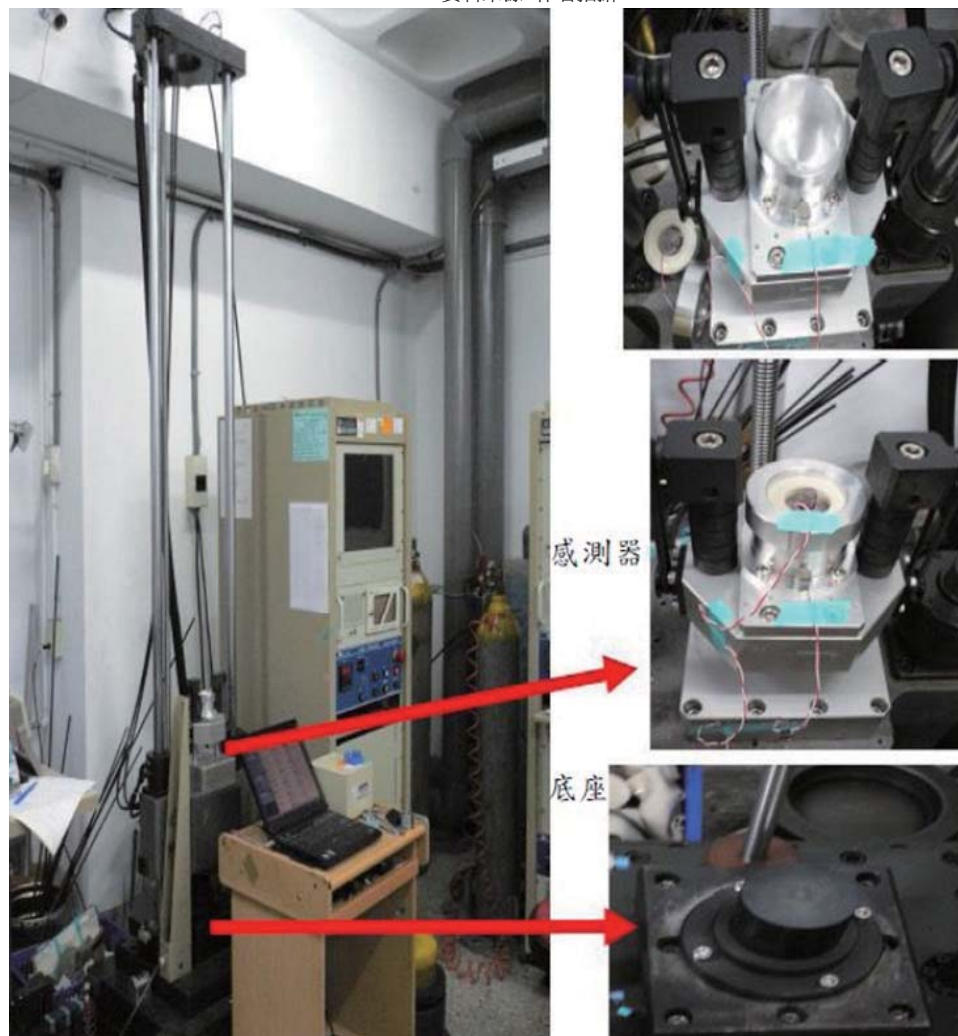
的衝擊值下進行測試。利用衝擊試驗機（如圖十三）自由落體及2次衝擊臺加速規放大動能，經由底座外部及內部配重塊感測器，在高速衝擊時，測得實際衝擊值及經由減震複合材料吸收後之衝擊值，經由衝擊響應頻譜圖得知減震複合材料減震效果。

肆、實驗規劃

本實驗針對剪切增稠液體之特性進行研究分析，包括奈米漿料溶劑濃度、二氧化矽粒徑、對剪切增稠之影響。利用流變儀（Thermo Haake RS600）分析奈米漿料的剪切增稠特性，再以掃描式電子顯微

圖十三 衝擊試驗機

資料來源：作者拍攝



鏡 (Scanning Electron Microscope, SEM) 觀察其分散效果，熱重量分析儀 (Thermo Gravimetric Analyzer, TGA) 分析材料的裂解和熱穩定性，使用粒子分散性分析儀 (LUMiSizer)，觀察奈米二氧化矽粒子移動狀況，分析奈米漿料穩定情形等，將剪切增稠液體以浸漬、塗佈及包覆等方式，與Kevlar或高密度聚乙烯材料形成防彈複合材料，進

行9公厘彈道測試分析。

在減震複合材料的研究上，以室溫硬化型矽橡膠 (Room Temperature Vulcanized, RTV) 與剪切增稠液體熱壓固化，研究混摻不同RTV重量百分比及不同固含量之奈米漿料，在熱壓成型後利用衝擊實驗分析其減震複合材料吸震效果。

利用蜂巢結構減震之特性，將市售蜂巢紙中間孔徑添加剪切增稠液體形成防護複合材料，利用Kevlar包覆該複合材料進行穿刺測試，該設計是利用蜂巢紙之孔徑控制剪切增稠液體添加量及複合材料之厚度，而蜂巢結構本身具有減震之特性，添

加剪切增稠液體形成防護複合材料後，觀察刀具在一定的高度對防護複合材料之穿刺深度。

一、剪切增稠液體製程

(一) 製程剪切增稠液體實驗步驟 (以製程100克剪切增稠液體，矽含量25wt%為例)，將75克聚乙二醇倒入塑膠攪拌容器中，再將二氧化矽取3~5克倒入塑膠攪拌容器，將

塑膠攪拌容器放入行星式攪拌機設定15分鐘進行攪拌。

(二) 攪拌後將剪切增稠液體倒入三滾軸混鍊機進行分散，因三滾軸混鍊機剪切力大，可提升奈米漿料分散性，分散後的剪切增稠液體經由刮刀片流入塑膠攪拌容器中。

(三) 再取3~5克二氧化矽倒入塑膠攪拌容器中，放入行星式攪拌機進行攪拌，實驗步驟由添加二氧化矽、行星式攪拌機攪拌及三滾軸混鍊機分散等順序反覆操作，至奈米漿料二氧化矽含量達25wt%即製程完成。

(四) 將剪切增稠液體與克維拉(Kevlar)等織物，以包覆、浸漬及塗佈等方式形成防彈織物複合材料，進行實彈測試。

二、剪切增稠液體混摻室溫硬化型矽橡膠製程減震複合材料

(一) 將製程完成之剪切增稠液體，加入不同重量百分比之室溫硬化型矽橡膠，放入行星式攪拌機進行攪拌。

(二) 將分散完成之乳狀奈米漿料倒入金屬模具中，再放入熱壓機設定溫度100℃，時間60分鐘。

(三) 固化後形成減震複合材料。利用此步驟以不同奈米漿料固含量製程減震複合材料進行衝擊測試。

三、蜂巢紙添加剪切增稠液體形成防護複合材料

(一) 將製程完成之剪切增稠液體，倒入市售蜂巢紙孔徑中，方可固定防護複合材料

之厚度。

(二) 將防護複合材料夾在Kevlar織物中進行穿刺測試。

伍、檢測分析與討論

一、觀察剪切增稠液體粒子分散狀態

剪切增稠液體製程過程中分散技術是關鍵之一，二氧化矽因表面能高容易產生團聚現象，本實驗製程剪切增稠液體先以THINKY ARE-250行星式攪拌機進行攪拌，再以三滾軸混鍊機進行機械攪拌至少10次以上(視固含量高低而定)，因三滾軸剪切力大可使剪切增稠液體在滾軸間均勻攪拌，使二氧化矽粒子均勻分散在聚乙二醇中，減少二氧化矽團聚的現象。

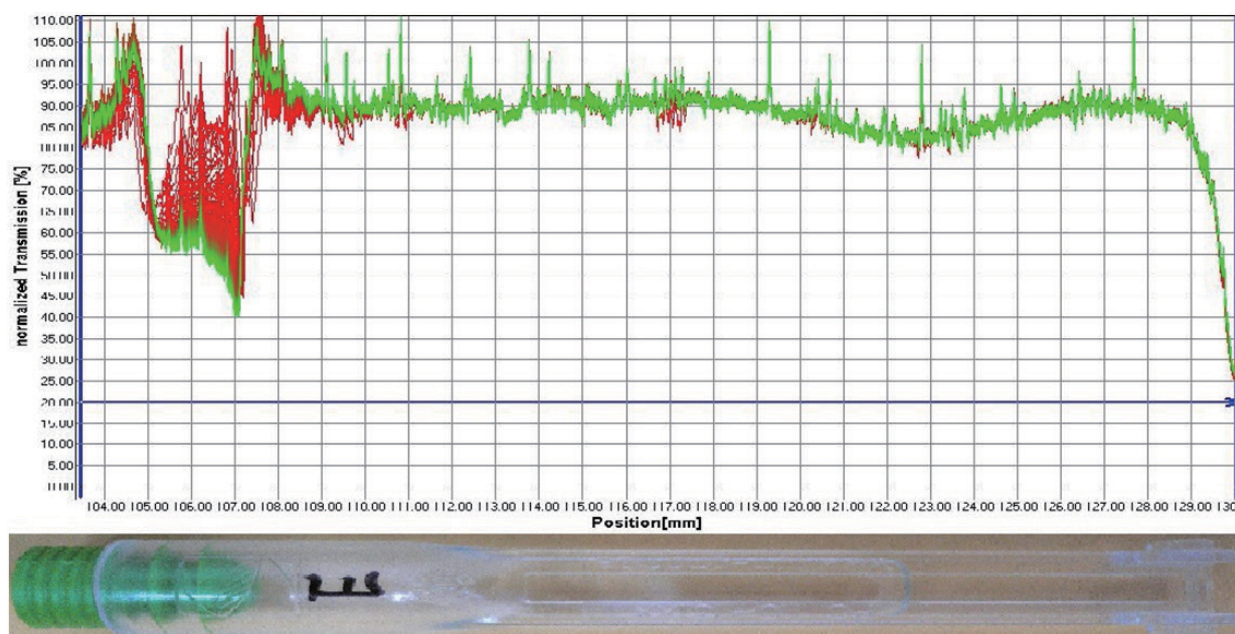
將製程完成之剪切增稠液體分別取10克，利用塑膠針筒裝入儀器樣品瓶內，設定溫度25℃，轉速4,000rpm，每10秒量測一次粒子運動情形(即代表一條光譜線)，連續量測255次所構成光譜圖，計運轉42分鐘，由光譜圖觀察粒子在剪切增稠液體中是否產生沉降判定其穩定度。圖十四為剪切增稠液體，由光譜圖可以觀察到塑膠樣品瓶透光度非常高，且其粒子均無沉降情形。

二、利用Kevlar剪切增稠複合材料以不同模式進行彈道測試

彈道測試為本實驗最重要的參考依據，本研究在彈道的測試除了希望能夠將子彈阻

圖十四 剪切增稠液體粒子位移圖

資料來源：本研究整理



擋下來外，更希望能夠透過彈道測試得知剪切增稠液體消耗子彈動能經外力撞擊區域形成固狀，而未經撞擊區域仍是液體能的多寡，因此在織物材料的層數並沒有大量的使用，其目的就是希望子彈貫穿防彈織物複合材料測得末速。

製程40wt%之奈米二氧化矽剪切增稠液體，與6片Kevlar分別以浸漬、塗佈及包覆等

不同方式形成防彈複合材料（如表一），進行彈道測試，結果顯示以包覆方式抗彈效果較佳，塗佈方式抗彈效果較差，初步探討其原因，以包覆方式製程複合材料其厚度相對較厚，當衝擊來臨時二氧化矽粒子在聚乙二醇中有較多的分子產生相互作用；而進一步分析探討剪切增稠液體包覆方式，當子彈撞擊剪切增稠液體前，Kevlar已經阻擋及分散大

部分的動能，致使碰撞到剪切增稠液體時動能已經減少，且剪切增稠液體有一定的厚度使分子間作用力產生作用，致使包覆方式的剪切增稠效果較為明顯。

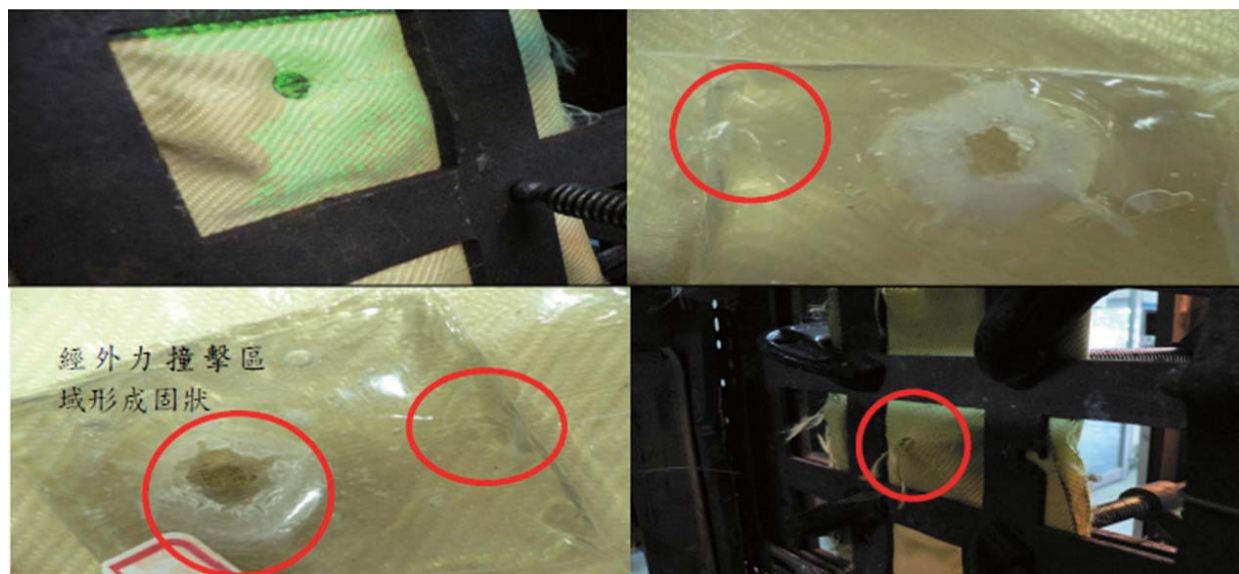
由圖十五也可以發現子彈經過撞擊的區域，在周圍已經形成類似固體堅硬的材料抵擋外來的衝擊，其他區

表一 利用Kevlar進行9公厘彈道測試結果參數表

利用Kevlar以浸漬/塗佈/包覆等不同模式下進行9公厘彈道測試			
彈道測試條件	重量 (g)	初速 (m/s)	末速 (m/s)
Kevlar 6片	537	320.9	299
浸漬6片Kevlar	1,096	322	287.5
塗佈6片Kevlar	867	335.8	310.5
包覆6片Kevlar	1,121	326.5	238.6
資料來源：本研究整理			

圖十五 Kevlar複合材料彈道測試剪切增稠效果圖

資料來源：作者拍攝



域仍維持液態，而當應力消失後，剪切增稠液體隨即恢復至撞擊前的液體狀態。

三、STF-RTV減震複合材料衝擊測試

本實驗以剪切增稠液體（STF）與室溫硬化型矽橡膠（RTV）合成減震複合材料，厚度為8mm，利用衝擊試驗機加速度在51,000~59,000G值衝擊下，由衝擊響應頻譜圖獲得STF-RTV減震複合材料與英國商品d3o防撞材料吸震效果作為比較目標，以開發該材料運用在防爆桶、防爆毯等各式防護裝具及老人防護、醫療用具及民生工業減震材料可行性之參考依據。

圖十六為RTV未添加STF合成之矽膠材料，由於RTV本身具緩衝材料的特性，在53,971.7G值衝擊測試下，經由矽膠材料吸收衝擊力後剩餘12,972.7G，由圖十七衝擊響應頻譜圖計算得知吸震效果達76%；圖十八為

圖十六 室溫硬化型矽橡膠（RTV）

資料來源：作者拍攝

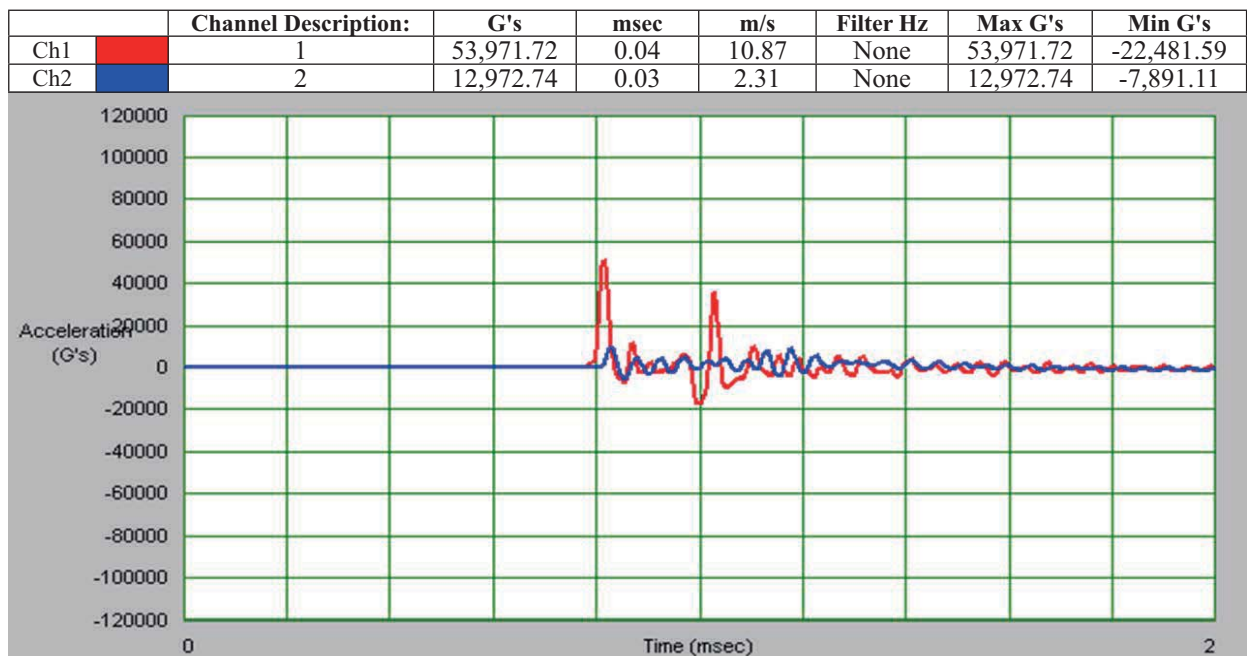


英國市售d3o防撞材料，在58,562.3G值衝擊測試下，經由d3o防撞材料吸收衝擊力，剩餘6,182.5G，由圖十九衝擊響應頻譜圖計算得知吸震效果達89%。d3o材料目前已應用在防摔衣、運動用品及人員撞擊等防護上。

對於STF-RTV減震複合材料之減震影響，實驗將STF固含量40wt%，與RTV以50:50之比例熱壓合成，在55,551.2G值衝

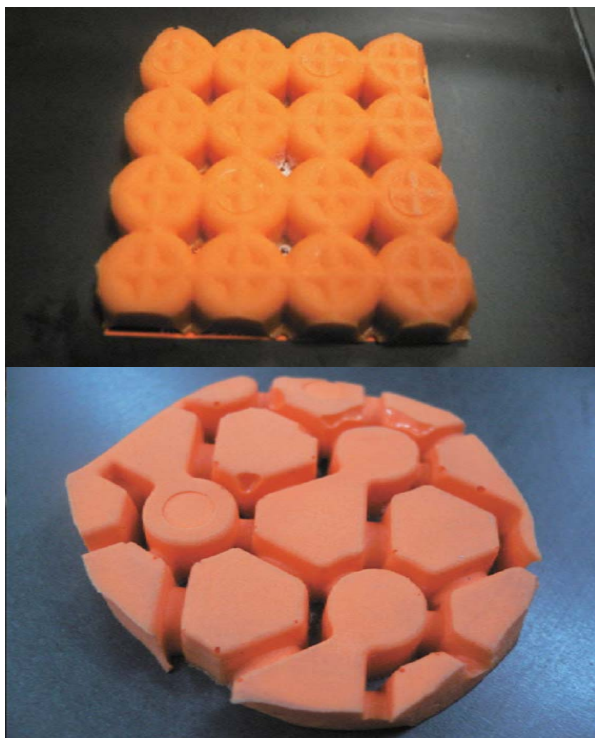
圖十七 RTV衝擊響應頻譜圖

資料來源：本研究整理



圖十八 英國d3o市售防撞材料

資料來源：作者拍攝

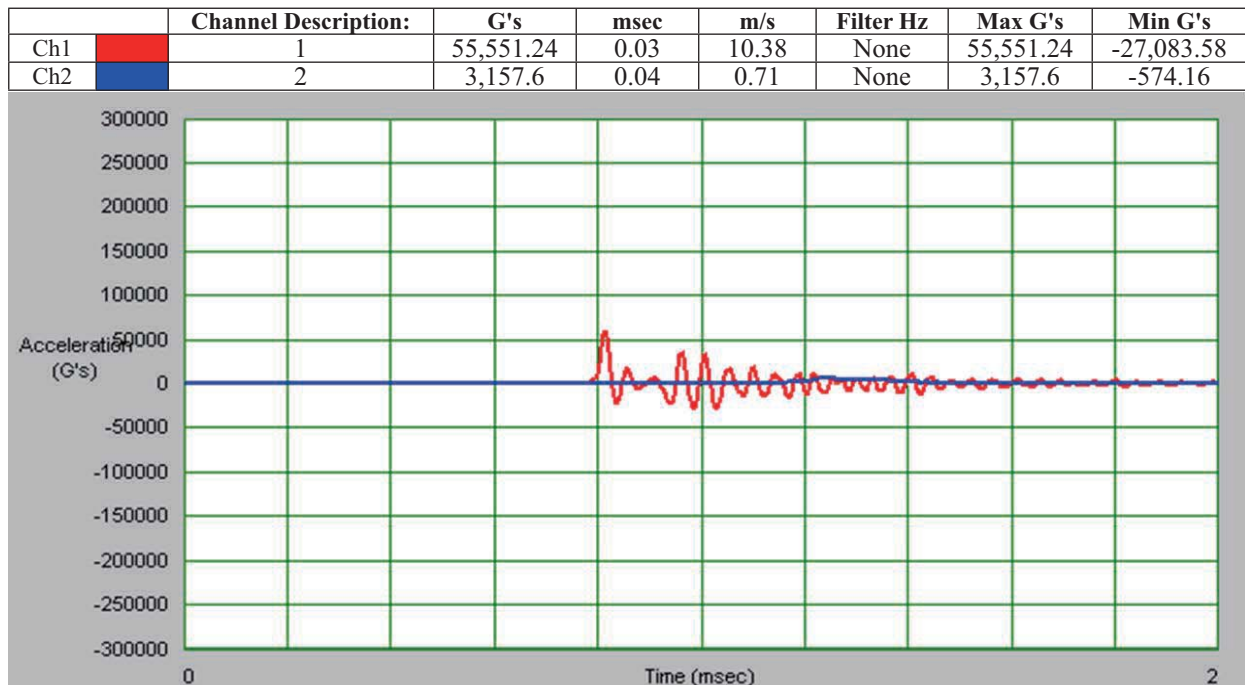


擊測試下，經STF-RTV減震複合材料，剩餘3157.6G，由圖二十衝擊響應頻譜圖計算得知吸震效果達94%，由此可證明STF-RTV複合材料有明顯的吸震效果。

由各項減震複合材料重量來觀察（表二）差異並不大，英國市售防撞材料d3o重量最輕，通常作為防摔衣材料販售，其原材料、發泡及交聯固化成型方式因涉及商業專利無法得知，d3o材料重量259g經衝擊測試下減震效果可達89%，本實驗僅主要與自行開發STF-RTV做比較；室溫硬化型矽橡膠（RTV）材料為減震材料，在重量為306g經衝擊測試下減震效果為76%，RTV添加STF以50:50之比例熱壓合成，其重量為331g經衝擊測試下

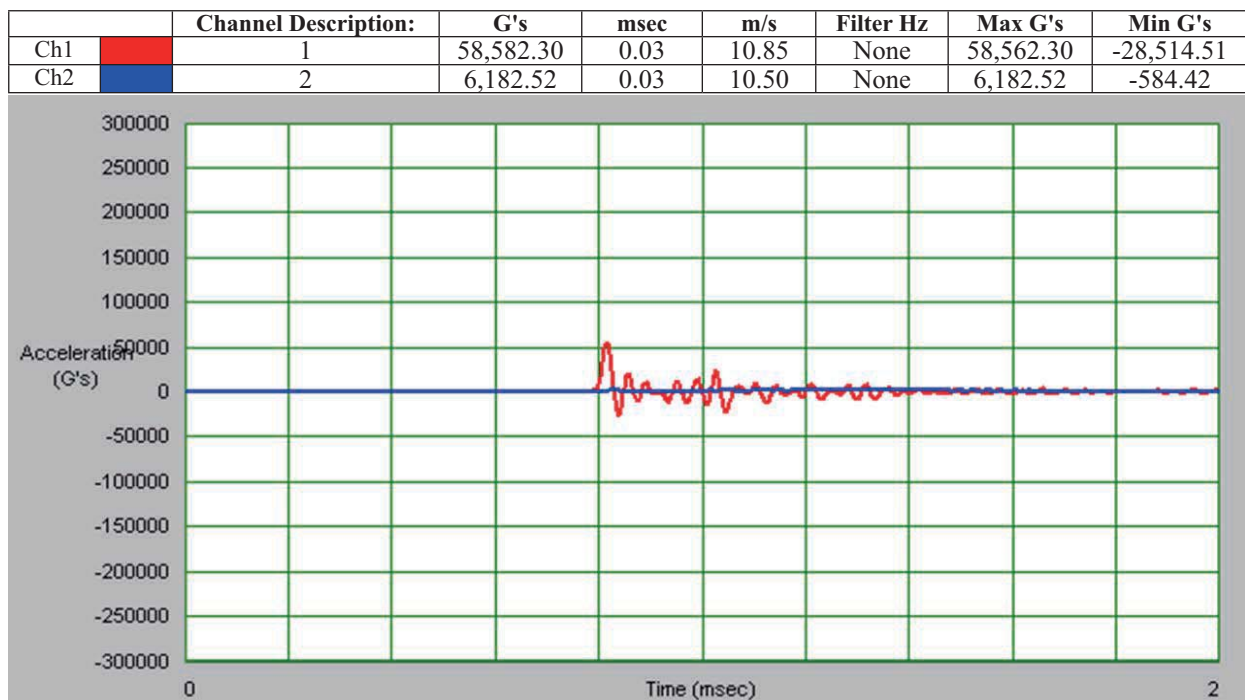
圖十九 英國d3o衝擊響應頻譜圖

資料來源：本研究整理



圖二十 STF-RTV (STF 40wt%) 減震複合材料 (STF-RTV 50:50)

資料來源：本研究整理



減震效果為94%，由三項減震複合材料在衝擊測試比較下，雖然可以發現STF-RTV效果較佳，但原材料在交聯固化成型後，其剪切增稠的機制如何產生，本實驗後續將持續研究。

四、穿刺測試

本實驗利用厚度4mm，孔徑10mm之蜂巢紙，添加固含量30wt%之STF，砵碼含刀具重量245g，在刀具尖部距離目標物180cm之高度進行穿刺測試，本測試是利用Kevlar包覆剪切增稠防護材料進行測試，於每一層Kevlar後方放置一張A4紙，用來觀察刀具穿刺情形及計算穿刺層數。

固定自由落體穿刺高度180cm及砵碼含

刀具重量245g，測試20、19、18、17、16及15片Kevlar，在20片逐漸遞減至17片的測試下，從Kevlar後方的紙片均未發現紙片破裂的痕跡，而15及16片的Kevlar測試下，Kevlar後方的紙片均有破裂的情形，尤以15片的Kevlar破裂較為明顯。圖二一為16片Kevlar後方紙片破裂情形，其深度已經非常淺。因此，初步結果16片Kevlar可以阻擋高度在180cm及砵碼含刀具重量245g的穿刺測試。

剪切增稠防護材料為厚度4mm，孔徑10mm之蜂巢紙，添加固含量30wt%製程而成，而4mm厚度為7片Kevlar之厚度，因此設計由原本16片Kevlar減少至9片Kevlar，將9片Kevlar包覆剪切增稠防護材料，與原16片

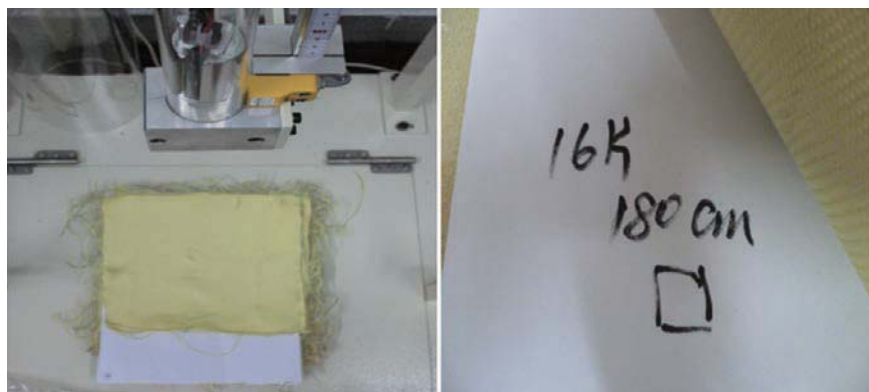
Kevlar相同厚度下比較穿刺之效果。由圖二二可以發現，刀具經過第8片Kevlar時，由後方紙片可以明顯發現破裂的痕跡，而第8片Kevlar後方即是剪切增稠防護材料，隨即將穿刺的衝擊力道阻擋下來，初步證明剪切增稠液體在低剪切速率有抗穿刺之效果。

表二 各項減震複合材料減震測試結果參數表

各項減震複合材料進行衝擊試驗機測試			
減震複合材料	重量 (g)	加速度 (初) G's	加速度 (末) G's
RTV	306	53,971.7	12,972.7
d3o	259	58,562.3	6,182.5
STF-RTV	331	55,551.2	3,157.6
資料來源：本研究整理			

圖二一 Kevlar穿刺測試

資料來源：作者拍攝

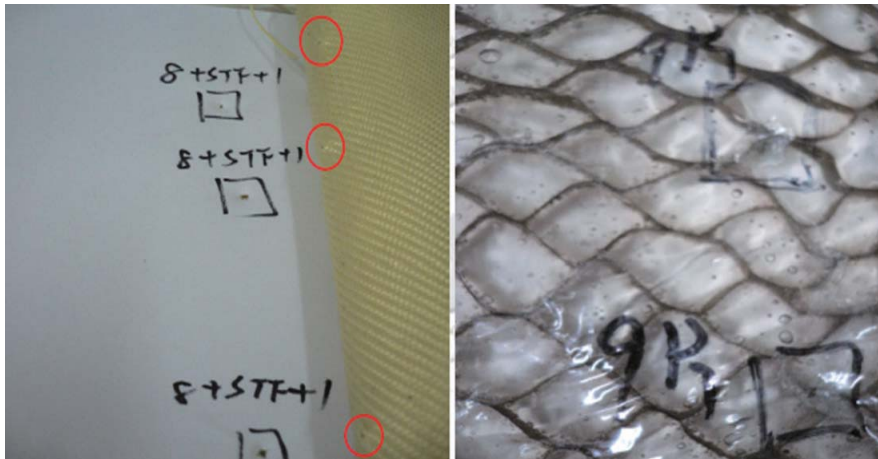


陸、結論

本研究為新型防護

圖二二 Kevlar包覆剪切增稠防護材料穿刺測試

資料來源：作者拍攝



材料開發評估，主要以聚乙二醇及二氧化矽為開發材料，目前國際文獻對其剪切增稠機制仍處於研究階段。本實驗製程40%剪切增稠液體，經粒子分散性分析儀檢測下粒子並沒有產生沉降的情形，將剪切增稠液體包覆於Kevlar進行彈道測試，測試結果發現，因剪切增稠液體產生強烈的作用力導致彈道末速均明顯降低，由彈道測試可以證明剪切增稠液體確實有阻擋子彈的動能。

利用剪切增稠液體的特性，開發高效能減震材料是目前各國研究人員積極探討的方向，由於英國d3o商品以材料含有「剪切增稠」之特性，販售防摔衣及運動之防護裝具等，由於d3o膠體原料不易取得情形下，本實驗製程STF-RTV減震複合材料與英國d3o防撞材料在高G值衝擊測試進行比較，經衝擊51,000-59,000G值測試下，英國d3o防撞材料減震效果可達89%，本實驗所製程STF固含量

在40wt%所合成之STF-RTV減震複合材料，測試結果減震效果可達94%，然因設備有限對於減震材料微結構及降幅強度等仍為研究測試階段，但在國防自主發展下，將來對於軍事用途，如：防爆毯、防爆桶及傘兵鞋等其他防護裝具；民生用途，如：汽車

防護、老人照護、工程及其他民生應用等，研究高效能減震材料是有其應用及參考價值。

而利用蜂巢結構所製程之剪切增稠防護材料，在與16片Kevlar相同厚度的材料進行防穿刺之測試，具有相同的抗穿刺的效果，且該防護材料設計同時具有良好之撓曲性，對於未來在低剪切速率的防護開發、設計及應用上具有參考之依據。

作者簡介

顏瑞良少校，陸軍後勤學校常備士官班37期，志願役預官92年班，聯合後勤學校96年正規班，國防大學理工學院化研所100年班畢業，曾任組長、彈藥補給官、教官，現任陸軍後勤訓練中心彈藥組教官。