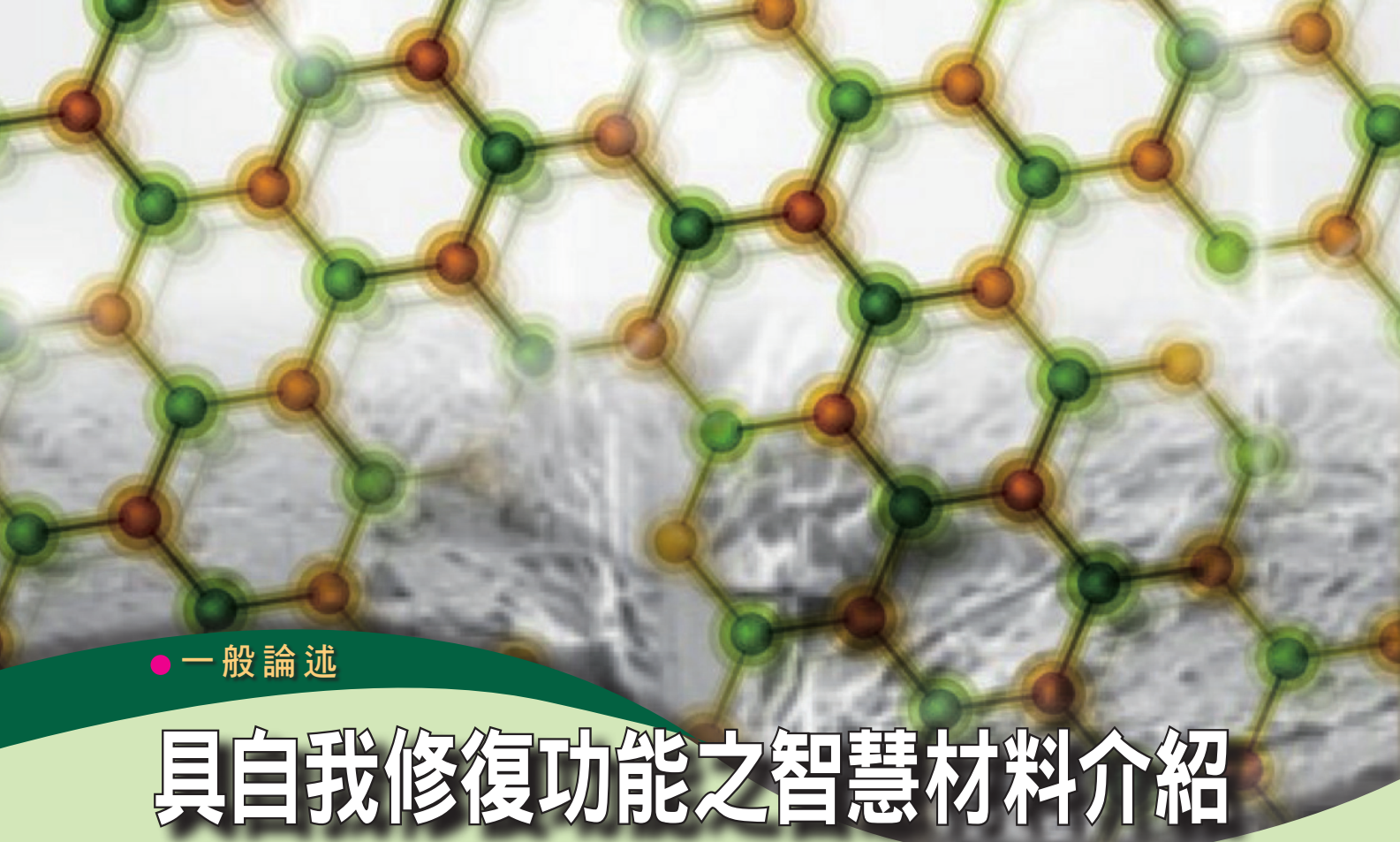




● 一般論述

具自我修復功能之智慧材料介紹

提要

趙本善

- 一、開發具自我修復功能材料（Self-repairing或Self-healing）的想法與靈感，源自於人體內部損壞細胞或組織本身具有自我修復的自然能力。因此，材料科學家也經常夢想，若材料本身也具有相同的自我修復能力，將有助於延長材料的壽命、提升材料的可靠度，以及降低材料維修成本。
- 二、自我修復材料是一種可自我復原的智慧材料（Intelligent Material或Smart Material），該材料可利用奈米微粒包覆技術（Micro-encapsulation），將含有自癒物質（Healing Agent）的奈（微）米膠囊（Micro-capsule）融合進入材料、塗料或鍍層中，自癒物質則具有修復材料裂縫、缺陷或破損區域的能力。
- 三、目前市面上已經有許多的自我修復材料，可廣泛應用於飛機、橋樑、建築物、微電子等民生應用領域；就軍事應用領域而言，目前主要應用於裝甲複合材料，雖然相關研究仍處於實驗階段，但未來的實際應用指日可待。
- 四、具自我修復材料若能廣泛應用在我國軍的高科技與難維修裝備、設備或武器中，將有助於節省後勤補給維修的成本，提高妥善率與良率，對於國軍戰力提升有非常大的幫助。

關鍵詞：自我修復、微粒包覆、奈（微）米膠囊、材料可靠度

壹、前言

相信大家都有這樣的經驗，那就是當我們的手指不小心割傷流血時，經過簡單的按壓或是包紮後，體內的血小板會自動將血液凝結，受傷的傷口將會停止流血，非常的神奇與奧妙。另外，若我們不慎跌倒受傷後，皮膚的表層可能會產生傷痕，但是經過一段時間之後，皮膚的傷痕將會自動結痂癒合，傷口也會完全復原。有了這樣的親身經歷後，科學家們就在思考是否可將相關的概念，應用在材料科技與工程的領域中，讓損壞的材料也可以具有自我修復的能力，將可減緩材料的損壞並且增加材料的壽命，達到節省材料更換的頻率與成本，進而提高材料本身或是材料模組 (Module) 與系統 (System) 的可靠度 (Reliability)，實乃材料科學與工程界的一大創舉。

上述具有自我修復功能的材料，又被稱為智慧材料。所謂智慧材料是一種能感知外部刺激，能夠判斷並適當處理且本身可執行的新型功能材料。智慧材料是繼天然材料、合成高分子材料、人工設計材料之後的第四代材料，是現代高技術新材料發展的重要方向之一。科學家預言，智慧材料的研製和大規模應用，將引發材料科學發展的重大革命。一般說來，智慧材料有七大功能，即感測

功能、反饋功能、信息識別與積累功能、響應功能、自診斷能力、自我修復能力和自適應能力¹。由上述的定義的可以清楚的瞭解，本文所介紹的具自我修復功能材料，本身也是一種智慧材料，透過外界物質的刺激，能夠感測週遭環境的改變，進而觸發微粒包覆內部的自癒物質，達到材料自我修復的功能與目的。

在現今眾多的材料應用中，複合材料 (Composite Material) 的種類非常的多樣化，應用的領域也非常的廣泛，從飛機材料、運動器材、微電子材料，甚至是餐具。複合材料雖然具有多樣化與廣泛的應用性，然而若暴露在過熱或壓力過大的環境下，容易在材料內部生成如同髮絲般細小的裂縫，而造成材料損壞。此外，若隨著使用的時間增加，裂縫會逐漸的擴大，最後造成材料的永久破壞。複合材料對於國防與太空科技發展而言，扮演非常關鍵與舉足輕重的角色。許多國防武器系統與太空梭 (船) 材料都由複合材料所組成，若材料使用過久而發生老化甚至是損壞的情況，將造成非常嚴重的後果。尤其，當太空梭 (船) 進入外太空之後若是發生損壞，要在距離地球數百萬英里遠的外太空進行維修與更換材料也是非常不容易的事情²。因此，美國許多大學教授與研究學者早從西元 2001 年起才會興起積極發展自我修復材料的想法，當時的研究規模還停留在實驗室的階

1 <http://www.twwiki.com/wiki/%E6%99%BA%E8%83%BD%E6%9D%90%E6%96%99>.

2 Kevin Bonsor, "How self-healing spacecraft will work," <http://science.howstuffworks.com/self-healing-spacecraft.htm>, 2014.

段，近年來許多相關具有自我修復功能的材料商品已經上市，並且應用在許多不易進行修復的產品與場所，然而實際材料修復的成果，仍然無法達到預期的目標與理想，追根究底的主要原因乃是材料自我修復的機制相當的複雜，當材料受到破壞須要進行修補時如何在正確的時間激發自癒物質，進而將自癒物質傳送至欲修護的位置，都是非常困難的挑戰，也因此近年來該技術還是被認為是非常熱門與前瞻的研究主題。有鑑於此，本文主要介紹具自我修復功能材料技術發展的目的、重要性、原理和機制與國防和民生應用，俾利軍民讀者對於該材料的先進技術有更深入的認識。

貳、自我修復材料於航太產業的興起

如前所述，許多飛機材料都是屬於複合材料，因此飛機的內部與外部容易產生許多微小的孔洞，尤其是肉眼看不見如髮絲般細小的孔洞，對於飛機安全影響非常大。當飛機飛到高空中，這些微小的孔洞會加速材料的疲勞破壞³。在飛機一般例行性的檢查與維修中，若發現飛機外層材料產生裂縫，

通常會進行裂縫的修補，或是更換新的材料。若裂縫的大小在可以修補的範圍內，通常可以用以下的方法進行修補，包括⁴：(1) 在產生裂縫的周圍塗上雙倍的塗料；(2) 在裂縫區域進行選擇性的電鍍 (Selective Electroplating)；(3) 使用聚合物填充材料 (Polymeric Fillers) 進行裂縫的修補；(4) 在裂縫處鑽一個小孔，使裂縫產生裂縫鈍化效果 (Crack Tip Blunting)，防止裂縫部位繼續擴大；(5) 先將裂縫磨平 (Grinding)，再利用焊接 (Welding) 其它材料的方式，增加材料的厚度，以強化結構的強度以及 (6) 使用熱噴塗 (Thermal Spraying) 技術，對裂縫進行修補。然而，無論使用上述哪一種修補技術，都需要使用額外的修補材料，也需要受過專業訓練的人員，才有辦法進行相關的專業修補，甚至也需要先找出裂縫發生的區域，才有辦法進行後續的修補，這些都會大幅增加航空材料的維修成本。另外，這些修補的方式都是屬於事後補救的方式，研究人員希望利用材料自我修復技術，達到裂縫產生的同時，進行即時自我修復，同時不須使用太多額外的材料與節省修護人員找出裂縫處，所需的檢查與人事成本，因此才會興起發展具有自我修復功能材料。根據國外研究資料

3 “Should self-healing materials be used for spacecraft construction?” <http://curiosity.discovery.com/question/self-healing-materials-spacecraft-construction>, 2014.

4 “Thermo-mechanical evaluation of self-healing metallic structures for aerospace vehicles utilizing shape memory alloys,” https://armd-seedling.arc.nasa.gov/system/files/14Wright_Abstract.pdf, 2014.

指出，利用自我修復技術修復的材料，可以回復其原本75%的材料強度⁵，尤其目前以飛機塗料的應用受到美國與歐洲各國的高度重视。因此，歐洲第七期計畫架構聯盟 (Seventh Framework Programme, FP7)，2014年1月宣布將投入370萬歐元與英國Element Hitchin公司，共同進行一項為期三年具自我修復功能航空複合材料的研究開發計畫⁶。該計畫預計結合多家歐洲材料測試業者、飛機製造商與來自法國、西班牙，以及荷蘭的大學研究機構，共同執行該先進材料的研究開發計畫。該計畫實施的目的是為了革新航太產業，其作法就是利用奈米技術開發含有第二相物質的複合航太飛機塗料，塗佈在飛機的表面，達成材料自我修復的效果。根據相關研究人員表示，利用這種作法可以提高飛機材料的可靠度與延長使用壽命，並且可以降低維修成本。歐洲超過40個實驗室共同合作開發相關的奈米材料技術，同時也積極的設計與發展可以用來進行相關機械撞擊 (Impact)、破壞 (Fracture) 與疲勞 (Fatigue) 等機械測試的方法與設備，以驗證材料自我修復的效果，該計畫預計在2016年發表相關的研究成果。

參、自我修復功能材料的原理與機制

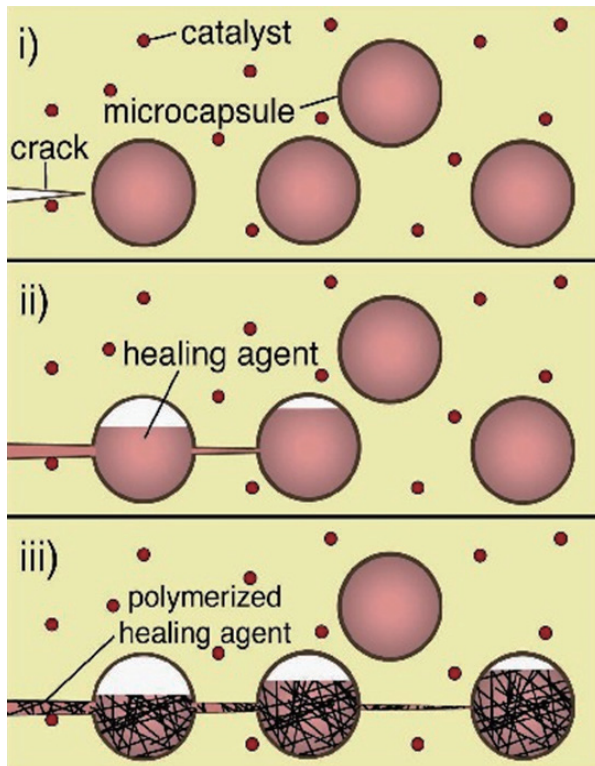
早在1960年代，當時的蘇聯研究人員已經率先發表自我修復材料的想法與研究文獻。然而，由於當時的奈米科技未臻成熟，無法使用微粒包覆技術將奈米膠囊 (Nano-container) 或微米膠囊融入基質材料 (Matrix) 的內部形成複合材料，因此相關的技術受到許多發展限制。直到2001年，來自美國伊利諾大學 (University of Illinois) 的 Scott White教授，再次啟動自我修復材料的研究計畫。該名教授所領導的研究團隊，使用奈米合成技術，成功合成內部含有液態自癒物質的奈 (微) 米膠囊，並將具有修復功能的奈 (微) 米膠囊融入類似塑膠的聚合物體內，當聚合物遭受到過大的外力產生裂縫的同時，裂縫附近的奈 (微) 米膠囊因受到壓力而造成破裂，使得膠囊內部所包含的液態修復物質流出。流出的修復物質可與塑膠聚合物內的觸媒 (Catalyst) 產生化學變化 (Chemical Reaction) 修補裂縫，如圖一所示⁷。

另外，材料自我修復技術很重要的關鍵技術就是如何控制欲修復材料的自癒物質

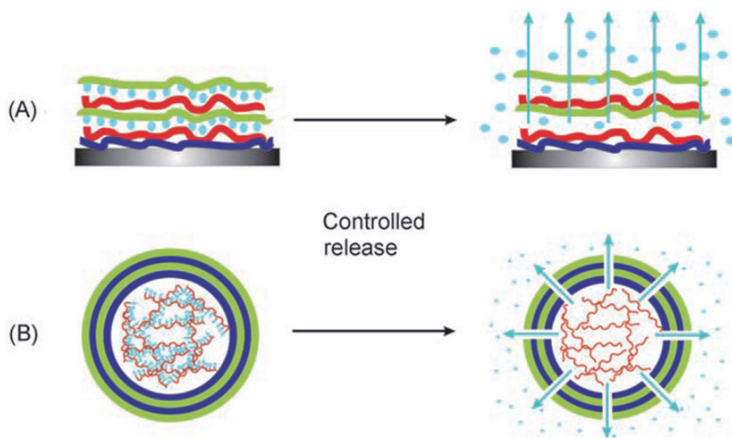
5 “A material capable of healing itself just as a biological organism does,” <http://www.newsmax.com/archives/articles/2001/2/14/183703.shtml>, 2001.

6 “State-of-the-Art aerospace materials research project underway,” <http://www.compositesmanufacturingblog.com/2014/01/self-healing-aerospace-composites/>, 2014.

7 “Time to heal: The materials that repair themselves,” <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-19781862>, 2014.



圖一 含有微米膠囊塑膠材料進行自我修復示意圖 (資料來源: 同註7)



圖二 兩種材料自我修復技術內部自癒物質釋放方式 (資料來源: 同註8,9)

釋放，一般而言可以分成兩種不同的釋放方式。第一種方式就是將活性材料 (Active Material) 塗佈在惰性鍍層 (Passive Coating) 中，這些活性材料可以是抑制劑 (Inhibitor) 或是潤滑劑 (Lubricant) 等，上述物質直接透過惰性鍍層釋放至材料的外部，進而達到自我修復的效果，如圖二 (A) 所示⁸。第二種方式就是利用微粒包覆技術將活性材料包覆在奈 (微) 米膠囊的內部，再藉由控制奈 (微) 米膠囊的釋放方式，將內部的活性物質釋放至欲修復材料的區域，如圖二 (B) 所示⁹。就第一種方法而言，由於活性材料是塗佈在惰性鍍層中，因此活性材料與惰性鍍層將會產生反應 (Interaction)，因此會影響整個材料系統的穩定性與鍍層的活性。此外，當活性材料老化時，內部的抑制劑或潤滑劑會提早產生洩漏，此時外部的鍍層可能尚不

須進行修復，如此一但外部材料受到損害需要進行修補時，將無抑制劑或潤滑劑可供使用，如此一來材料也將無法進行自我修補。利用這種方式進行活性材料的釋放，整個釋放的速率與惰性鍍層的材料結構、化學性質與酸鹼離子的數量有很大的關連性。相較之

8 Dmitry G. Shchukin and Helmuth Mchwald, "Self-Repairing coatings containing active Nanoreservoirs," Journal of Smart Materials, 2007, p.928.

9 http://www.nanowerk.com/spotlight/id2067_1.jpg.

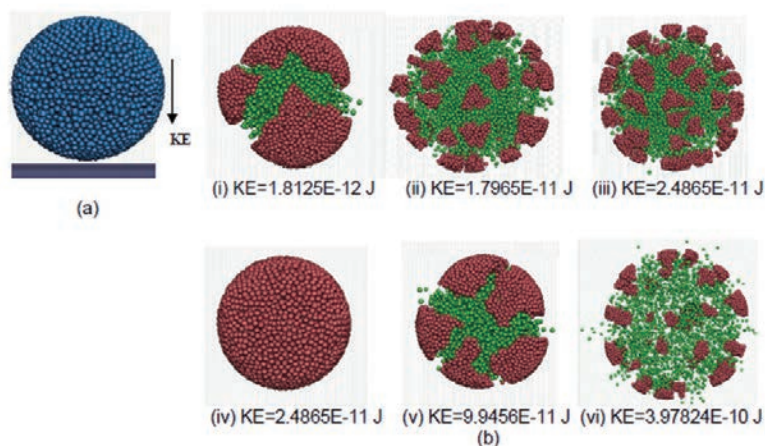
下，第二種方法是將活性物質包覆在奈（微）米膠囊的內部，再藉由控制奈（微）米膠囊的滲透性（Permeability），進而達成容易控制內部活性物質釋放速率的優點。此外，這種合成的奈（微）米膠囊由於是將活性物質包覆在奈（微）米膠囊內部，因此活性物質可與外部的惰性鍍層達到隔離的效果，相互之間不會產生反應，活性物質也不會有洩漏之虞。在合成奈（微）米膠囊時，必須要確保奈米膠囊與外部的惰性鍍層有良好的相容性（Compatibility），且能包覆所需的活性物質，最重要的是藉由控制奈（微）米膠囊的厚度，控制其滲透性（Permeability）。而奈

（微）米膠囊的尺寸也不宜過大，可以介於 300-400 nm 左右，因為若尺寸過大，當內部的活性物質釋放之後，奈（微）米膠囊將形成空殼結構，對於整個材料系統本身而言，該空殼結構將被視為材料內部的缺陷，有可能會影響材料的強度與其它機械性質。而外在的刺激物質或外力，如酸鹼濃度的改變、離子強度的改變、溫度的變化、超音波的震盪、磁場改變與電磁輻射等¹⁰。不同的外力施加將會產生不同的動能（Kinetic Energy, KE），進而影響奈（微）米膠囊內部物質的釋放，如圖三所示¹¹。

在奈（微）米膠囊實際應用方面，以具有可自我修復功能的塗料最有潛力，當塗料塗

佈在材料上，其材料進行自我修復通常可以分成三大步驟，包括：奈（微）米膠囊在材料受損區域破裂、奈（微）米膠囊內部的自癒物質從奈（微）米膠囊內部流出與流出的自癒物質對材料受損區域進行修復，如圖四所示¹²。

目前這種自我修復理論經常被應用在材料的防蝕（Anti-

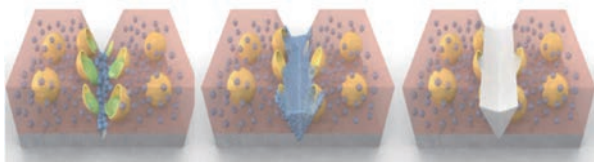


圖三 微粒包覆物質在不同動力下釋放內部物質的狀態（資料來源：同註11）

10 Matthew Rusling, "Self-healing armor could be in store for military vehicles," <http://www.nationaldefensemagazine.org/archive/2008/October/Pages/Self-Healing%20Armor%20Could%20Be%20In%20Store%20for%20Military%20Vehicles.aspx>, 2008.

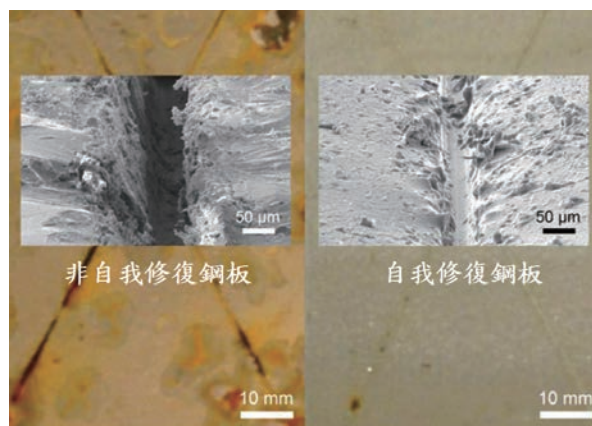
11 S. J. Antony, R. Moreno-Atanasio, J. Musadaidzwa and R. A. Williams, "Impact fracture of composite and homogeneous nano agglomerates," *Journal of nano materials* No.9, 2008.

12 Kerry Pianoforte, "AMI offers polymers for seal-healing coatings technologies," http://www.autonomicmaterials.com/files/AMI_Offers_Polymers_For_Seal-Healing_Coatings_%20Technologies_%20Coatings_World.pdf, 2013.



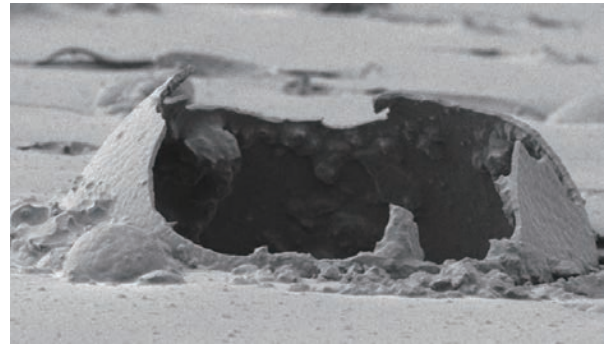
圖四 材料進行自我修復步驟示意圖(資料來源:同註12)

corrosion)處理,根據國外文獻的實驗結果顯示,若將濃度5%的氯化鈉(鹽水)浸泡在非自我修復自與我修復的鋼板刮痕上,經過5天的鹽水腐蝕,可以清楚的發現,非自我修復鋼板由於材料表面的腐蝕效果,所以表面刮痕的深度越來越深,亦即表示材料的腐蝕的程度漸趨嚴重;相較之下,自我修復鋼板由於材料內部含有奈(微)米膠囊自我修復物質,該物質受到外部腐蝕液的侵蝕後將會產生破裂,而使得內部的自癒物質可以進行材料裂縫的修補,材料表面的刮痕深度將會縮小,達到部分材料復原的效果,如圖五所示¹³。上述的



圖五 非自我修復(左圖)與自我修復(右圖)鋼板防蝕效果比較電子顯微鏡照片(資料來源:同註13)

奈(微)米膠囊破裂後,內部的自癒物質可對受損材料進行修復,而奈(微)米膠囊本身將會形成空殼結構,如圖六所示¹⁴。



圖六 奈(微)米膠囊破裂後電子顯微鏡照片
(資料來源:同註14)

肆、自我修復材料在國防領域的應用

隸屬於美國陸軍研發工程指揮部(U.S. Army's Research, Development and Engineering Command)之美國陸軍納蒂克軍事研究發展與工程中心(U.S. Army Natick Soldier Research Development and Engineering Center),於2009年開始研究可應用於陸軍武器裝備的先進材料與裝備,包括:彈道飛彈防護(Ballistic Protection)、整合式防護頭盔(Integrated Protective Helmet)、模組化人員保護系統(Modular Personnel Protective System)、化學與生物戰防護(Chemical and Biological Protection)、

13 Scott White and Paul Braun, "New polymer coatings prevent corrosion even when scratched," http://www.matse.illinois.edu/downloads/alumni_news/MatSEnews-Summer09.pdf, 2009.

14 <http://edition.cnn.com/2013/02/22/tech/self-healing-materials/>.

火焰與隔熱防護 (Flame and Thermal Protection)、反偵搜 (Counter-surveillance)、穿戴式互動材料 (Body-worn Interactive Materials)、仿生機器 (Biomechanics)、奈米材料 (Materials Nanotechnology) 與重量輕與低成本的電池 (Lightweight, Low-cost Power Sources)¹⁵。其中，在彈道飛彈防護方面，研究人員思考利用微粒包覆的技術，在聚合物的內部添加奈(微)米膠囊物質，期望利用膠囊內部的添加物質，強化聚合物本身的拉伸性質 (Tensile Properties)。利用重量輕的聚合物，加入奈(微)米膠囊物質，可以大幅減輕現行防護裝備的重量，由此可以窺知利用微粒包覆概念，不但可以修復材料，同時也可以強化材料，是目前美國陸軍開發先進材料的重要研究方向，因此也非常值得我軍相關國防研究機構參考。

美國萊斯大學的研究人員表示，他們正在研究一種新型聚氨基酯奈米材料，該材料不僅能夠阻擋子彈的射擊，還能進行自我修復。在試驗中，研究人員朝這種材料射出小型玻璃珠，結果顯示它可有效抵擋玻璃珠的撞擊。該研究小組成員表示：「這將是一個很好的防彈玻璃材料。」他們開展這項研究的目的是希望找到一種避免使原材料變形或毀壞的方法。但研究的結果使他們發現了一

種更好、更堅硬、更輕便的防彈材料，這種材料既可以製成士兵和警察的防彈衣，也可以用作航空器和衛星等裝備的防護塗層，使它們免受速度較快的小型物體的衝擊。研究人員進一步表示：「當遭受小型物體高速撞擊時，這種複雜的聚氨基酯奈米材料會“融化”成液體，從而阻止小型物體前進，並堵住它們的撞擊入口，完成自我修復。」

美國威斯康辛大學密爾瓦基分校 (University of Wisconsin- Milwaukee)，正在積極開發具有自我修復功能的軍用裝甲車材料，如圖七所示¹⁶。這個技術的關鍵在於當裝甲材料還是液態的狀態下，摻雜「微小氣球」 (Microscopic Balloon) 進入液態裝甲中，形成裝甲與微小氣球的複合材料。當裝甲車在戰場上受到火箭彈，或者是其他的反裝甲



圖七 美國威斯康辛大學密爾瓦基分校開發之可自我修復之軍用裝甲車材料 (資料來源：同註16)

15 “Military targets material innovation”<http://news.thomasnet.com/IMT/2008/11/11/war-military-demands-materials-science-technology-breakthroughs-army-wish-list/>.

16 同註10。

火箭炮攻擊時，摻雜在裝甲內部的微小氣球會受到高溫的加熱，可以在數分鐘，甚至是數秒鐘的時間下溶解，使內部充填低溫材料洩漏在受到攻擊的裝甲表面上，對產生裂縫的裝甲材料進行即時的修補，避免裂縫的擴大，造成裝甲材料更大的損壞。微小氣球的破裂，取決於火箭彈攻擊裝甲的相對速度，以及裝甲與火箭彈的材料性質。雖然要將數以萬計的微小氣球摻雜在液態裝甲的內部，可能會有增加裝甲車成本的疑慮，然而使用微小氣球表示可以使用較少的鋁或鎂等裝甲材料，因此可以減輕裝甲的重量，可節省油料的支出，以及增加裝甲的機動能力。另一方面，相較於摻雜微小氣球的成本，維修與更換受損裝甲的成本更為昂貴，因此摻雜微小氣球，使裝甲具有自我修復能力，仍然是一個非常可行的想法。為了降低微小氣球的製造成本，研究人員著手使用汽油燃燒後產生廢棄的副產品—飛灰 (Fly Ash)，如此不但可以減少環境的污染，同時還可以降低複合裝甲的製造成本。將實驗室等級的微小試片，擴大至實際裝甲大小的試片，同時保有與實驗室試片一樣的自我修復能力，是研究人員下一階段的計畫目標。

伍、自我修復材料在民生領域的應用

美國史丹福大學 (Stanford University) 研究團隊最近在聚合物材料內部，摻雜許多鎳微小粒子，成為一種可進行多次自我修復的導電材料，如圖八所示¹⁷。在壓力改變的情況下，鎳微小顆粒可以像人類的皮膚一樣，感測到材料缺陷產生的位置，並進行修補的功能。該自我修復的材料由於與聚合物結合，因此具有很好的可撓性 (Flexibility)，由於鎳又具有導電性，因此形成複合導電聚合物材料，可以使用在電子零件中。未來該團隊預計開發具自我修復功能的透明複合導電聚合物材料，將可使用在智慧手機的觸碰螢幕介面 (Touch Screen Interfaces) 與其它可攜式電子材料 (Portable Electronics) 中。



圖八 美國史丹福大學開發可進行多次自我修復的導電材料 (資料來源：同註17)

美國一家生產燃氣儲存槽的廠商，也積極在開發具自我修復的新一代燃氣儲存槽，該槽體的主要使用材料為鋼、鋁、改良型聚合物、玻璃纖維 (Fiberglass) 與碳纖維 (Carbon Fiber) 等。與一般槽體不同的是，該槽體的

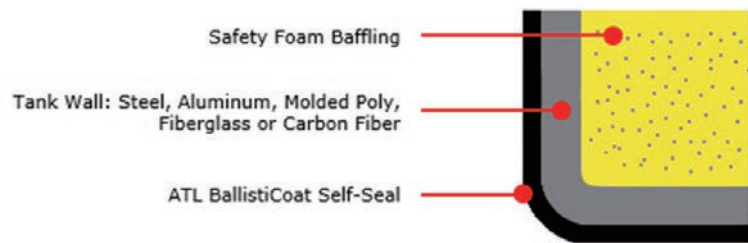
17 Blaine Brownell, "New self-repairing plastic also conducts electricity," <http://www.architectmagazine.com/technology/new-self-healing-plastic-also-conducts-electricity.aspx>, 2012.

18 <http://www.atlinc.com/ballistictank.html#>.

外側有一層自我密封的材料，稱為“BallistiCoat Self-Seal”，該材料可以對外洩的燃氣進行偵測與修復，達到自我密封的效果，如圖九所示¹⁸。據該公司表示，該材料亦可以應用在火災防護、防爆軍用車輛、禮賓車輛與警用巡邏車，達到防火與防爆的效果。

2008年夏季，來自英國布魯斯托爾（University of Bristol）工程人員，宣稱開發出具有自我修復功能的智慧複合材料¹⁹。該材料除了具有自我修復功能外，也可以更進一步將修復的狀況進行監控與回報。研究人員研發該智慧複合材料是希望將其應用在一些稍有不慎即可能產生重大災害的商業或軍事應用材料。修復狀況的監控與回報機制，主要是將導電粒子摻雜進入聚合物的內部，當材料發生裂縫或破壞時，聚合物內導電粒子會產生電性的改變，而進行自我修復後亦會造成電性的改變，藉由量測電性的改變即可得知材料修復的效果，達到類似感測器監控的目的，相關原理與電容式感測器（Capacitive Sensor）非常相似。

在不久的將來，智慧型手機或平板電腦將也可以進行自我修復。美國南密西西比大學的研究人員成功的開發出一種具自我修復



圖九 具防止洩漏之燃氣儲存槽材料結構（資料來源：同註18）

功能的塑膠，當受到損壞時，該材料可以藉由光線、溫度與酸鹼值的改變，達到自我修復的目的²⁰。這種新開發的塑膠材料最大的特色是可以在相同的位置，達成多次修復的效果。因此，若是使用者的智慧型手機總是經常掉落，並在相同的位置遭受到損壞，每一次都可以進行自我修復。研究人員開發出一連串的分橋（Molecular Bridge），可以連接塑膠的主要組成份一長碳氫鍵（Long Hydrocarbon Chain），當塑膠遭受到破壞時，分子橋會斷裂並且改變形狀，並且造成顏色的改變，當在可見光（Visible Light）的照射之下，分子橋將會再次改變形狀，並回復到原來與長碳氫鍵連結的狀態。研究人員也在評估是否可以將相關的技術，應用在其它非智慧型手機的應用領域，例如飛機與汽車的修復上，美國國防部（Department of Defense, DOD）正在資助相關研究計畫的經費。

美國波音（Boeing）與摩托羅拉

19 “Self-repairing aircraft becoming a reality,” <http://www.airforce-technology.com/features/feature43086/>, 2008.

20 Scott H., “University researchers create self-repairing plastics,” <http://www.phonearena.com/news/University-researchers-create-self-repairing-plasticsid28484>, 2012.

(Motorola) 公司，目前正在積極開發具有自我修護功能的複合材料²¹。以航空材料而言，由於飛機的起降與飛行，因此經常處於溫度與壓力變化非常大的環境之下，因此容易造成零件的疲勞，進而造成材料的失效，而嚴重影響飛行安全。就微電子材料而言，許多應用在電子元件的印刷電路板 (Circuit Boards)，常常處於高熱的環境之下，因此經常容易出現裂縫，因而影響整個電子元件的性能，最後造成電子元件可靠度與品質的降低。

在2013年國外已經有相關的抗腐蝕 (Anti-corrosion) 產品上市，並且應用於海水接觸物體的保護，如船底、船塢、油氣平臺與管路的防蝕保護，以達到壽命延長與自我修復的目的²²。

陸、結論

美國動作巨星阿諾史瓦辛格 (Arnold Schwarzenegger) 主演的美國好萊塢 (Hollywood) 賣座電影「魔鬼終結者」 (Terminator) 電影情節描述，當機器人的本體受到損壞後，該部位會立即形成液態的金屬，之後再輕易與本體連接在一起，達到自我修復的效果。這種電影情節般的劇情，已經可

以逐漸的實現在我們現在日常生活與商品中。所謂「預防勝於治療」，本文所介紹的材料自我修復技術，是一種「預防式」的材料修復方法，而非是「事後補救」的修復方法，非常適用於不易發覺材料損壞、操作環境不易更換零件以及對於強化材料相關的機械與材料性質有非常大的幫助。該自我修復材料技術，現在與未來有機會可以廣泛應用在裝甲、飛機、防彈、橋梁、建築物、3C產品與儲氣槽等耐久性材料的自我修復。對我國國軍而言，若能將本文所介紹的相關技術與不易維修及更換的軍品結合，必能提高後勤維修的效率。事實上，筆者所服務的國家中山科學研究院化學研究所，目前也正積極的規劃與評估將自我修復材料技術，應用於表面防蝕處理與可具有自我修復的電子半導體材料，如IC測試探針與IC電路板等相關軍民通用技術的開發，相信在不久的將來，具有可自我修復功能的智慧材料，將可以引領材料科技技術的革新，為人類開創更安全與舒適的生活品質。

作者簡介

趙本善，臺北科技大學機電科技博士班畢業，曾任國科會特聘博士後研究學者、清華大學材料科學與工程學系博士後研究員、京元電子研發主管，現任國家中山科學研究院化學研究所助理研究員。

21 同註2。

22 “Heal thyself: The bio-inspired materials that self-repair,” <http://edition.cnn.com/2013/02/22/tech/self-healing-materials/>, 2013.