

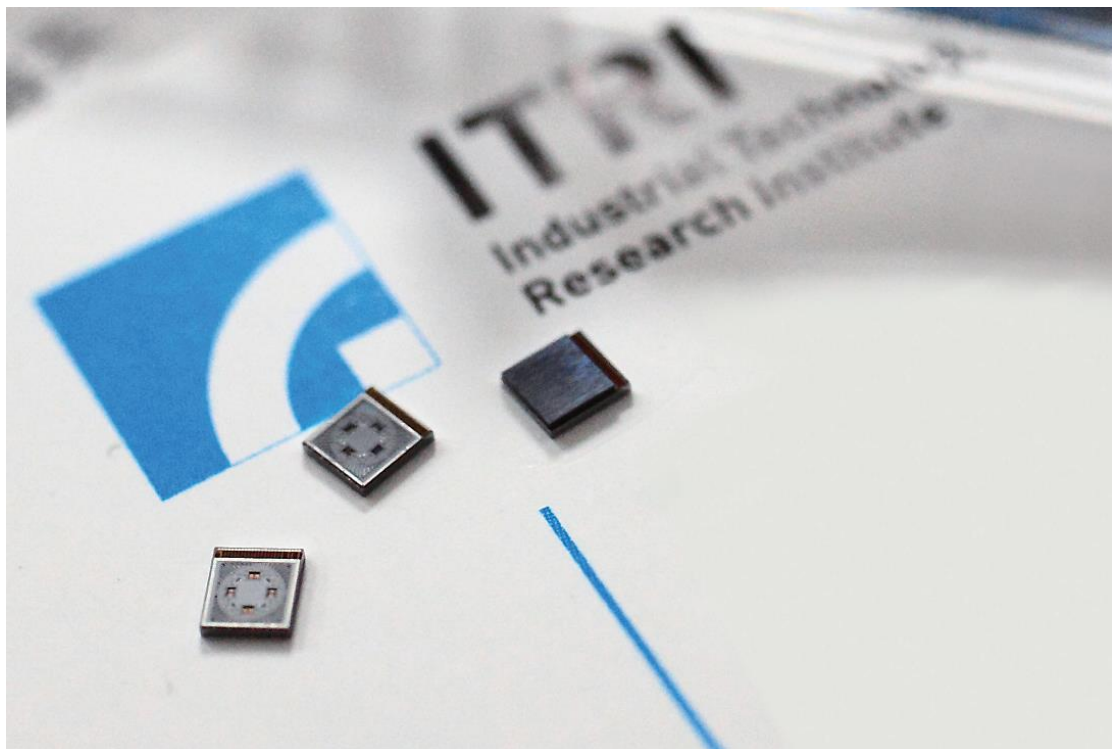
## 以熱情的心開啟材料無限可能的未來

彭裕民博士/材料學會 理事長（2017-2020）

工研院副院長兼材料化工所 所長

如果有一天你躺在床上，突然想要親自設計一台具可折疊高解析照像功能的無人機，做為老爸，老媽結婚 20 週年的禮物，好伴著老爸、老媽環遊世界，同時把影像和健康快樂的生理狀態即時傳回台灣；你也想幫女朋友量身訂做專屬、很酷的跑鞋，陪你路跑時也不叫累，想到此你一躍而起，在專業網路上找到無人機和跑鞋的輕量複合材料，及公版產品設計程式，你選了女友喜歡的顏色，輸入完全貼合女友腳形的人因數據，最後配上適合老爸、老媽可攜帶的無人機，這一切好像進入有大廚協助的DIY 廚房選菜，加上自己的調味，於是你按下一個 Start 鍵，各式材料專業調配好，並與 3D 列印即時啟動，兩天後無人機、跑鞋已被另一台無人機送到門口。這是超輕薄的的金屬、陶瓷、高分子複合材料，加上結構設計與軟體的整合、依功能需求選配合適的電池、感測、通訊元件，這即時客製化『智造』的夢隱然快要實現，創意屬於愛想像且擅長整合的你。

圖說：無線動態生理檢測系統，即將成為不受環境限制、無負擔的健康守護者





圖說：利用輕量化複合材料，量身訂作打造一雙專屬的跑鞋，將不再是夢想  
資料來源：

<https://news.nike.com/news/nike-football-accelerates-innovation-with-3d-printed-concept-cleat-for-shuttle>

讓我們再想像一下，如果現在的材料能夠從大地生長出來，由生生不息的樹木、花草等生質材料製成衣服、鞋襪、橡膠、塑膠產品，甚至製成飛機、捷運車體，當這些產品服務年限已到，大部分材料可拆解重複使用，若不慎遭掩埋或放流到海洋，此類新材料也會被微生物分解成為動物、海洋魚類和植物的肥料，而非廢料污染生態。這可不是科幻，引領世界作循環經濟的歐盟，選了塑膠、橡膠多樣產品，預計 2030 有 30% 的產品要做到可分解、可回收，這將翻轉材料的發展，也讓地球得以喘息。歐盟的跨國計畫，結合材料、化學、物理、土壤、微生物與設計的專家學者，以學理為基礎，產品化為目標，展開跨領域的合作，工研院也為歐盟團隊之一，結合國內學者、業者共同投入，更負責歐盟生質計畫的試量產、應用的開發。



圖說：工研院開發 PEF 生質材料，100%來自於植物，可替代現有的 PET 保特瓶

材料既然那麼神奇，材料的本質是什麼？

廣義的說材料是化學、物理、機械的基礎學理融合，需要從奈米尺度到巨觀尺度瞭解分子結構、晶相、熱力學、動力學及力學，進而從成分、結構進階到特性與應用，當材料與數位、電子、智慧機械、高寬頻通訊、生技及藝術整合，就演變出具獨特、多元創意的產品；我們常說材料能 **enable**（致能）具創意的元件、系統、服務，就是這個意思；材料要有學理的深度卻不能孤芳自賞，一定要結合不同科技，才可能成就廣度與大格局。

人類的文明、國防太空的發展、工業革命，多源自於材料的重大創新與突破，材料一直扮演關鍵但有一點『幕後英雄』的角色；從石器、銅、鐵器時代到高溫超合金材料的發明，製造了蒸氣機、航太引擎與火箭，引領了太空的發展；從半導體材料、通訊材料的發明，讓電子與通訊產業十倍速的進展；民生應用上從蠶絲、棉到吸濕排汗的機能性纖維，也改善我們生活的品質。只要用心觀察、仔細分析，材料創新在能源、水科技、機械、建築、車輛…的發展都精彩無比。因此可以說材料是工業之母、是創新的源頭。



圖說：透過材料創新，機能性纖維讓台灣紡織業成功轉型，再次主導全球市場

面對可知與不可知的未來，材料的突破與發明將更形重要！未來 10 年 20 年到百年的環境將面臨巨大的轉變，也帶來機會和挑戰，我們看到：

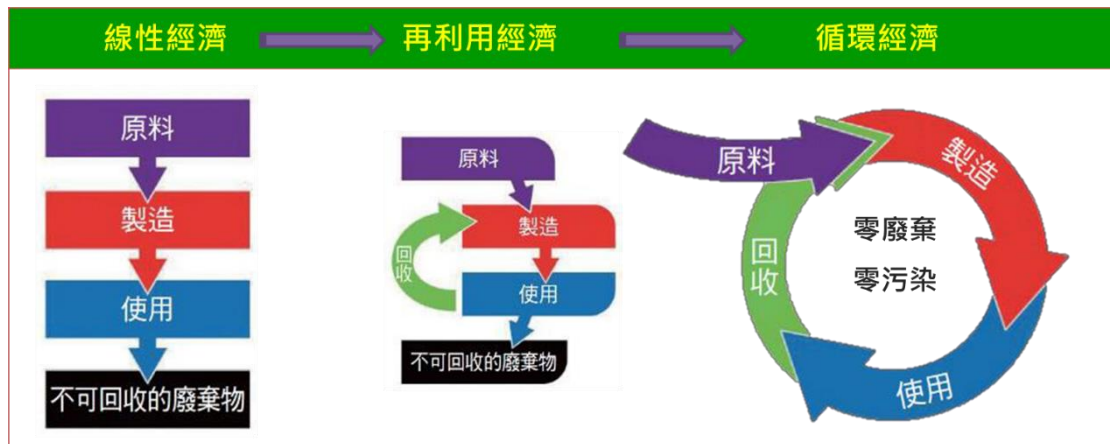
(1) 5G 高寬頻、人工智慧的崛起，帶動智慧生產與無人載具及材料巨大的變革，各式感測材料、低阻值高傳輸材料、超輕量化材料急待開發。

(2) 全球對生物科技、環保、節能材料的需求，對高品質生活與無毒環境的需求，也讓世界重新思考『循環好材料』的定義，也因此開啟新材料的研發與設計。

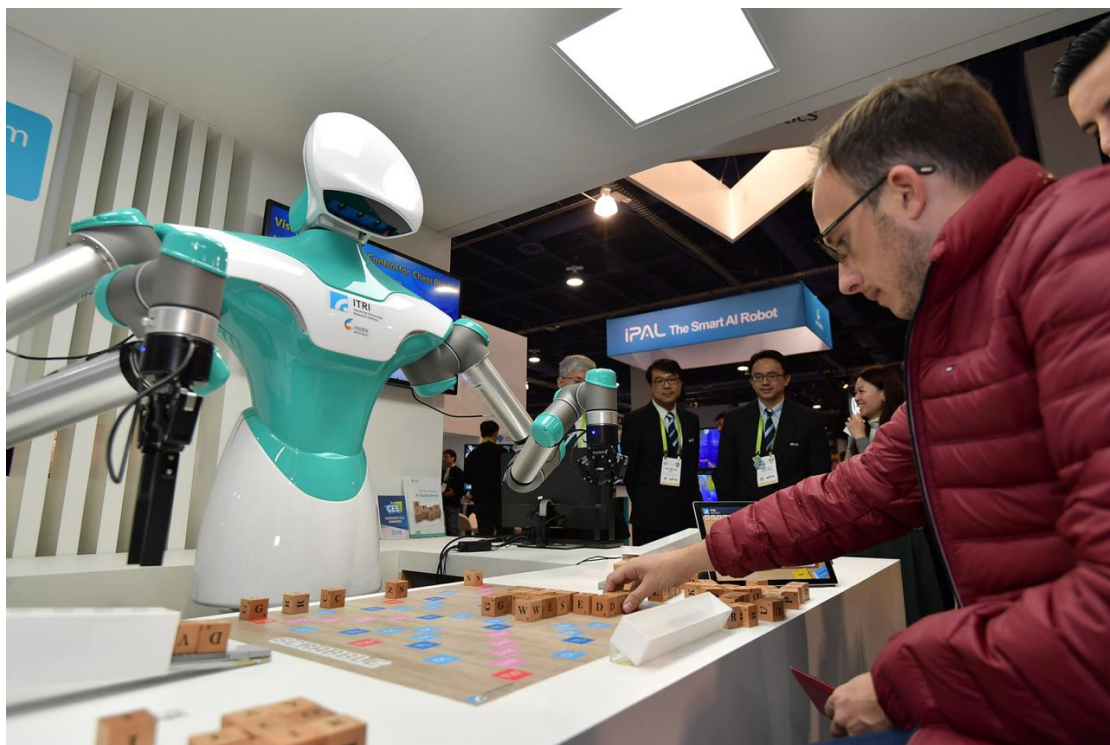
(3) 年輕世代對愛地球的酷生活、穿戴式用品的追求，勢必帶動環境友善材料融合數位化科技，因而提供材料創新、應用無限的機會。

(4) 在這幾個大趨勢下，我們以循環經濟的思維、運用數位模擬與人工智慧 (Material Informatics & AI) 的運算與智造，深信材料的研發將再創高峰，未來材料的創新與應用一定更精彩。

讓我們以一句話來共同勉勵、共同努力：帶著好玩和熱情的心，一起探索材料無限可能的未來。



圖說：循環經濟模式將徹底改變思維，驅動新時代的材料研發與設計走向



圖說：綜合大數據、數位模擬的 AI 科技，將啟動材料科技無限創新的可能性

# 第一章金屬材料概述

鄭憲清、宋振銘、林士剛、顏鴻威

## 1.1 日常生活接觸到的金屬\_以手機為例

金屬材料存在於生活周遭，本節以手機為例，說明金屬材料是如何被應用，使得我們的生活更便利。

常用金屬如手機內的晶片模組與電路板使用黃金、銅，銀與鎳也都找得到蹤跡。喇叭中的磁石、馬達中的永久磁鐵(釹鐵硼磁鐵)均使用了鐵。靜音模式來電震動的來源為手機中的震動馬達，其使用的鑄製配件重量不平衡，馬達一旋轉，重心偏移得以產生震動。具儲存/放出電能功能的各種電容中，鋁質電容除了鋁之外還使用了銀與錳，陶瓷電容則含鈣、鈦、鈆、鉛、鎳、鋅等金屬。廣泛應用於無線通訊，WiFi 裝置之水晶振動子，除了矽之外，亦使用金屬銅與鎳。液晶顯示器之透明電極氧化銦錫(indium tin oxide, ITO)，則大量使用到銦、錫。銀應用很廣，除了上述的晶片模組與電容之外，被動元件晶片電阻(含銀、鐵、鎳、銅、鉛、鋅)，接觸式斷路器(含銀、鐵、鎳、鉻)均使用了銀。事實上金屬更具更廣泛多樣化應用，比如合成樹脂耐燃劑中含有錒。

除常見金屬之外，往往於產業報導中會看到「rare metal」「稀有金屬」這個名詞。意思是因埋藏量稀少、採掘或者提煉困難等理由，流通量、使用量非常少的“稀少的金屬”。包含鋰、鈹、硼、鈦、鈆、鉻、錳、鈷、鎳、鎳、鎂、鋳、錒、鎢、鈷、鈹、鈷、鈷、鈹、鈷、鈷、鈷以及稀土類等 31 種金屬被稱作稀有金屬，從手機到電腦、液晶電視等等日常生活上常用到的電器用品，稀有金屬是不可或缺的原料。特別是手機，在電池部份需要鈷、鋰、鎳、稀土元素，液晶面板要用到銦。

部份金屬因其貴重性(如金、銀以及稀有金屬)，從廢棄手機、電腦等進行回收

利用，稱之“都市礦山”。根據日本 NIMS 的調查，全世界廢棄的手機、電腦等形成的“都市礦山”，貴金屬的金約 6800 噸、銀約 60000 噸、稀有金屬的鈾約 1700 噸、鉭約 4400 噸。相當於全世界金的現有埋藏量的 16%、銀 22%、鈾 61%、鉭 10%。台灣幾乎沒有稀有金屬的產出，非常仰賴進口，主要輸入地從前主要為非洲、澳洲、加拿大，現在中國大陸所佔比例大幅增加。做為世界重要的電子產品生產基地，要如何穩定的取得稀有金屬將會未來最重要的產業課題之一，因此廢棄電子產品中之金屬回收再利用為重要課題。

## 1.2 鐵與鋼

鐵(iron)之化學元素符號為Fe，為地球含量最高之元素。鐵元素本身強度並不特別高，但是與藉由微量的碳元素合金化，可達有效強化，正所謂「恨鐵不成鋼」。經過不同的變形與熱處理，鋼鐵內部能夠產生多樣的顯微結構，並且展現出性能的多樣優異性。

鋼鐵是世界上最廣泛應用的金屬材料，同時也是對人類日常生活來說最重要的金屬材料。如圖1-1所示，人類使用最多的工程材料為水泥，其次便是鋼鐵材料，而人類鋼鐵用量超過鋁合金用量的30倍，亦即所有非鐵金屬材料用量的總和，仍不及鋼鐵的1/30，鋼鐵可以說是金屬之王，甚至可以說，人類文明已經無法脫離鋼鐵材料。

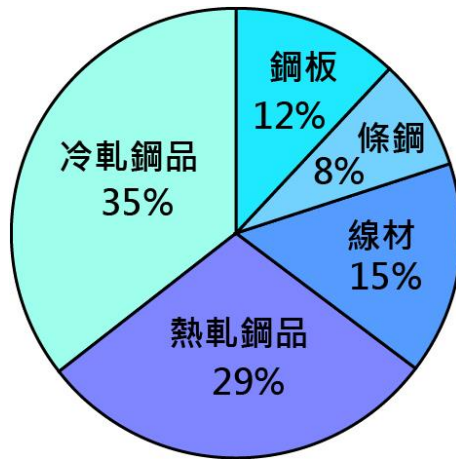


圖 1-1 人類工程材料消耗比例(依重量計)

《管子·第七十七篇地數》記載：「出銅之山四百六十七山，出鐵之山三千六百山...上有赭者，其下有鐵。」顯示春秋時代不但知道鐵，甚至可能知道鐵含量之意義，至於古人當時所生產使用者為鐵或鋼，雖然難以完全查證，由於鋼鐵具有優異的性能與便宜的價格，人類研究與使用鋼鐵材料的歷史可以追溯至遠古。更值得注意的是，鋼鐵材料為100%可回收之金屬材料，在天然資源缺乏的今日，人類不但成功擺脫過去對鋼鐵的黑色煙囪印象，更將鋼鐵材料視為地球永續發展的重要夥伴。

### 鐵碳平衡相圖

鋼鐵的性能最主要源自於其碳含量與顯微結構組織，鐵碳二元相圖為了解其結構的重要指南。所謂相圖，為用來表示相平衡系統的成份組成、溫度、壓力等參數與相結構之間關係的一種圖。鐵碳相圖就是以熱力學平衡為基礎，於1大氣壓下，鐵碳合金(即鋼鐵)在不同成份與不同溫度下平衡相結構的地圖。

圖 1-2 顯示之鐵碳相圖其縱軸為溫度，橫軸為鐵碳二元合金之碳濃度，呈現常壓下合金成分與溫度所對應的相結構關係。如最左邊的純鐵在低溫時為體心立方結構，稱為 $\alpha$ 肥粒鐵，升溫至 $912\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上時，純鐵會相變態為面心立方之晶體，稱為 $\gamma$ 沃斯田鐵，在更高溫度又相變為 $\delta$ 肥粒鐵。當碳原子進入鐵所構成之晶體



時，除了形成碳化物或其他晶體之外，當碳溶在鐵之晶格中，稱為固溶體。Fe-0.76wt% C 合金於 1000 °C 平衡時仍為  $\gamma$  沃斯田鐵相結構，但是將溫度降至 650 °C 後的平衡態則為  $\alpha$  肥粒鐵與  $\text{Fe}_3\text{C}$  雪明碳鐵共存狀態，稱之共析組織(eutectoid structure)。此相圖顯示  $\alpha$  肥粒鐵對碳的固溶度較低，只要超過 0.022 wt. % 的碳含量，就會進入  $\alpha$  肥粒鐵與雪明碳鐵的兩相區，相對而言  $\gamma$  沃斯田鐵具有較高的碳固溶度。最後，相圖亦可讀取兩相平衡時之兩相成份，並估算雙相共存時之兩相比例。

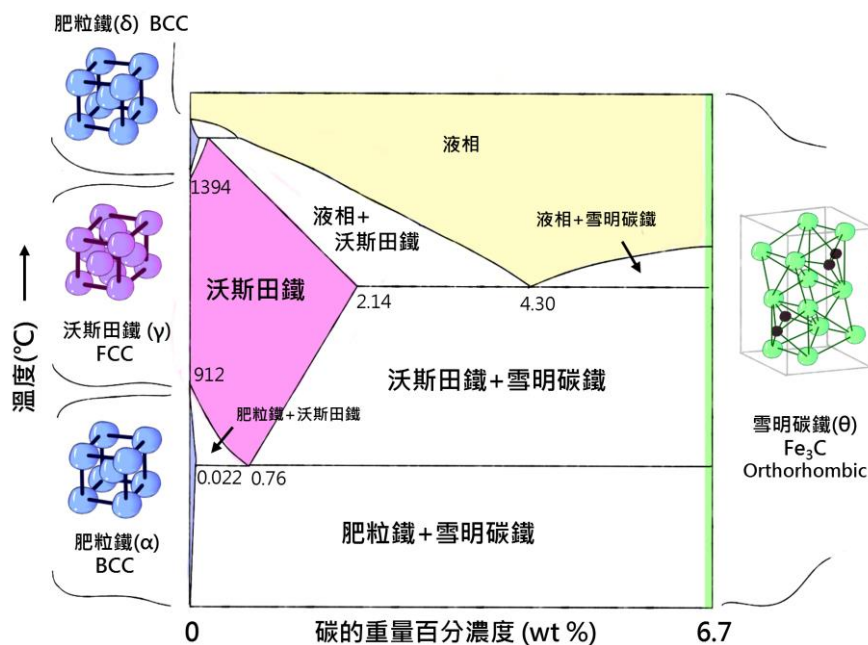


圖 1-2 鐵碳二元平衡相圖

### 相變態與鋼鐵顯微組織

除了肥粒鐵、沃斯田鐵、雪明碳鐵之平衡相結構外，鋼鐵組織透過相變態理論能夠產生不同之相組織組合或者非平衡相晶體。先前相圖中呈現的是平衡之相組織，沒有時間的概念，或說相形成時間無限長的概念，而談及相變態理論與顯微組織則必須導入時間的概念，因為不同成份的相組織形成時必須伴隨溶質原子的擴散與相結構的成核。以圖 1-3 中 Fe-0.76C(in wt. %)合金為例，若從 950 °C 單相沃斯田鐵區降溫至 700 °C 肥粒鐵與雪明碳鐵兩相區時，由於肥粒鐵含碳量極低，

而雪明碳鐵之含碳量較高，因此肥粒鐵相形成之區域便需要將碳排至雪明碳鐵區域，這個過程必須仰賴擴散，而這樣的交互擴散便形成肥粒鐵與雪明碳鐵交疊的層狀組織，此顯微組織成為波來鐵(pearlite)。此外，形成波來鐵組織的位置需要成核，一般而言，材料的缺陷位置(如晶界與差排)易於成核，成核後隨之成長，成長的過程仍然繼續伴隨著碳溶質的交互擴散，最後達到相圖中預期的相比比例。若將 Fe-0.76wt%C 合金從 950 °C 單相沃斯田鐵區快速降溫至 550 °C 持溫，從相比比例與 700 °C 差異不大，但是溫度較低時成核驅動粒大，成核數量較多，但擴散較慢，使得層狀組織較細緻，故其最終組織結構整體較細緻，被稱為細波來鐵，而 700 °C 之波來鐵組織則稱為粗波來鐵，細波來鐵的強度高於波來鐵強度。因此，相圖只決定了相組織與相組成之終點，而相變態理論能夠依不同路徑決定出顯微組織。

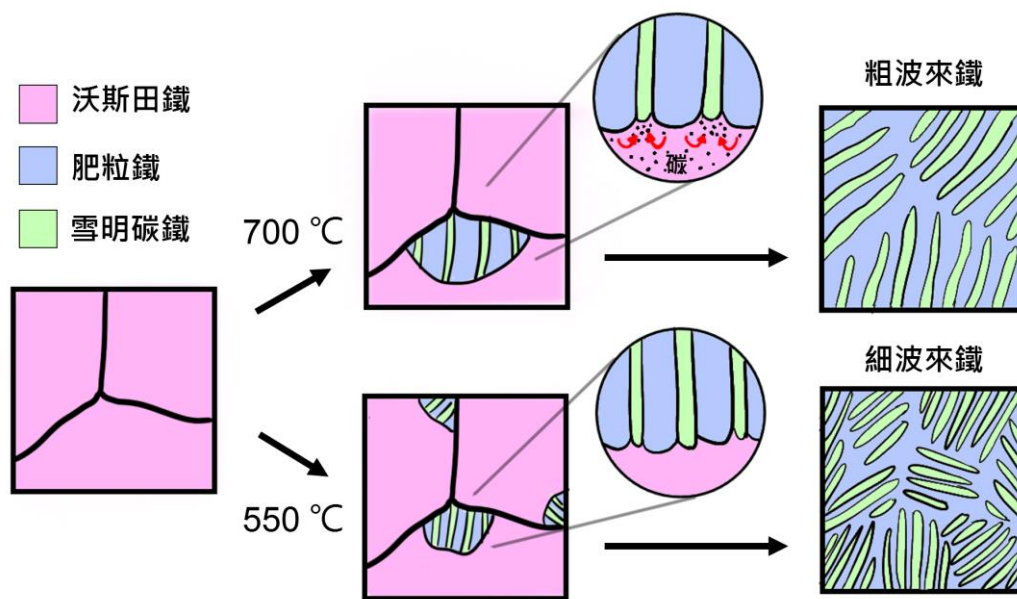


圖 1-3 Fe-0.76wt%C 共析成份合金之波來鐵相變態過程

鋼鐵相變態可以簡單區分為擴散相變態與非擴散剪切相變態，擴散相變態之相成長與時間相關，如圖 1-4A 所示，起始相變態時所形成的核非常小也非常少，故其比例較低，隨時間經過後核開始成長，相變態比例逐漸升高，當接近平衡態時，相變態速率又因為擴散梯度不足而趨緩，又因為不同溫度下因為成核與擴散

之綜合效應，使得起始相變態與完成「接近」平衡狀態之時間在各溫度都不同。若我們可以在不同溫度持溫並且量取隨時間之相變態變化，即可呈現如圖 1-4B 之 TTT 圖(temperature-time transformation diagram)，又若能於連續冷卻過程中，以不同冷卻速率量取隨時間(亦即溫度)之相變態變化，則可令呈現如圖 1-4C 之 CCT 圖(continuous-cooling transformation diagram)。於工程實務中，TTT 圖與 CCT 圖均為鋼鐵顯微組織控制之重要參考。

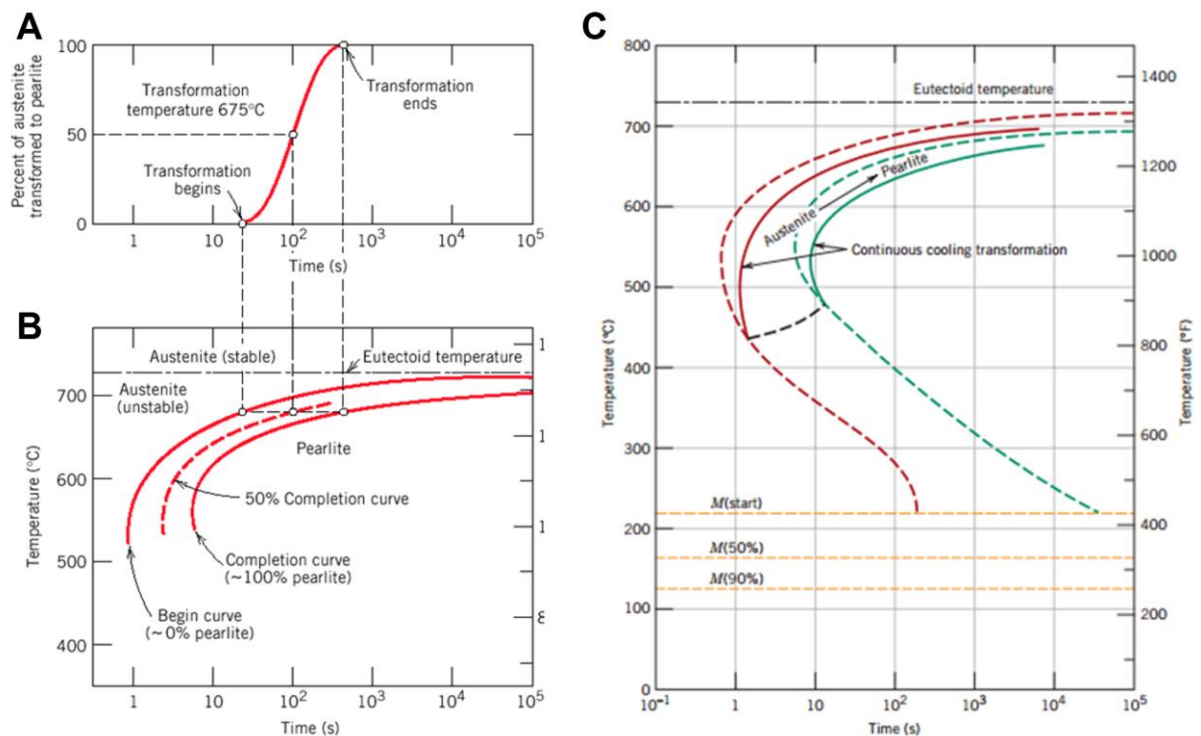


圖 1-4 擴散相變態：A.相變態比例隨時間之變化、B. Fe-0.76wt%C 之 TTT 圖、  
C. Fe-0.76wt%C 之 CCT 圖

如先前所提及，溫度越低擴散越慢，若從高溫沃斯田鐵相區快速將鋼鐵合金冷卻至常溫將可以抑制碳的擴散，但是相變態依然會在低溫發生，故為非擴散相變態。在這樣的情況下，如圖 1-5 所示，沃斯田鐵將相變成為體心立方之麻田散鐵，由於無法快散排出的碳滯留於體心立方晶格中，使得一軸拉長為體心正方晶格，而由沃斯田鐵至麻田散鐵的晶格轉變採取原子相對關係不變之剪切變形，故又補充說明為非擴散剪切相變態，此類型相變態通稱為麻田散鐵相變態。麻田散鐵的

發生必須透過高速冷卻來避免擴散相變態發生，這個快速冷卻之熱處理手段稱為淬火，麻田散鐵相變態之速度相當於音速，故相變態比例與時間幾乎無關，但其相變態比例隨溫度越低，由於相變驅動力越大而產生之相比例越高。簡言之，擴散相變與時間有關，非擴散剪切相變僅與溫度有關，稱之滯溫變態(athermal transformation)。

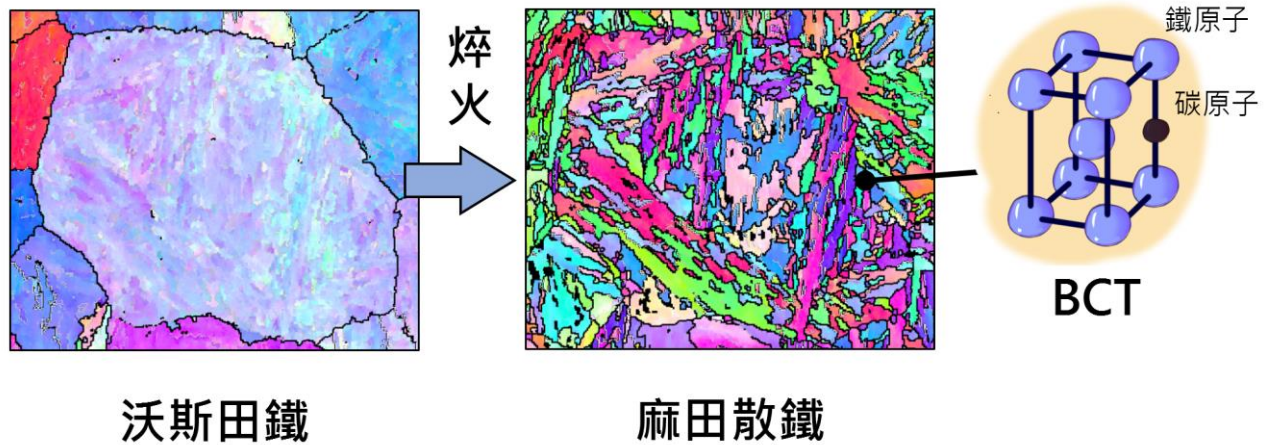


圖 1-5 麻田散鐵相變態之顯微結構變化與體心正方之晶格

在鋼鐵材料中，麻田散鐵同時具有較高的缺陷密度以及過飽和碳濃度，其硬度與硬度非常高，但不具延展性與韌性。事實上，低溫時應該仍以肥粒鐵及雪明碳鐵為平衡相，故麻田散鐵相為碳無法排出之介穩相結構，如果我們將 Fe-0.2wt%C 麻田散鐵升溫至 550 °C 持溫，隨時間能夠使雪明碳鐵析出，體心正方之麻田散鐵隨之轉變為體心立方之肥粒鐵，此結構稱為回火麻田散鐵，若持溫夠久，肥粒鐵與雪明碳鐵之兩相比例又會接近相圖之預測比例，但兩相之分布並非波來鐵之層狀組織。回火麻田散鐵之強度與硬度較原先之麻田散鐵低，但是其延展性與韌性都會較為優異。

### 鋼鐵的機械性能

鋼鐵材料之機械性能基礎上乃由拉伸試驗來評價，如 1-6 所示，其呈現之應力-應變曲線便是材料受力後所展現的回饋特性。當應力較小時，金屬晶體僅以

進行原子間距微小變化，此時應力與應變將呈現線性之虎克關係，若此時將應力歸零，則材料形狀將完全回復，故稱為彈性變形。若持續將應力提高至特定閾值時，材料將不能在進行彈性變形，轉而由差排滑移來產生塑性變形，差排為晶體材料中的線缺陷，如圖 1-7 所示，在滑移面受到剪切應力的情況下，差排被迫在差排核附近進行斷鍵與構建，而斷鍵與構建的過程即帶動差排移動，形成晶體之塑性變形，塑性變形不會因為應力歸零而回復。材料在彈性變形與塑性變形之間的為材料之降伏強度(YS)，為工程材料開始塑性變形所需之應力強度。如圖 1-6 所示，材料降伏以後，隨著塑性變形的進行，材料強度隨之提高，此過程稱為加工硬化，接著達到最高之應力值，稱為抗拉強度(UTS)。達到抗拉強度後，試棒會因為為裂縫的形成開始頸縮，曲線上呈現加工軟化，直到材料完全斷裂。而材料從初始至斷裂過程中之伸長率稱為總延伸率(EL)，若計算至 UTS 稱為均勻延伸率，而 UTS 至斷裂部分則稱為後延伸率。

鋼鐵的降伏強度取決於其強化機制，其抗拉強度與均勻延伸率則取決於其加工硬化能力及塑性變形機制，而鋼鐵的後延伸率涉及裂紋的成長，故取決於其韌性。降伏強度、抗拉強度、延展性、韌性乃金屬材料最重要的四個基礎機械性能。

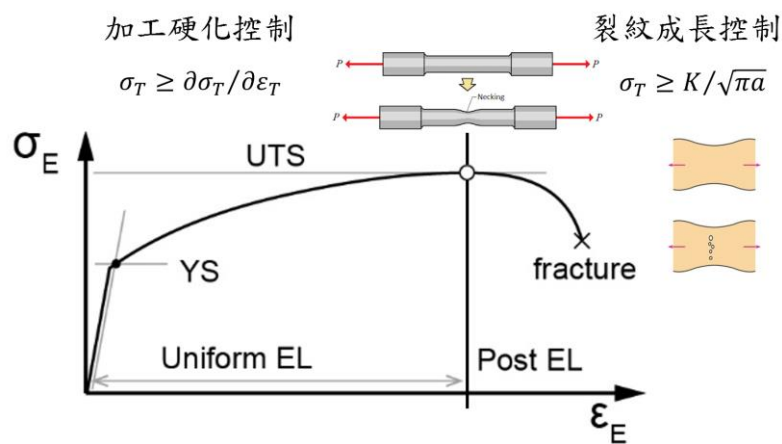


圖 1-6 鋼鐵材料之拉伸應力-應變曲線

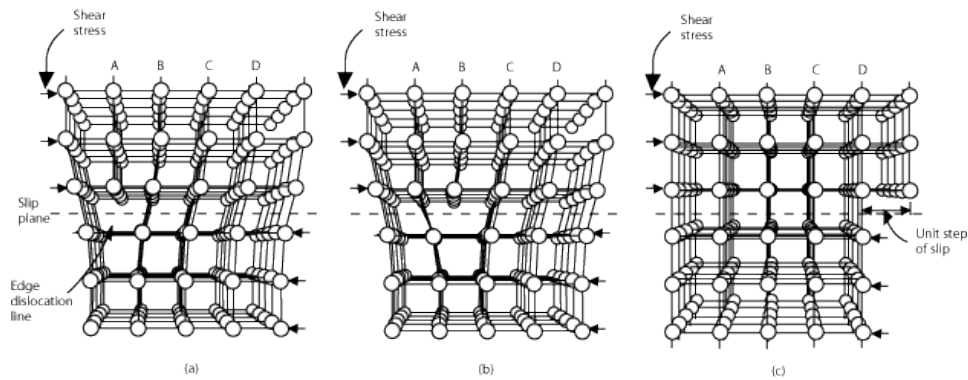


圖 1-7 晶體中差排滑移所產生的塑性變形

鋼鐵材料中主要強化機制分為：(a) 晶粒細化、(b) 固溶強化、(c) 差排強化、(d) 析出強化、(e) 複相強化以及(f) 雙晶強化。金屬晶體之變形以差排滑移為主，故其強化多仰賴差排與晶體內阻礙物的交互作用，也就是說，晶體的強化就是利用阻礙物阻擋差排的滑移，我們必須使用更大的應力，才能使差排移動，而這個更大的應力就是這些阻礙物造成的強化效果，並且呈現在拉伸實驗的降伏強度上。各種強化機至詳述如下(如圖 1-8 所示)：

- (a) 晶粒細化：一般差排以晶體最密面為滑移面進行滑移，然而晶界區分了兩個晶粒的方位，因此差排難以通過晶界，且堆積於晶界處，而差排間的交互作用產生差排滑移時的抗力，若要使差排可以持續滑移，就需要更大的應力。晶粒尺寸越小，差排堆積後產生的抗力越大，強化效果越好。
- (b) 固溶強化：固溶原子能夠在金屬晶體中造成晶格扭曲，產生差排滑移時的阻力。我們先前已經知道到碳原子在鐵的晶格中為插入型固溶原子，其強化效果顯著，另外氮亦為插入型固溶原子，並且具有顯著之固溶強化效應。元素週期表上許多的元素都可以置換基地中的鐵原子，例如：矽、鎳、鉻、鈦... 等等，此類型元素為置換型固溶原子，一般而言，置換型固溶原子之固溶強化效果較插入型固溶原子為弱，但仍然有效。
- (c) 加工硬化：金屬在塑性變形過程中涉及大量差排的移動，而在持續變形過程

中，差排的量也會越來越大，這樣的過程可以稱之為加工。當加工量(變形量)越大，而內部所相對應產生的差排數也隨之增加。差排越多，會彼此牽制，互相妨礙，使得差排的移動與產生會越來越困難，因而產生了強化材料的效果。這個效應稱為加工硬化或差排強化。若往復彎折鋼鐵曬衣架，彎越幾次後就會感覺越來越難彎，就是這個道理。

- (d) 析出強化：某些合金元素於高溫時，能固溶於鋼鐵之肥粒鐵或沃斯田鐵中，但是在較低溫時，可能與特定元素形成化合物且於基體析出。舉例來說，鈦、鈮、釩、鉬在低碳鋼中能夠固溶於沃斯田鐵相，但是在低溫肥粒鐵相中將與碳發生反應形成細小的碳化物。碳化物之鍵結具有較高的離子性，其強度極高，能夠有效阻礙晶粒內部的差排移動。
- (e) 複相強化：先前所述麻田散鐵之強度極高，不易變形。因此，我們可以透過特殊的熱處理於肥粒鐵中形成一定相比例的麻田散鐵，此為雙相結構，也稱為雙相鋼。由於麻田散鐵強度高且不易變形，所以能夠使整體材料的強度提高，此類強化效果更著重於雙相間的複合效應，而非只是差排的阻礙能力。
- (f) 雙晶強化：一般高角度晶界差排無法通過晶界，然而雙晶由於其整合性晶界關係，被阻礙的差排能夠在晶界分解，部分差排可以在雙晶晶界滑移，同時另一分解之部分差排能夠進入另一個晶粒滑移。近期發表已經發現納米雙晶能夠提高降伏強度，並且不會犧牲材料之延展性。。

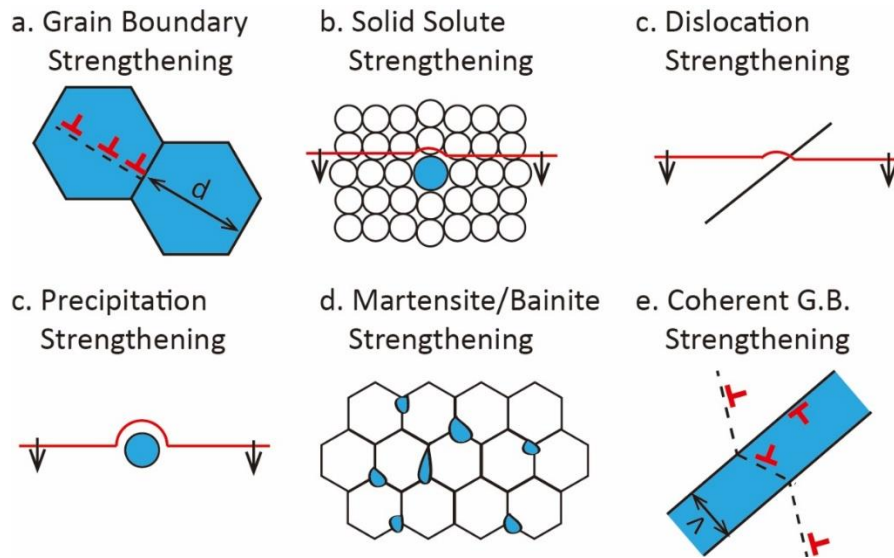


圖 1-8 鋼鐵材料中之六大強化機制

一般而言，鋼鐵中的肥粒鐵僅以差排滑移的方式來進行塑性變形，如圖 1-9 所示，沃斯田鐵具有多重塑性機制，沃斯田鐵是面心立方晶體，變形時，會根據疊差能以及結構穩定性不同，能夠以(a) 差排滑移、(b) 機械雙晶變形以及(c)  $\epsilon$  或  $\alpha'$  麻田散鐵相變態進行塑變。其中雙晶變形本身為剪切塑性變形，變形過程中除了涉及部分差排的滑移外，機械雙晶的形成能夠在塑性變形過程中切割晶粒來達到晶粒細化的效果，因此具有優異的加工硬化行為，產生高強度高延展性之效果，此行為稱為雙晶誘導塑性(twinning-induced plasticity, TWIP)，而此一類型之沃斯田鐵鋼則稱為 TWIP 鋼。另外，變形也能產生非擴散麻田散鐵相變態，麻田散鐵相變態本身能夠產生剪切塑性變形，而相變產生之麻田散鐵與差排作用能進一步提高加工硬化，因此對於材料的延展性有很大的幫助。此行為稱為相變誘導塑性(transformation-induced plasticity, TRIP)，而此類型之沃斯田鐵鋼則稱為 TRIP 鋼。

由圖 1-9 可知，若材料僅以差排滑移為主，不但抗拉強度較低，而且其延展性通常也受限制，TWIP 鋼與 TRIP 鋼則能夠因為不同的塑性機制，以及這些塑性機制與差排的交互作用，而達到高強度與高延展性之效果。



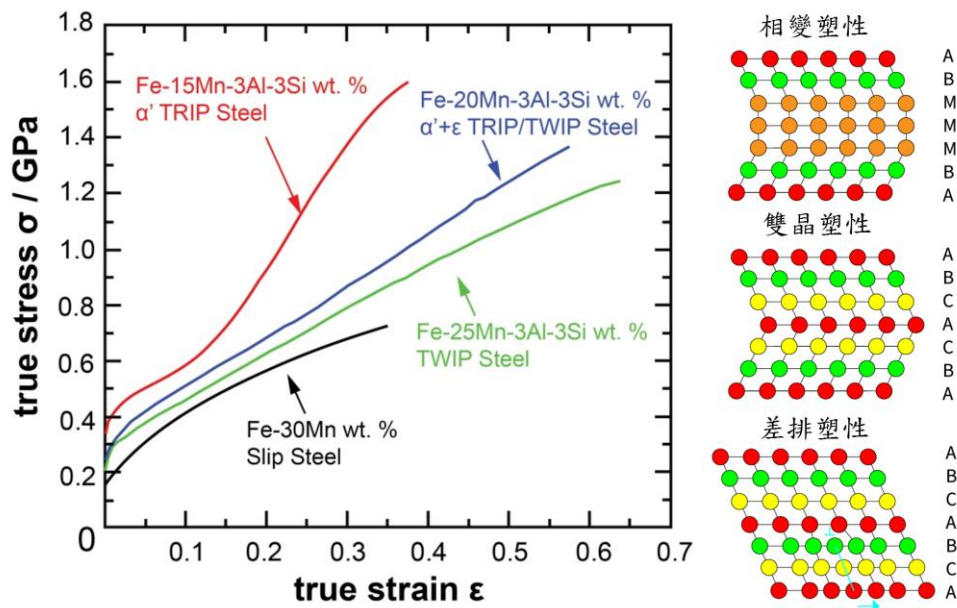


圖 1-9 沃斯田鐵系鋼鐵材料之變形機制與其應力-應變行為

### 碳鋼、合金鋼與工具鋼

碳低於 2wt%，僅含矽、錳、磷、硫的等元素的鐵被稱為碳鋼，因為煉製方法與製程關係，這些元素的混入難以避免。這五種元素對鋼的基本作用如下。碳和矽能增加鋼的強度、硬度，錳則是能夠讓鋼淬火後的韌性更好；硫和磷則是會使鋼變脆的有害元素。碳鋼依形狀分為條鋼、厚板、薄板、鋼管、線材等。作為機械構造用的碳鋼，不純物含量往往較一般碳鋼來得低。

在碳鋼加入其它合金元素稱之合金鋼，目的在改善耐熱性、耐磨耗性、抗拉強度、耐蝕性等。如鉻鋼、鉻-鉬鋼、鎳-C 鉻鋼、鎳-鉻-鉬鋼等，這些鋼材藉由淬火、回火處理提升強度與韌性，再經表面硬化如滲碳、滲氮等處理提升磨耗阻抗與疲勞強度。作為模具等需要高硬度的條件時，多數會加入鉻、鎢、鉬、鈮等元素，需要高彈性與疲勞強度如彈簧鋼，則會加入矽、錳、鉻、鈮、鎳等。工具鋼是為了做為切削工具，或者模具使用的原料鋼，有高碳工具鋼、合金工具鋼、高

速工具鋼等分類。

## 電磁鋼片

「通電生磁，磁變生電」一句可說明電和磁之間的緊密關聯。日常生活中有許多應用，藉由電磁轉換來達到目的。在這電能不可或缺的世代中，舉凡變壓器(電與磁的轉換)、馬達(電能轉機械能)與發電機(機械能轉電能)，皆利用電磁的緊密關係來轉換能量。

電磁鋼片，主要組成爲矽與鐵，又被稱爲「矽鋼片」，爲一軟磁材料，被廣泛利用於上述電機設備中的鐵芯。以馬達為例，其運作原理利用銅線圈通電產生磁場，內部鐵芯被磁化，又施以銅線圈交流電，線圈磁極隨時間變化，因而和鋼片間排斥產生機械能帶動馬達運轉。然而，在交流電中的鋼片由於電磁感應會產生渦電流，進而造成能量損失，該能量損失被稱爲「渦流損」。無矽的鋼片雖可進行電磁能量轉換，但其電阻較低而有較大的渦電流。根據電能計算公式，熱能損失爲  $P_{\text{損失}}=I^2R$ ， $I$  爲流經電流， $R$  爲電阻，在低電阻時渦流損大，不符合環保節能規範。根據電阻公式 ( $\rho$  爲電阻常數， $l$  爲長度)： $R = \rho \frac{l}{A}$ 。藉由添加矽(增加電阻係數  $\rho$ ) 或做成薄片(降低截面積  $A$ ) 堆疊來增加電阻，可使電流不易在鋼片上流動( $I = \frac{V}{R}$ )，減少渦流損而達到應用上的高工作效率。

圖 1-10 顯示，電磁鋼片概略分爲低碳電磁鋼片、無方向性電磁鋼片以及方向性電磁鋼片。前兩者與一般的冷軋鋼鐵產品類似，屬於較低階的產品。而方向性電磁鋼片，則是藉著控制鋼板晶體方位取向，獲得低鐵損值、高磁化率的電磁鋼片，目標降低電力輸配及使用時的耗損，方向性電磁鋼片是當代國家能源戰略之關鍵材料。

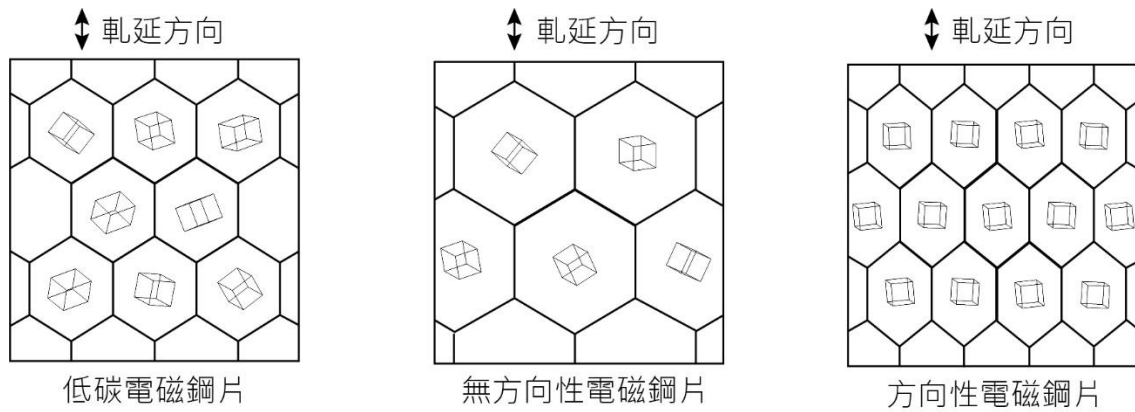


圖 1-10 電磁鋼片之種類及其集合組織

### 不鏽鋼

不鏽鋼之俗稱為白鐵，其中的鉻元素含量必須大於 12 wt.%。如圖 1-11 所示，鉻元素的最主要作用在於和大氣中的氧氣作用，會在鋼鐵表面形成奈米級的緻密透明的氧化層，此氧化層能夠阻隔材料內部受到進一步的氧化與腐蝕。若表面的氧化層受損，材料中的鉻和環境中的氧會自動修復保護膜，因此比油漆和鍍鋅有更好的防銹效果。

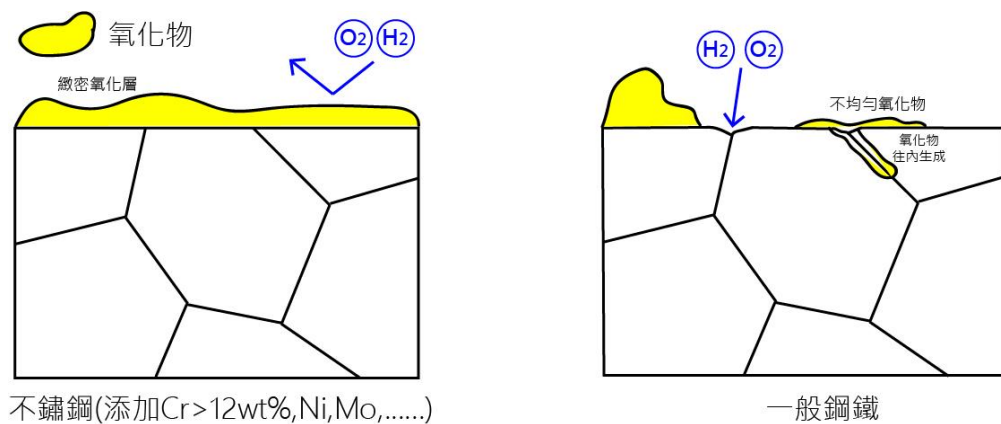


圖 1-11 不鏽鋼以緻密鉻氧化物保護表面之機制

不鏽鋼的種類相當多，因為除了元素添加的量不同，相結構對鋼材的影響也非常的大。常見分類為肥粒鐵系、沃斯田鐵系不鏽鋼和麻田散鐵系不鏽鋼，這些

不鏽鋼依照中國國家標準(CNS)、日本工業標準(JIS)及美國鋼鐵協會(AISI) 的規定以編號來分類。常聽到的 304、316 不鏽鋼是屬於 3 系列的沃斯田鐵系不鏽鋼，4 系列則含有肥粒鐵和麻田散鐵系的不鏽鋼，又如 304L 不鏽鋼中的 L 代表低的碳含量，是為了防止之前提及的粒界敏化腐蝕發生。

不鏽鋼被廣泛運用在家庭器具、刀具、建築飾板等民生用途與化學、食品、軍品工業等耐蝕用途上。由於不鏽鋼的防蝕性使其外觀優美，可利用在藝術品或是建築物表面，其氧化層的保護也可以杜絕細菌的孳生，可以運用在製作食品的設備和餐具。

### 1.3 非鐵金屬

非鐵金屬指的是鐵以外的金屬，包括鋁、鎂、鈦、銅、鋅等等，總稱產量雖然不及鐵(鐵每年生產量逾 13 億噸，非鐵金屬總計不超過 1 億噸)，非鐵金屬卻有鐵所沒有的特徵，一般而言單位重量價格較高，因此總產值差異不大。本節將從非鐵金屬代表鋁、鎂、鈦、銅、鋅、鉛、錫到貴金屬進行簡介。

#### 鋁及鋁合金

鋁儲藏量豐富，為地殼中含量第三多的元素，僅比氧與矽少，約佔地殼總重量的 7.45%，比鐵幾乎多了一倍，更比銅多了將近一千倍。鋁礬土礦石（含鋁矽酸鹽）為其主要來源，1855 巴黎萬國博覽會時鋁被稱作「從黏土得到的銀」，被當作有如寶石般貴重的金屬來展示。跟自古以來就被使用的銅與鋅比較起來，鋁在近百年才開始利用，與其提煉製程有關。現行的方法將鋁礬土壓碎之後加入氫氧化鈉加熱，熱與高壓幫助氫氧化鈉分解鋁礬土礦石，得到鋁酸鹽鈉溶液，經過煅燒後得到純氧化鋁(以上稱為 Bayer 製程)。純氧化鋁溶解在熔融的冰晶石(鈉鋁氟化物)當中，然後以電解方式將氧和鋁分開，在陰極得到還原的鋁(以上稱 Hall

製程)。因為鋁的還原需要用到電解，一噸的鋁需要 1.52 萬千瓦的電力，是銅的十倍以上。提煉鋁需要大量電力作為後盾。

鋁因為加工性優異，熔點低(660.3°C)，熔融時流動性好，廣泛被作為展伸材以及鑄造、壓鑄使用。因為其密度低(2.7 g/cm<sup>3</sup>)，近年於車輛構造與引擎等應用達到輕量化、省能源的目的而被大量推廣。以商業展伸材為例，其合金一般分類共八種，以 1000 開始到 8000 的四位數字表示，其中又分為熱處理及非熱處理型。1000 系是指純度 99.00%的鋁，導熱導電率高，抗蝕性能優良，成型性，可作為電導體材料。2000 系是添加了銅與鎂，最早開發以熱處理提高強度的鋁合金，杜拉鋁(duralumin)是其中的代表。3000 系是為了提高耐蝕性並同時保有強度，而添加了錳，成形性好尺寸穩定性佳，多用在鋁罐上，碳粉匣感光滾筒亦屬之。4000 系為 Al-Si 系耐磨材；5000 系為 Al-Mg，具有優異耐蝕性，用於鐵道車輛與船舶。6000 系為使用最廣的熱處理硬化型鋁合金，比如鋁門窗、自行車架與輪圈等皆為此系列合金所製。7000 系乃是有最高強度之熱處理型鋁合金，以往多用於航太用途。8000 系為上述以外的合金體系。

除了結構材料之外，鋁亦具優良電導與熱導性，廣泛於電纜、熱交換器、散熱片等用途，其它的應用還包括鋁箔、鋁質電解電容等。

## 鎂與鎂合金

鎂的比重 1.74，不僅是實用金屬中最低，而且具有優異之散熱性，耐振性及電磁波遮蔽性，以做為攜帶式電子產品外殼或汽車零件等結構用材料而備受矚目。鎂主要礦藏為碳酸鈣鎂礦 (如 dolomite, CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)，亦有從海水中提煉者(氯化鎂)，存量之豐富，僅次於矽、鋁、鐵 及鈣而列第五位，其在地殼之成分中約佔 1.24%。除了密度低之外，鎂的比剛性、比強度佳，在應用

上常加入鋁、鋅及錳等元素形成鎂合金，始能適合各種結構用途。

目前鎂合金產品其中絕大部分由所謂壓鑄(die cast)或射出(thixomolding)等鑄造法成形。鎂之結晶構造為軸比 1.623 之六方最密堆積結構，室溫成形性低。在 3C 產品急速朝輕薄短小發展的今日，薄板鍛造塑變成形之市場需求性日益增高，如何藉由組織控制(如晶粒細化)提升其加工性至為關鍵。此外，鎂合金耐熱性有限、耐蝕性不佳，其耐熱型合金之開發與表面改質均為進一步推廣需解決的重要課題。

### 鈦與鈦合金

鈦密度  $4.54\text{g/cm}^3$ ，遠高於鋁，但是強度卻是鋁的 6 倍。鈦與銅、鋁的合金，只有不鏽鋼 60% 的重量卻有兩倍的強度。鈦對海水的耐蝕性高、具有生物親和性，高溫強度佳且耐低溫，也因此鈦雖是二次大戰後才在工業上實用化的「新金屬」，但性能優越，現已為不可或缺的重要材料，用途與使用量急速成長，由早期的航太工業逐漸擴展至其他領域，諸如船艇、汽車、運動休閒器材及生醫器材。鈦的蘊藏量雖然比鐵與鋁少，但不遜於銅或鋅，由於尚未發展出連續精練的技術，單價偏高，年產量僅約 10 萬噸。鈦的主要提煉自金紅石(rutile)，使用 Kroll 法形成鈦鹽類後利用鎂還原成多孔性海綿鈦，須經真空熔煉後形成純鈦及鈦合金錠。

鈦金屬可分為純鈦、 $\alpha$  合金、 $\alpha+\beta$  合金及  $\beta$  合金四大類。純鈦在常溫為 HCP (hexagonal close-packed) 晶格結構( $\alpha$  相)，在  $885^\circ\text{C}$  左右變態成體心立方 BCC (body-centered cubic) 結構( $\beta$  相)，此溫度稱為  $\beta$  變態點。在純鈦中添加不同合金元素及不同添加量會改變  $\beta$  變態點位置，造成  $\alpha+\beta$  兩相區的出現。一般而言  $\alpha$  合金較輕、銲接性與抗潛變性優； $\beta$  合金密度較高，但具較佳加工性，可藉由熱處理大幅增加強度。

此外，鈦的氧化態\_二氧化鈦用途極廣，包括光觸媒、染料敏化太陽能電池電極等。二氧化鈦作為塗料原料，有分解有害化學物質、脫臭、抗菌，甚至藉由超親水性自我清潔的功能。

## 銅與銅合金

人類自古以來就利用銅，最早的銅製品甚至可以追溯到西元前 8800 年。為了易於鑄造，提高耐蝕性、強度、延展性等發展出的青銅(銅錫)、黃銅(銅鋅)、白銅(銅鎳)等合金即使到了現代也仍被廣泛使用著。全世界的產出國中智利就佔了 4 成的產量。

銅具高導熱性、高導電性的優點加上塑性加工性佳，因而在電線與展伸材即佔了用量的大部分。金屬中導電性最佳的是銀，但因為成本上的考量，電線多使用銅當導線，鋁電線、IC 金、鋁導線、通信電纜及光纖等需要使用銅導線的比例將越來越多。此外，銅合金鑄物有切削性佳，耐壓性、耐磨性好且機械強度高等特性，故常被使用於需要承受壓力的部件上。

常使用的合金系列中，鋁青銅合金耐蝕性高，特別對於海水有很好的防蝕效果，常被用在船舶推進器螺旋槳等零組件。鈹銅合金強度高，且有與純銅相近的導電度；鉻銅合金則具高溫耐磨耗性。黃銅機械性能和耐磨性能佳，多用於精密儀器、船舶零件、槍炮彈殼、硬幣與樂器等，其管件可用作建築物自來水管道、供熱、制冷管道等，以往為提升加工性添加約 2wt%鉛，近來提倡對環境及人體友善的「零鉛政策」，因此開發新配方予以取代。

## 鋅、錫、鉛

鋅、錫、鉛等金屬自古人類就開始使用。鋅有一半的用量做為防蝕的鍍膜使用，

亦即鍍鋅鋼板，在汽車、家電、建材用途甚廣，在建築上鍍鋅的鋼板被稱作鍍鋅波浪板(corrugated galvanized iron sheet)。為了增加橡膠對溫度變化的強度，並保持彈性所使用的加硫劑也使用了鋅。黃銅藉由鋅的添加比例可控制其強度、加工性等性能。近年來，半導體化合物氧化鋅很受到世人注目，氧化鋅薄膜被開發作為透明導電膜或是透明磁性體、太陽能電池等，以氧化鋅製作之 LED 發光二極體亦受到期待。

錫主要用於鍍線、鑄物、電子配件、軸承等等作為其合金用途而活躍著。ITO(氧化銦錫)被當作透明電極、液晶面板、平板電腦的面板等。有機錫有毒性，作為船舶箱網塗料可避免海中生物附著。

錫有  $\alpha$  錫(灰錫)、 $\beta$  錫(白錫)、 $\gamma$  錫三種。體心正方結構(body-centered tetragonal, BCT)  $\beta$  錫在 13.2°C 以下形成鑽石立方結晶(diamond cubic)、具非金屬性的灰錫，此相轉換導致脆化，稱為錫害(tin pest)。錫的熔點相當低(232°C)，廣被當作工藝品等的鑄造合金使用。

與錫形成合金，鉛常用來當作微電子或電器用品接點鍍料，而在歐盟組織宣布禁止在歐洲境內銷售之家電與消費性電子產品含有鉛、六價鉻、汞等有害元素的禁令(restriction of hazardous substances, RoHS)，以及規範汽車的回收利用的 ELV 法令之後，電子鍍料轉為以錫銀銅等新型合金作為替代。鉛另一重要用途則鉛蓄電池，廣被作為汽車電池、堆高機電池，無停電電源裝置等用途，亦因為現今無鉛化的趨勢，鉛蓄電池的利用逐漸減少，轉以鎳氫電池、鋰離子電池等來儲電。

## 貴金屬

一般以金、銀以及同屬白金族(platinum group metal)的鉑、鈱、銨、鈹、銕、銱等八種統稱為貴金屬。貴金屬的特徵是不易氧化、化學性質安定，因量少自古



以來就有回收利用的傳統，主要用途為飾品、牙科材料與觸媒等。

自 16 世紀迄今所開採的黃金總量約 5~6 萬噸，與現在金的蘊藏量約相等。從礦石生產的金被稱為新產金，2017 年的金的世界生產量約 3150 噸，回收金產量約為新產金 1/3。金主要作為飾品、但也有作為世界貨幣價值的特殊性。除了珠寶回收、銅、鋅、鉛的精煉副產物之外，從手機、電腦等電子廢棄產品回收之比例漸高，例如一噸手機約可得到數百克的金。

銀的使用除了作為飾品與銀器具之外，做為導電接點材料或合金添加元素，以及相紙感光材料硝酸銀與汞齊牙科填充材等，後兩者的使用已逐漸降低。

作為觸媒所使用的鉑(白金)，南非產出量佔世界近 80%，鉑有 70% 消耗是作為汽車用觸媒與電器、化工生產等工業的需求。使用了鉑、銨與鈀的觸媒能同時對一氧化碳(CO)、烴類(C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>)與氮氧化物(NO<sub>x</sub>)進行氧化還原處理，稱為三元觸媒。石油精製與硝酸製造時也會用到鉑觸媒。因其化學安定性，鉑作為腐蝕性強的藥品容器或是鋼鐵、半導體、玻璃等製造過程時熱電偶材料。

## 1.4 新機能金屬材料

近年來各式各樣具特殊機能的新型金屬材料被推出，於本節進行選擇做概要介紹。

### 形狀記憶合金 (shape memory alloy)

金屬加上荷重而變形，荷重去除後仍能回復原狀的被稱為彈性區域，超過彈性區域，一般會產生不可回復之塑性變形。然而經塑性變形之形狀記憶合金加熱到一定溫度可恢復其變形前原始形狀，達到形狀記憶的效果。當該類合金在高於相變

態溫度施以一應力產生有限度的塑性變形或非線性彈性變形後，可直接釋放應力使其恢復到變形前的原始形狀，稱之擬彈性或超彈性。具形狀記憶效應的合金系統相當多，鎳鈦為其代表。形狀記憶合金多使用在牙箍、飛機套筒與管件接頭、胸罩鋼絲、血管支架與致動器等應用，超彈性則可見於金屬眼鏡框。

### 高熵合金 (high entropy alloy)

傳統合金大都以 1 種金屬元素為主，再通過添加特定的少量合金元素來改進其性能，例如以鐵為主的鋼鐵材料，以鈦為主的鈦合金等約 30 種常用合金系統。根據傳統合金的設計經驗，合金元素種類過多會導致很多化合物尤其是脆性金屬間化合物的出現，進而導致合金性能的惡化。

國立清華大學葉均蔚教授率先跳出傳統合金的發展框架，提出了高熵合金的觀念，利用多主元元素的高熵效應來設計合金，因而高熵合金也稱多主元合金，此突破性的觀念大大擴展了可能的合金系統種類。高熵合金之定義須具有五個以上的主要元素，且每個主要元素之原子百分比應介於 5%-35%。在這樣的組成下因高熵效應，有利於各元素混合為固溶相，使合金組織由一個或多個簡單固溶體所組成，而非傳統觀念所預期的那樣存在許多金屬間化合物。高熵合金通過適當的配方設計，可獲得高強度、高硬度和耐腐蝕等各種特性，性能優異。

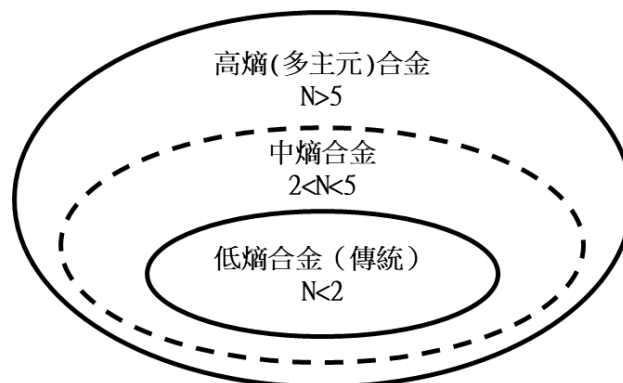


圖 1-12 以主元數劃分的合金世界

### 先進高強度鋼 (advanced high-strength steel, AHSS)

環保意識的抬頭，各國對於汽車碳排放量的規定逐年嚴苛，全球車廠以車體輕量化為努力的課題，藉此提升汽車的燃油效率且在不犧牲安全性的前提下，帶動過去幾十年來先進高強度鋼的開發。根據 Lucintel 市場調查的結果，先進高強度鋼比傳統鋼的重量少 15%，雖然價格高 35%，但相較於鋁合金和碳纖維仍有很好的價格優勢。

先進高強度鋼在製造過程中，透過控制材料的冷卻過程來獲得複雜的微結構，增強材料的強度和成形性，以第一代先進高強度鋼的雙相鋼為例，如圖 1-13 所示，在軟質的肥粒鐵基地上，散布著高硬度的麻田散鐵，結合了兩種軟硬的結構，讓雙相鋼具備優良的強度和延展性，而未來第三代高強度鋼朝更佳的強度和延展性發展，參照圖 1-14 強度-延展性關係圖。

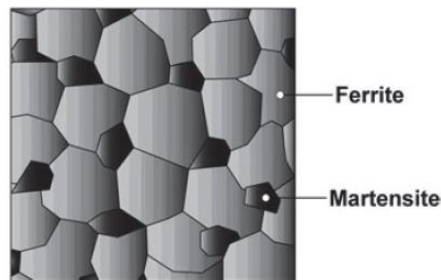


圖 1-13 雙相鋼微結構示意圖

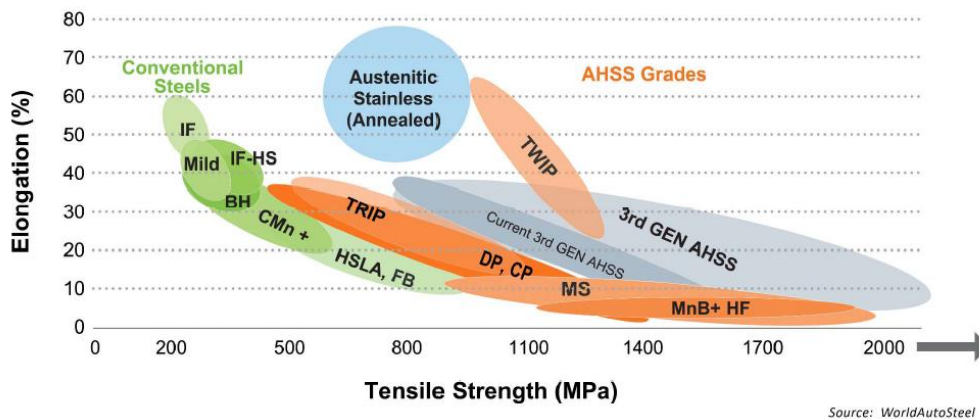


圖 1-14 鋼種強度-延展性關係圖（圖片參考來源:WorldAutoSteel）

### 超合金 (superalloy)

人們常以一金屬元素作為基底，並添加其他元素形成合金(Alloy)，以增強或改善其性質。超合金則是指在高溫工作環境下仍能維持其機械性質，且具抗高溫氧化與腐蝕能力的合金系統，常用於製作噴射引擎的渦輪葉片、或航太產業的結構材料等等。按照基底元素不同主要可分為三種超合金系統，鐵基(iron-based)、鈷基(cobalt-based)與鎳基超合金(nickel-based superalloy)，並添加少量的鉻、鉬、鈦、鋯等合金元素以改良各種性質。超合金中又以鎳基超合金的應用最為廣泛，由於鎳的高熔點以及鎳基超合金的特殊微結構，使其各項高溫機械性質表現最為突出。但隨著科技與產業發展，對於材料性質的要求也愈來愈高，因此也發展出以高熔點耐火元素為基底的耐火超合金(refractory superalloy)，以及高熵超合金(high entropy superalloy)，使超合金的應用更為廣泛。

### 金屬玻璃 (metallic glasses)

一般的固體材料都是由原子或分子相互堆疊排列組成，如圖 1-15 所示，依照其排列方式的不同可分為三類：分別為單晶(single crystal)、多晶(poly crystal)

與非晶(amorphous)。單晶材料原子排列最為整齊一致，結晶性非常高；多晶材料則可視為由許多稱為晶粒(grain)的細小單晶組成；非晶材料即為材料內部原子排列沒有結晶性。

一般的金屬是由無數原子相互鍵結堆疊而成的多晶材料；而玻璃則為以二氧化矽( $\text{SiO}_2$ )為主的分子堆疊而成的非晶材料。金屬玻璃的名稱由來，則是因為這種材料是由「金屬」原子組成但具有「玻璃」的非晶結構。

要製作金屬玻璃需要特殊製程，其中冷卻速率是一大關鍵，世界上第一塊金屬玻璃  $\text{Au}_{75}\text{Si}_{25}$  是在 1960 年由美國的 Duwez 團隊製作，以極高的冷卻速率 ( $10^5 \sim 10^6 \text{K/s}$ ) 冷卻熔融態的金屬，使原子來不及結晶而維持原本在液態時的無序排列。但要達到極高的冷卻速率即意味著材料的尺寸必須非常小，否則材料內部的原子還是會有足夠的時間與能量排列整齊。科學家以合金設計方式進行突破，許多不需要非常高凝固速率即可製備得金屬玻璃材料被開發出來，從而使材料尺寸提升並發展出塊狀的金屬玻璃(bulk metallic glasses, BMG)，將性質優良的金屬玻璃推向實際的應用端，例如用於製作高爾夫球桿、智慧型手機殼等等。

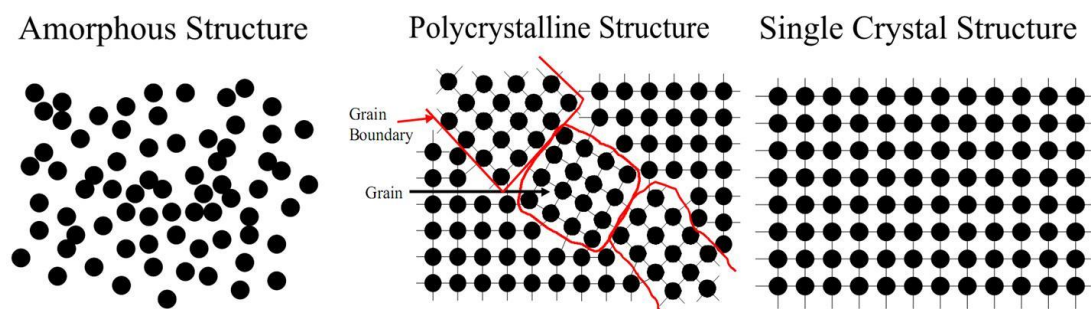


圖 1-15 晶體結構之三種形態

## 参考文献

1. よくわかる金属材料 (初歩の工学), 三木貴博監修, 技術評論社 (2010)
2. Structure and Properties of Engineering Alloys, William F. Smith, McGraw-Hill Book Company, NY (1981)
3. <https://www.kisspng.com/png-airbus-a380-engine-alliance-gp7000-jet-engine-roll-730278/>
4. <https://kknews.cc/zh-mo/tech/9v69ab.html>

# 陶瓷材料

## 簡介

從古至今，人類所使用的各項生活物品和高科技產品，大多採用固態物質來製作，而固態物質又分為哪幾種呢？基本上可分為陶瓷與玻璃、金屬、高分子、複合材料等四大類[1]。其中多數的陶瓷材料是由金屬元素與非金屬元素所結合而成的化合物，鍵結主要以離子鍵居多，其特點是非常硬，同時也是典型的電與熱的絕緣體，比金屬跟高分子更耐高溫與苛刻環境。在過去數千年的中華民族發展史中，「傳統陶瓷」即為重要的象徵之一。從黃帝、堯、舜至夏朝，是以彩陶來代表其發展(如仰韶文化)；秦始皇陵的兵馬俑是以陶土所加工燒結而得；漢朝時期，開始有較堅固的釉陶出現，漢字中也開始出現「瓷」字；唐代時，北方流行各種華麗彩釉，其中以唐三彩的成就最大；隨著窯燒技術不斷精進，高溫燒結的**瓷器**(1200°C~1400°C)已漸漸地取代低溫燒結的**陶器**(800°C~1100°C)；宋代出現五大名窯(鈞窯、汝窯、官窯、定窯、哥窯)，此時為中國瓷器發展史的高峰；元朝之後，景德鎮青花瓷的出現，遂成為後世瓷器的主角。總體來說，傳統陶瓷主要的原始材料為「黏土(Clay)」(註：一般由多種水合矽酸鹽和一定含量的氧化鋁所組成)，其產品為陶器、瓷器、磚塊、瓦片或現代的瓷

磚等等。



仰韶文化 - 彩陶



漢代 黑釉瓷盤口壺



唐代 唐三彩



宋代 青白瓷



元代 青花瓷  
魚藻蓮花紋罐

圖一 中國歷代的主要陶瓷產品。

現代的工程陶瓷指的是精密陶瓷材料，又稱先進陶瓷，應用廣泛，與人類的日常生活息息相關。它們是用純度高且化學組成確定的陶瓷原料，在高度製程與材料微結構控制下所做成的陶瓷產品，主要包括矽酸鹽、氧化物、碳化物、氮化物或人造鑽石等。這些精密陶瓷依照機械性能與功能性之應用分為結構陶瓷與功能陶瓷，前者由我們大家熟知的日常用陶瓷、建築陶瓷，乃至製造工業用的切削刀具、車輛引



擎、航太機具等等考慮材料機械力學性質的陶瓷；後者則是指在電子、光電、通訊、生醫、能源和環保工程等領域中利用電、熱、光、磁等性質所用的陶瓷材料。

玻璃亦屬於陶瓷材料的一類，包括如熟悉的玻璃容器和玻璃窗戶都是典型的應用；玻璃與陶瓷最大的差別在於它們是沒有特定晶體結構的材料，通常在它們的組成中尚包括其它矽酸鹽等重要成分，如氧化鈣、氧化鈉、氧化鉀及氧化鋁等。常見的玻璃材料含有 70% 氧化鋁、氧化鈉及氧化鈣。這些玻璃材料的兩個主要價值是其透光性和容易製造，已廣泛地應用於建築物中的透光玻璃窗，譬如玻璃帷幕大樓所見之外牆。隨著科技快速進步，玻璃產品的種類也五花八門，像是強化玻璃、智能變色玻璃、自潔玻璃、鉛玻璃(防止 X 光或放射線外洩)、和玻璃磚等。美國康寧公司於 2010 年發表了手機螢幕用的大金剛玻璃(Gorilla Glass)，更於 2016 年時其宣稱之第五代大猩猩玻璃，可在一米六高度跌落測試中保有超過 80% 的完好率。



圖二 (左) 玻璃帷幕大樓之外牆、(中) 波音 787 上的智能變色玻璃窗、(右) 手機螢幕用之大金剛玻璃。

## 光學陶瓷

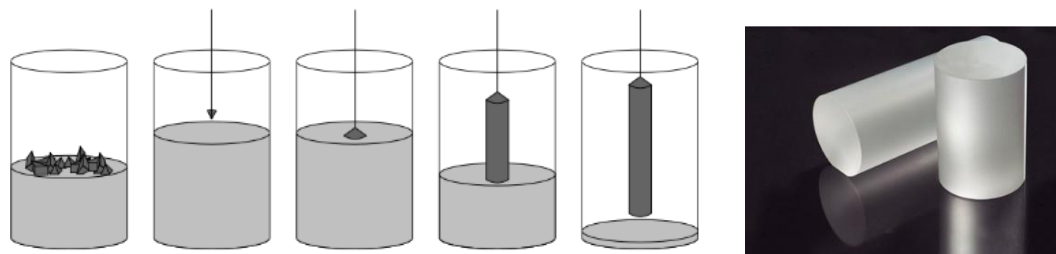
現代人常用的智慧型手機，是由許多高科技的材料所組成，包括玻璃屏幕、金屬背殼、高分子螢幕保護貼等，但你們是否知道智慧手機中，精密陶瓷材料部件仍舊扮演著重要的角色。譬如 iPhone 鏡頭上的藍寶石玻璃鏡片、iPhone 的指紋辨識模塊蓋板和 Apple Watch 的螢幕保護玻璃等，皆來自於相當耐刮劃的藍寶石(即添加氧化鈦與氧化鐵的氧化鋁材料)。這種可以透過可見光的陶瓷材料通稱為光學陶瓷，這些光學陶瓷大多經由單晶製程後加以切削琢磨等加工程序所製作。



圖三 (左上) iPhone 的鏡頭、(左下) iPhone 的指紋辨識模塊蓋板、  
(右) Apple Watch。

陶瓷單晶是指一塊材料內部的晶體結構是連續有序的，不包含其他缺陷或雜質。反之，一般材料內部的微結構是由許多不同晶體方

向的晶粒(多晶材料)所組成，常常也含有不同的成份或是缺陷。有一定大小的陶瓷單晶在自然界中極為罕見，而且在實驗室生產也不容易，製造成本高，所以人造陶瓷單晶往往用於高階產品的重要元件，如前所述的智慧手機手錶及平板電腦、相機等產品。最常見陶瓷單晶製程為柴式拉晶法(Czochralski process)，方法是將原料加熱至熔點後熔化成熔湯，接著用單晶晶體接觸熔湯表面，一邊讓熔湯凝固，一邊將單晶晶種往上直拉，仔細地控制製程參數，即可製得商用的陶瓷單晶。另外還有區熔法 (Floating zone technique)、布里奇曼-史托巴格法 (Bridgman-Stockbarger technique)與微下拉法 (Micro-pulling-down) 都可以製作出品質優異的陶瓷單晶。

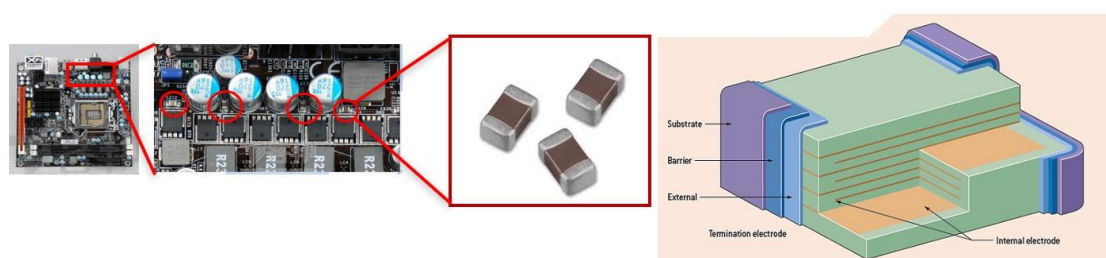


圖四 (左) 柴氏拉晶法的簡單示意圖[2] (右)藍寶石單晶之原貌。

### 電子陶瓷

智慧手機讓人與人之間進行通信、溝通更加方便，這主要得力於手機內部複雜的電子電路結構，而多層陶瓷電容器(Multi-layer ceramic capacitors, MLCC)是構成這些電子設備中重要元件之一，也屬

於電子陶瓷的一員。現今元件製程技術相當成熟，MLCC 電容已經具備高性能水準，於電腦中的主機板與顯示卡都很常見到 MLCC 的蹤跡。其他尚有許多電子陶瓷在我們的日常生活中(於下表簡略概述)，這都是因為陶瓷材料能夠耐高溫並容易調控其物理性質，才能夠融入電子電力、通訊、機械、能源傳輸等系統之中。



圖五 電腦主機板上的多層陶瓷電容器。

表一 電子陶瓷的簡略概述

<b>絕緣陶瓷</b>	這可以說是電子陶瓷最早發展的一支，在電路中作為絕緣之用。應用於高壓電塔、積體電路的基板等。
<b>介電陶瓷</b>	介電陶瓷是電子陶瓷中產量最大的一支，主要用在製作電容器。其介電性可應用於高頻通訊、動態隨機記憶體等。
<b>半導體陶瓷</b>	通常陶瓷是絕緣體，但經過處理可具有半導電性質，半導體陶瓷有許多用途，如變阻器、陶瓷暖爐、濕度感測器等。
<b>壓電陶瓷</b>	具有機電轉換的特性，利用它所製成的產品種類相當多，如打火機，瓦斯爐點火器，揚聲器，超音波震盪器，超音波馬達等。
<b>磁性陶瓷</b>	具有磁性的陶瓷。陶瓷所具有的磁性強度是別的材料所難以比擬的，應用在磁性記憶材料（如軟硬碟或磁帶上的塗膜），各種微波元件，與揚聲器、馬達等。
<b>焦電陶瓷</b>	利用陶瓷的焦電特性，可以製成紅外線偵測器，用以高溫計、輻射計、警報系統、與熱影像等用途上。
<b>超導陶瓷</b>	所謂超導現象，是指在某一臨界溫度下物體電阻為零的現象。利用超導現象可以用來作為電力輸送與超導磁鐵之用。
<b>熱電陶瓷</b>	熱電材料在溫差發電及熱電致冷方面都具有廣泛的應用，而陶瓷的熱電材料相當適合於高溫 (>700°C) 環境中使用。

## 半導體陶瓷

半導體陶瓷的應用亦相當廣泛，相當值得大家去深入了解。從上世紀 1950 年代以來，科學家發現本來是絕緣體的金屬氧化物陶瓷，如鈦酸鋇、二氧化鈦、氧化鋅等，只要摻雜微量的其他金屬氧化物，它們就會變得有導電能力，其電阻介於絕緣體和金屬之間，所以稱之為半導體陶瓷。各種半導體陶瓷的電阻會分別隨著環境的溫度、濕度、氣氛、光線強弱和施加電壓等的變化，其導電性質可改變幾十到幾百萬倍，如下圖所示，這些陶瓷可以應用於製造各式各樣的電子元件。

光敏三極管



熱敏電阻器



汽車用氣敏元件



濕敏電容器



- ✓ **熱敏陶瓷**：電阻隨溫度而變
- ✓ 材料:氧化鈷、鈦酸鋇、氧化釩等
- ✓ 環境控溫的應用：冷氣機、電冰箱、電熱水器、吹風機



- ✓ **氣敏陶瓷**：電阻隨氣體濃度而變
- ✓ 材料:氧化鋅、氧化錫、氧化鉛等
- ✓ 危險氣體的警示：瓦斯警報器、酒精檢測器



### 半導體陶瓷

- ✓ **光敏陶瓷**：電阻隨光照而變
- ✓ 材料:砷化鎵、硫化鎘、鍺酸鋇等
- ✓ 光敏元件：自動亮燈的照明系統、照相機自動曝光裝置、小夜燈



- ✓ **濕敏陶瓷**：電阻隨空氣濕度而變
- ✓ 材料:氧化鈦或氧化釩等系列
- ✓ 濕度量測與控制：乾衣機、電子防潮箱、溫室濕度控制



圖六 半導體陶瓷於人類日常生活中的各項應用。

### 陶瓷製程概述

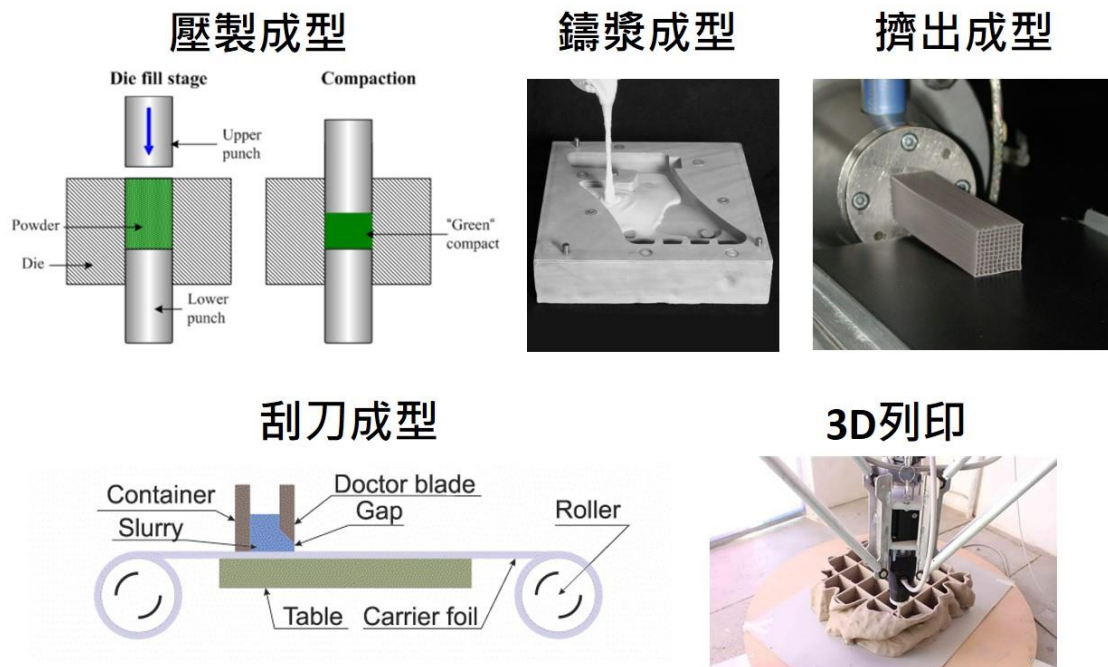
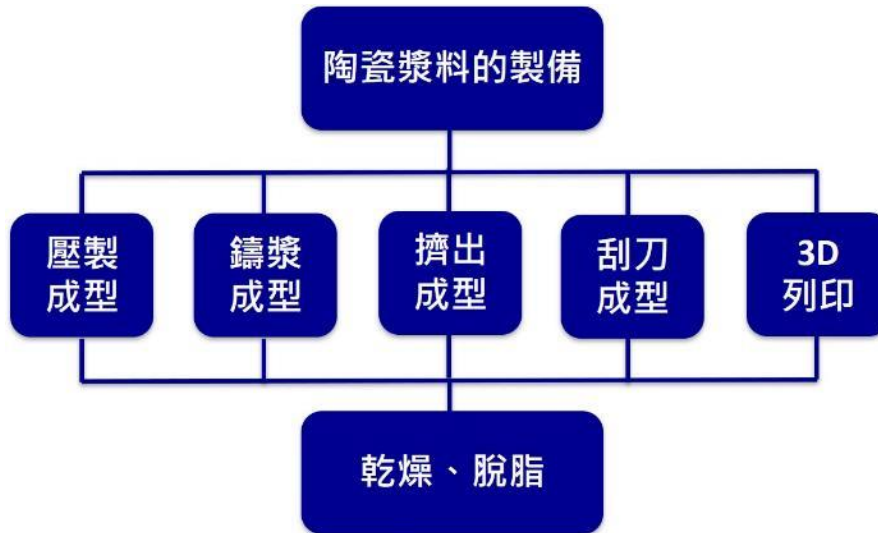
上述傳統陶瓷、電子陶瓷與半導體陶瓷已是現今人類生活不可或缺的產品，這些材料與其器件的製造、組裝過程已相當成熟。雖然傳統陶瓷製程倚賴於陶瓷原料的來源與燒窯師傅的經驗，精密陶瓷製程有一套科學化的製作控制方法，但仔細地比較後，其實古今陶瓷製程卻有著異曲同工之妙，如圖七所示，這兩者都是透過原料→成型→燒結→成品的四個步驟。對精密陶瓷來說，首先必須選擇高純度的原料來進行混合，混合攪拌的過程中需加入水或其他溶劑(如乙醇)，同時也需加入少量的分散劑或黏結劑來幫助下一個成型的步

驟。



圖七 古今陶瓷製作過程的四個基本步驟。

第二個步驟為成型，這是指將混合好的材料（包括泥漿或是黏土）製成各種形狀。陶瓷的成型方式與主要的陶瓷產品對應如下：(1) 壓製成型多數用來製作各類圓片、(2) 鑄漿成型可用於製作花瓶或瓷碗、(3) 擠出成型可製作蜂窩陶瓷、(4) 刮刀成型可製作電容器用陶瓷片、(5) 3D 列印可製作複雜形狀陶瓷部件。由此一步驟程序所得到的成型品被稱為陶瓷生胚或陶瓷胚體，其當中所含的溶劑和有機添加劑如黏結劑和塑化劑等，仍需在後面的乾燥和燒結之燒結步驟中移除。

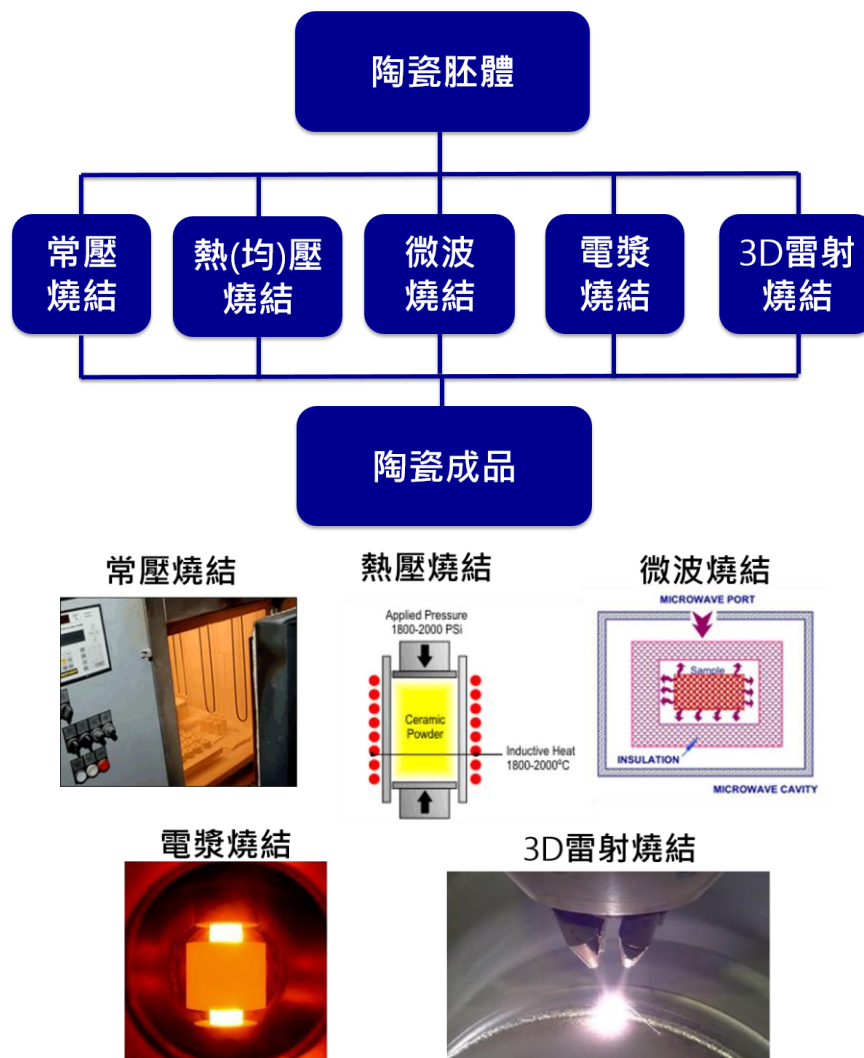


圖八 陶瓷材料製作過程中的主要成型步驟，包括壓製成型[3]、鑄漿成型、擠出成型[4]、刮刀成型[5]與 3D 列印[6]。

第三個步驟為燒結，即將乾燥後的陶瓷胚體，將它在高溫爐中加熱烘烤，這時材料體積會收縮，材料強度大幅增加，整體變得更加緻密。陶瓷幾種常見的高溫燒結方式如圖九所示，大多數的傳統陶瓷、



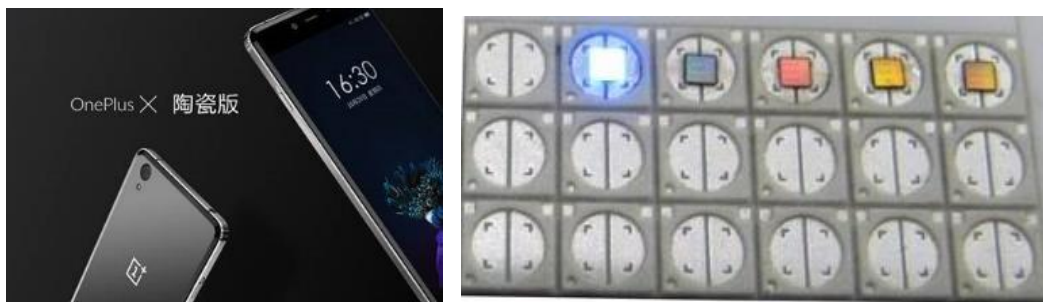
結構陶瓷、功能陶瓷的胚體會採用常壓燒結，即置放於空氣條件下高溫加熱，即可獲得陶瓷成品。但是一些高性能的陶瓷成品不容易使用常壓燒結成功製作，所以又陸續出現一些其他高效率的加熱燒結方法，例如熱(均)壓燒結法可以製作高強度的氮化物陶瓷、微波燒結法可以製作高純度氧化物陶瓷、電漿燒結法可以製作人工鑽石塊體、以及正處於開發階段的 3D 雷射燒結法等。



圖九 陶瓷材料製作過程中的主要燒結步驟，包括常壓燒結[7]、熱壓燒結[8]、微波燒結[9]、電漿燒結、3D 雷射燒結[10]等技術。

## 結構陶瓷

現今陶瓷粉體製程已經相當成熟，過去幾十年所陸續開發的結構用陶瓷材料已與人們的日常生活密不可分，常見的結構陶瓷材料包括氧化鋁、氧化鋯、碳化矽、氮化矽等，它們有「結構陶瓷四大金剛」的美譽，更詳細的資料可以參考《科學發展》雜誌中「生活化的結構陶瓷」一文[11]。近幾年來，隨著通訊產業與光電產業的快速發展，這些結構陶瓷材料又有令人耳目一新的創新應用。譬如氧化鋯已準備應用於新一代的 5G 手機背殼，這是因為氧化鋯陶瓷材料具有無信號屏蔽、硬度高、接近金屬材料優異散熱性等特點；此外，現今小面積、高功率的電子產品亟需解決散熱的問題，陶瓷散熱基板將會是新電子產品的重要部件，例如氮化鋁基板可應用於 LED 元件中，新開發的氮化矽陶瓷薄板可應用於高功率的電能輸出設備中。

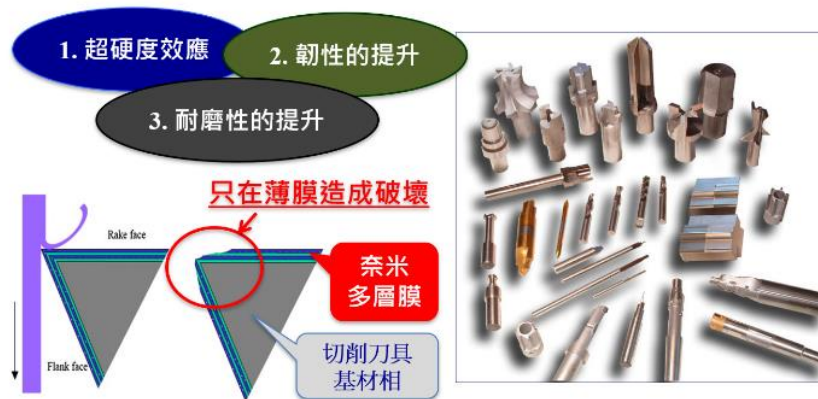


圖十 (左) 氧化鋯陶瓷材料所製作的 5G 智慧型手機背殼[12]、(右)

陶瓷基板上的 LED 模組[13]。

### 陶瓷膜材料

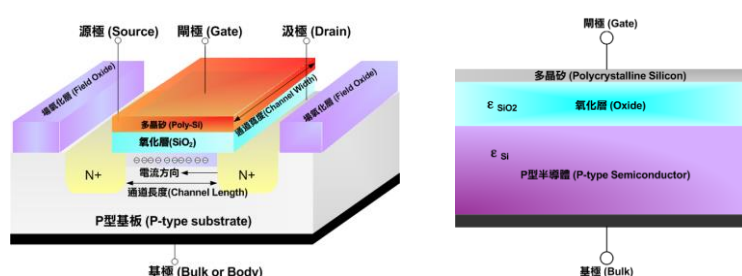
由於許多陶瓷材料同時具有各種優良的光、電、熱、磁的特性，若把這些陶瓷材料以鍍膜的形式依附在其他固體材料的表面，就能發揮更多種新奇的功能。日常生活中常見的金色餐具，大部分是藉由鍍膜技術在其表面成長氮化鈦或氮化鋯等陶瓷硬膜，這種技術更應用於切削刀具上，可以降低刀具的表面磨損，延長使用壽命。另外日本新幹線列車上亦使用鑽石膜作為一種很有效的耐磨耗鍍層。



圖十一 (左) 陶瓷硬膜的結構示意圖、(右) 披覆陶瓷硬膜的工具。

目前實驗室與工業已採用電漿離子鍍膜或化學氣相沉積等技術，來製作各種型態的陶瓷膜，而這些化學成膜機制相當複雜。將這兩種技術結合在一起，即為電漿增強化學氣相沉積法，其已廣泛地應用於半導體製造中。例如手機或電子產品中的中央處理器(Central

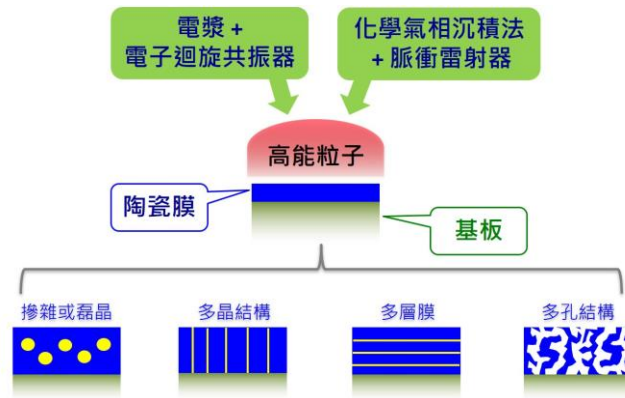
Processing Unit) 中含有數以萬計的金屬氧化物半導體場效電晶體 (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor, MOSFET)，其中位於閘極之下的氧化層主要由二氧化矽所組成。隨著半導體製程技術與元件性能不斷地躍進，MOSFET 的尺寸越縮越小，新的製程也可以使用氮化矽作為氧化層之用。



圖十二 (左) 一個 N 型 MOSFET 的立體截面圖、(右) 金屬-氧化層-半導體結構[14]。

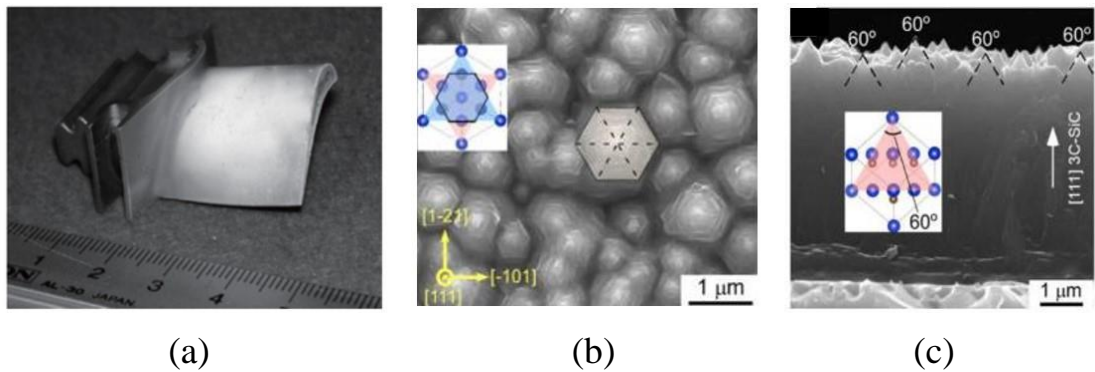
一般來說，應用於微型器件或小尺寸樣品上的陶瓷薄膜相當多元，包括含量子點或磊晶(以單一晶體結構堆疊)結構的單層膜、多層膜和多孔膜等。對於大尺寸器件的鍍膜方案，一般的電漿增強化學氣相沉積法難以滿足需求。近年來，科學家開發了脈衝雷射輔助化學氣相沉積法，可以提高原料的揮發速度，同時陶瓷膜的化學成分與靶材幾乎一樣；另一方面，日本成功開發出電子迴旋共振器(Electron cyclotron resonator)，得以產生高密度的電漿，大幅提高鍍膜速度。目前這兩種新技術相當適合用於製作高品質、高性能的半導體或能源用陶瓷厚

膜。



圖十二 陶瓷膜的製造方法與常見的陶瓷膜顯微結構。

這些高品質陶瓷厚膜製作技術，有著廣泛的應用前景與創新價值。例如鎳基超合金是目前發動機內應用最為廣泛的耐高溫材料，當在這金屬材料沉積上氧化鋯陶瓷厚膜之後，更可以增加此航空機件的耐腐蝕性、抗氧化性與抗熱震性；此外，已成功開發的碳化矽陶瓷厚膜被認為是次世代功率半導體(Power semiconductor)的基板材料，在高電壓、大電流的操作條件下不會損壞。目前的矽(Si)材料已經接近其理論上的性能極限，繼續採用矽材料難以突破當前晶片製造業的發展瓶頸，功能陶瓷及玻璃材料的發展，是半導體技術進一步提升的關鍵。另一方面，數十年來科學家們所熱衷追求的核融合能量，仍舊需要克服許多嚴苛的工程挑戰，才有辦法建造出此革命性的新型發電廠。在這些挑戰中，核融合反應爐的壁材需具備耐高溫且抵抗輻射損傷等特性，碳化矽陶瓷厚膜將再度成為主要候選材料之一。



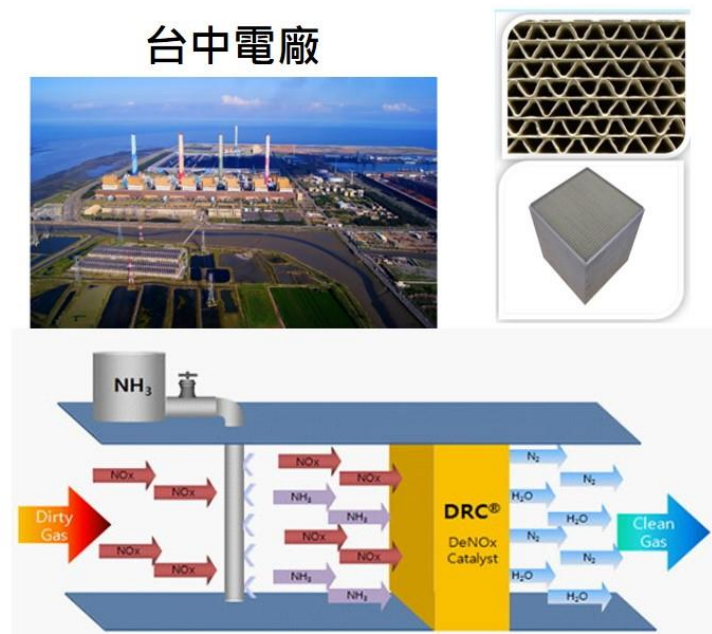
圖十三 (a) 披覆氧化鋯膜的渦輪轉子葉片[15]、碳化矽陶瓷厚膜的(b)俯視圖與(c)剖面圖[16]。

### 蜂窩陶瓷

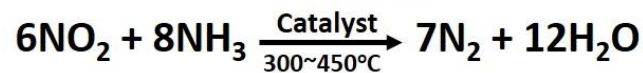
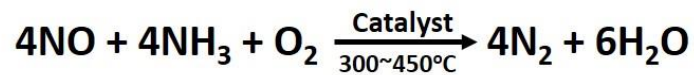
綜上所述，陶瓷材料已經以各種不同的形式使用於生活用品、機械部件、電子電力元件、通訊元件之中，大幅改善了人類的生活；但是，我們是否應該反思，當我們在製造或使用這些耗電的高科技產品時，這些電能究竟從哪裡來的呢？

根據民國 106 年的台灣電力公司所公布的歷年裝置容量結構報告中得知[17]，台灣的主要能源結構為火力發電(70.1%)、核能發電(12.3%)、再生能源(11.4%)等。採用煤作為燃料的燃煤火力發電廠提供了基載電源，雖然燃料成本低，但是空氣污染較嚴重，因此燃煤電廠採用選擇性催化還原法控制氮氧化物( $\text{NO}_x$ )等有害氣體的汙染，而這關鍵的脫硝裝置即是由陶瓷材料所組成。當中最重要催化劑是採

用氧化鈦、氧化鎢與氧化鈳等陶瓷顆粒，並用特殊的方法使其披覆在多孔性蜂窩陶瓷上頭，同時蜂窩陶瓷也是由前述陶瓷粉體製程的擠出成型法配合常壓燒結方法所製作。



**反應原理:**



圖十四 燃煤火力發電廠所使用的蜂窩陶瓷，在蜂窩陶瓷上所披覆的陶瓷催化劑能夠將有害的氮氧化物還原為氮氣[18]。

### 能源陶瓷

採用天然氣(主要成分為甲烷)為燃料的火力發電廠提供了中載電源，雖然燃氣發電成本比燃煤發電來得高，但空氣汙染程度明顯下

降。另一種以高溫型燃料電池為基礎的分散式發電(Distributed Generation)設備，即採用甲烷與水蒸氣為燃料，通入溫度超過 800°C 的燃料電池反應腔中會產生大量氫氣，這種反應過程稱之為水蒸氣重整 ( $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$ )，接著這些氫氣直接在燃料電池內部與氧離子結合來產生電能( $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^-$ )。在這燃料電池產生電流的過程中，氧化鋯或氧化鋇等陶瓷電解質材料扮演了關鍵性的角色，它們在高溫環境下是一種優良的氧離子導體，用在燃燒室器壁上提高氫氣反應效率。

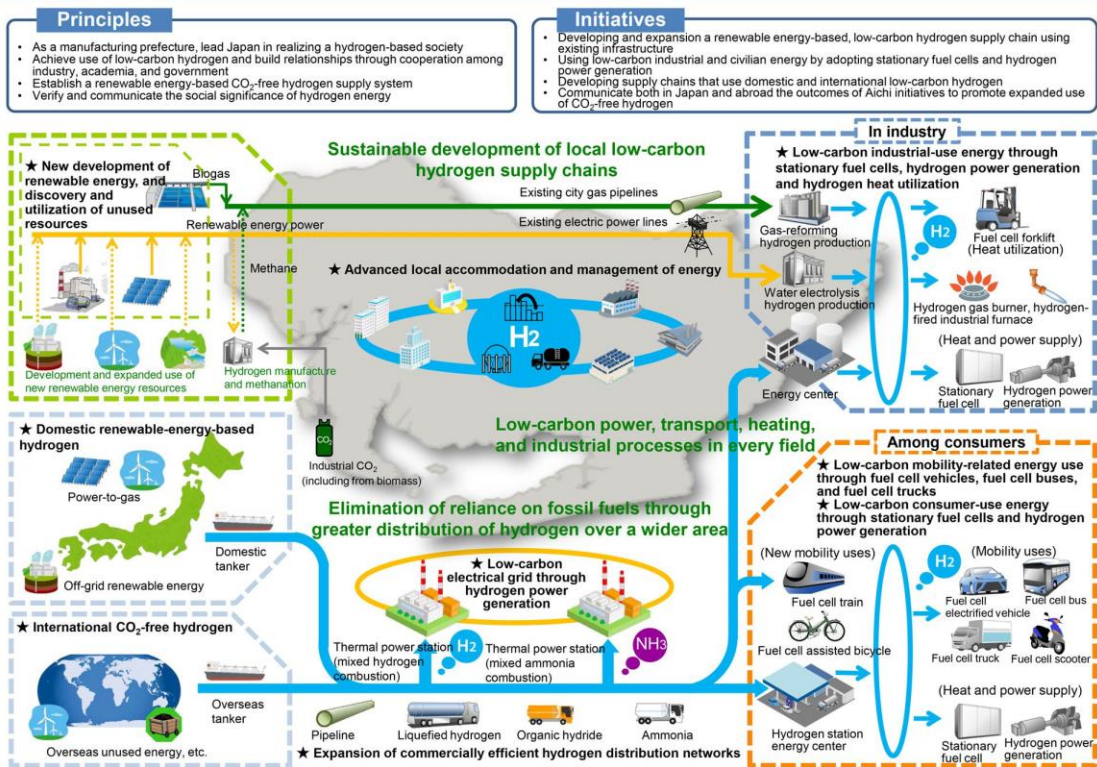
到目前為止，我們所提及的陶瓷材料幾乎只具備單一功能，使其個別用於機械、電子、通訊、催化等用途。若需要一種雙功能陶瓷材料，可透過陶瓷粉體製程製作複合材料來實現，使產品的功能更為提升。但是不同物質難以達到原子級的分布。因此科學家們也正在思索並開發高性能的單相陶瓷材料，並使其能同時擁有兩種以上的功能。在現今高階陶瓷鍍膜技術的輔助下，具有複雜結構的鈣鈦礦氧化物陶瓷材料或能達到要求。前文所述之陶瓷材料幾乎是由一種陽離子與一種陰離子所組成，但具有多功能性的複雜結構氧化物陶瓷則是由兩種以上陽離子與一種陰離子所組成，例如  $\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Cr}_{0.97}\text{V}_{0.03}\text{O}_3$  或  $\text{La}_{0.5}\text{Sr}_{0.5}\text{MnO}_{3.6}$  能同時擁有導電性能與催化活性； $\text{Gd}_2(\text{Ti}_{1-x}\text{Mo}_x)_2\text{O}_7$  是優良的電子與離子導體，並有優異的抗硫中毒性能。雖然目前這些新



材料大多尚處於研發階段，但由它們所組成的固態氧化物燃料電池之能源轉換效率超過 70% (一般發電廠或車用內燃機的能源轉換效率小於 40%)，並且較不容易被燃料中的硫化物或碳等雜質所侵蝕，非常適合用於高能效又環保的新能源裝置中。

日本政府與產業於 2015 年即制定多項大型計畫以建構一個低污染的氫能社會，目前已成功開發出「固態氧化物電解電池」與「燃料電池結合微型渦輪轉子的發電機」；此外，太陽能發電廠與風力發電機所提供的電力來源不穩定，所以數十年後核融合發電廠是否適合進行商業運轉，並取代部分的再生能源發電廠，亦備受矚目。但總體來說，隨著人們對於「能源-資源-環保」等社會、民生議題的關注程度逐漸發酵，相信未來將會有更多新功能的陶瓷材料問世，並引領一波又一波的能源系統革新。

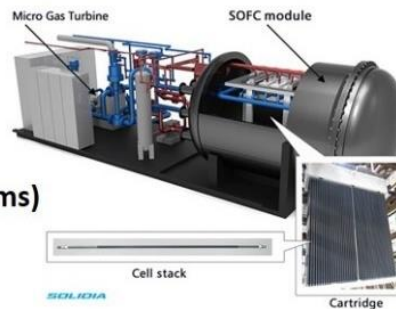
# Aichi Low-carbon Hydrogen Supply Chain 2030 Vision



固態氧化物電解電池 (Toshiba)



固態氧化物燃料電池與微型渦輪轉子的混合系統 (Mitsubishi Hitachi Power Systems)



圖十五 日本 Toyota 公司對於氫能產業供應鏈的預測圖[19]。在這個氫能社會的架構下，Toshiba 已經發展出固態氧化物電解電池來產氫[20]，Mitsubishi Hitachi Power System 也利用氫能，

成功開發出一種結合燃料電池與微型渦輪轉子的分散式發電裝置[21]。

### 未來展望

人類從農業社會開始，以陶瓷為基礎的生活用品和陶藝品即在人民經濟與國際貿易受到重視，這些陶瓷成品的良窳與陶瓷製造過程有著密不可分的關係，例如古代著名的古窯口幾乎依山傍水而建，這即保證了穩定的窯燒品質與安全的運輸過程。在 17-18 世紀的工業革命後，由初期的蒸汽機發展到現代的內燃機，而將地球資源轉化為可用能源，使得人類社會發生了巨大的變革。但是化學技術的進步亦造成環境破壞的問題，致使科學界也在摸索新方向，來與大自然取得平衡，這些都是當前我們所面臨的能源與環境方面的重大課題。

近幾十年來材料科學與工程學快速發展，但現今材料製程仍有模糊不清的地帶，造成資源與能源的耗損，尚需要新一代的材料分析技術來釐清問題點，同時也須結合資訊工程學領域中的大數據分析或機械學習法，來繼續改良並優化材料製程方法。回歸到材料本質來看，陶瓷是一種內在強韌、外在環保的材料，既能融入現今以燃燒科技為主體的能源系統，又能做為未來綠色能源系統中的主軸材料，也恰好呼應了世界第一個職業工程師協會(註:西元 1818 年於英國創立)對工

程學的定義-「引導大自然的龐大能源為人類所用而帶給人類福祉的藝術」。在現今台灣各項大型工程的推動下，陶瓷工程學主要能橫跨應用數學、基礎物理與化學、能源工程、電子工程、地球工程、資訊工程等，這將會是一門值得大家去探索與挑戰的領域。

#### 參考文獻

- [1] U.S. Department of Energy, Pacific Northwest National Laboratory, Materials Science and Technology Teachers Handbook, vol 2, pp.19-20, 2008.
- [2] <https://zh.wikipedia.org/wiki/柴可拉斯基法>
- [3] [http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=methods\\_of\\_shape\\_forming\\_ceramic\\_powers](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=methods_of_shape_forming_ceramic_powers)
- [4] [https://www.ikts.fraunhofer.de/en/departments/structural\\_ceramics/processes\\_and\\_components/shaping/extrusion.html](https://www.ikts.fraunhofer.de/en/departments/structural_ceramics/processes_and_components/shaping/extrusion.html)
- [5] <http://www.ltcc.org.pl/about-ltcc/tape-casting/>
- [6] <https://3dclayprinting.com/deltawasp-3mt-ceramic-3d-printer-printing-1-meter-tall/>
- [7] <http://www.dynacer.com/processing/sintering-or-firing/>
- [8] <http://www.dynacer.com/processing/hot-pressing/>
- [9] <http://www.mdpi.com/2075-4701/6/7/143/htm>
- [10] <https://www.makepartsfast.com/what-is-selective-laser-sintering/>
- [11] <https://scitechvista.nat.gov.tw/c/sWiI.htm>
- [12] <http://www.ifuun.com/a2017692835878/>

- [13] <https://www.ledinside.com.tw/knowledge/20150210-30732.html>
- [14] <https://zh.wikipedia.org/wiki/金屬氧化物半導體場效電晶體>
- [15] <https://link.springer.com/article/10.1007/s11595-016-1319-6>
- [16] Journal of the American Ceramic Society,101(3),(2018),1048-1057.
- [17] <https://www.taipower.com.tw/tc/Chart.aspx?mid=194>
- [18] [http://www.shyeku.com.tw/product\\_SCR01.html](http://www.shyeku.com.tw/product_SCR01.html)
- [19] <https://www.automotiveworld.com/news-releases/plan-develop-aichi-low-carbon-hydrogen-supply-chain-moves-forward/>
- [20] [https://www.toshiba-energy.com/hydrogen/rd/index\\_j.htm#rd02](https://www.toshiba-energy.com/hydrogen/rd/index_j.htm#rd02)
- [21] <https://www.mhps.com/products/sofc/index.html>

## 高分子材料簡介

高分子材料是人類日常生活不可或缺，甚至影響生活品質相關之材料，他們以各種形式存在於不同元件甚至人體中，因此對人類文明進展有重要貢獻。

高分子材料除了本人—國立交通大學材料系韋光華教授—擔任主編，並邀請了四位國內高分子領域之學者專家來共同撰寫四個子領域，包括(一) 高分子化學，(二) 高分子物理，(三) 光電高分子及(四) 生醫高分子。

首先我們先介紹高分子化學，這是產生所有高分子材料之基礎也是未來製造新穎材料不可或缺之學科，由交通大學林宏洲教授所撰寫，其內容包括不同高分子結構之聚合方法。其次高分子物理為了解高分子如何結晶，分子鏈如何排列，均會影響到各種加工條件下所產生高分子之機械性質及光電性質，以及其應用層面，由清華大學化工系陳信龍教授撰寫。第三部分則討論光電高分子，如光電高分子在有機顯示器及有機太陽能電池之應用，由成功大學許聯崇教授撰寫。第四部份則為有關生醫高分子之應用於治療各種疾病，再生醫學及藥物傳輸等由交通大學材料系劉典謨教授負責。

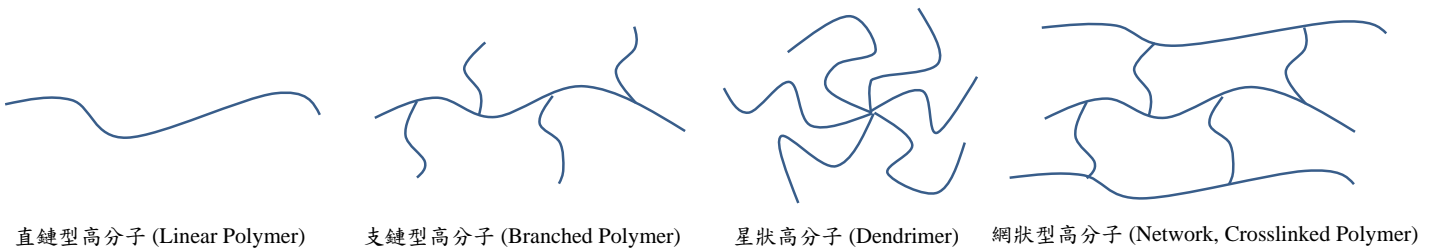
( )

### (一) 高分子化學 (Polymer Chemistry)

國立交通大學材料科學與工程學系所 林宏洲

高分子化學 (polymer chemistry) 乃是聚合物依據所欲獲取高分子材料的種類 (type) 與型態 (shape) 來製備一個巨大分子 (macromolecule) 的材料，如人工合成的塑膠 (plastics) 及天然的蛋白質 (protein)，通常是由較小的單體 (monomer) 所聚合而產生，它們一般由數百或更多的單體所組成，通常分子量  $>10000 \text{ g/mol}$ 。

1. 高分子依分子結構 (architecture) 可分為 (如圖一)：



圖一、高分子各種型態

1.1 直鏈型：聚乙烯 (polyethylene, PE)、聚丙烯 (polypropylene, PP)、聚氯乙烯 (polyvinyl chloride, PVC)、聚苯乙烯 (polystyrene, PS)、聚碳酸酯 (polycarbonate, PC)、Nylon66 等。

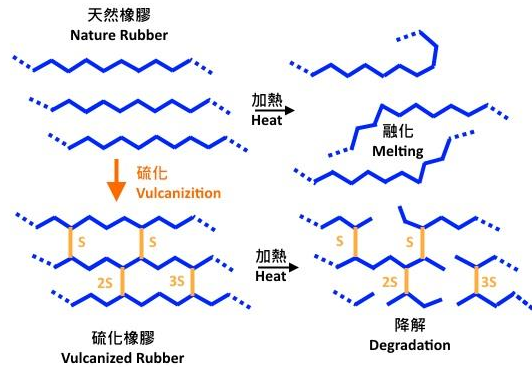
1.2 支鏈型：低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE)。

1.3 網狀型 (交聯體)：輪胎的製造在天然的橡膠中加入硫一起加熱，因為硫原子會讓橡膠的長條分子，產生橫向的化學鍵結，讓橡膠被拉伸或壓縮之後放鬆，還能回到原來的狀態。硫與橡膠之間的化學鍵結稱為交聯 (crosslink)。又依據高分子進行交聯方式的

不同可以分為化學交聯與物理交聯。

### 1.3.1 化學交聯(Chemical Crosslinking):

化學交聯指藉由外力如光、熱、高能輻射、機械力和交聯劑等作用下，將高分子鏈間運用化學鍵聯結，形成網狀結構高分子的過程。在工業上的之應用有橡膠的硫化及環氧樹脂的熟化等，這些都是化學交聯的例子(如圖二)。



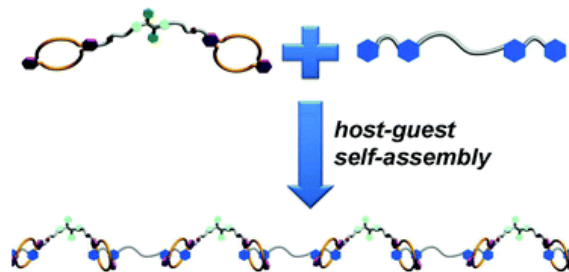
圖二、輪胎為天然橡膠硫化形成<sup>1</sup>

### 1.3.2 物理交聯(physical crosslinking):

物理交聯是經由非化學鍵結(如氫鍵、離子鍵、主客效應、或金屬錯合等物理方式)進行交聯而成。

#### 尺寸效應形成的超分子(Supramolecule)聚合物:

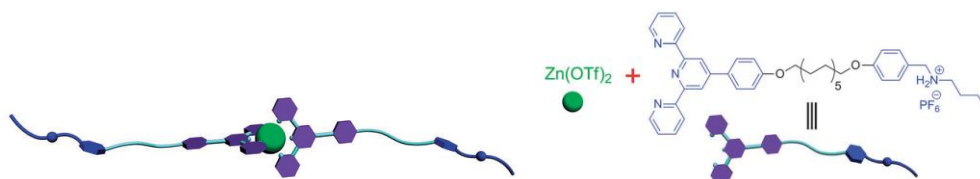
不同分子之間基於結構中的尺寸效應，使分子間相互作用形成超分子自組裝(self-assembly)體系。超分子化學最初的發展是源於主客體(host-guest)體系。主客體體系被廣泛應用於建構超分子聚合物(如圖三)。



圖三、主客型高分子膠體聚合<sup>2</sup>

#### 金屬配位(Metal-Coordination)超分子聚合物:

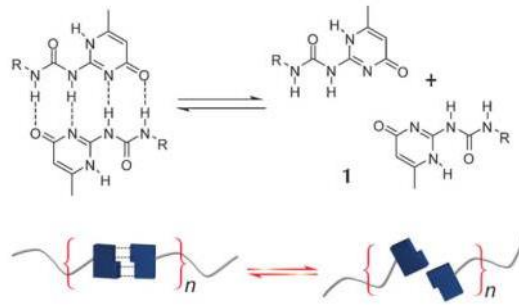
有機化合物與金屬離子配位所組成的聚合物不僅可以為超分子組裝體提供重要的架構，更可以賦予超分子新穎的結構與功能。通過更換不同的金屬離子，可以實現對超分子聚合物多種性能的改善。對於超分子凝膠(gel)和超分子聚合物而言，亦可作為尖端高分子能源或感測器材料而受到廣泛之重視(如圖四)。



#### 圖四、金屬配位高分子膠體聚合<sup>3</sup>

##### 氫鍵(Hydrogen-Bonding)超分子聚合物:

對於超分子自組裝而言，氫鍵作用力可以說是最重要的非共價相互作用。氫鍵聚合物的多層次組裝可以導致高分子凝膠的形成，不僅在分子科學的領域中佔有重要的地位，超分子聚合物凝膠在生物醫學中也扮演重要之角色。同時，自然界和生物體中各類自組裝結構更證明了氫鍵的重要性(如圖五)。



圖五、氫鍵高分子凝膠聚合<sup>4</sup>

#### 2. 高分子依聚合反應種類(Reaction Type)可分為:

##### 2.1 加成反應 (Addition Reaction or Chain Reaction):

是一種高分子化學反應發生在具有雙鍵烯類(ethylene)或三鍵(acetylene)的單體中，將原來多重鍵兩端的碳原子各連接上一個新的基團，經由快速的連鎖反應(chain reaction)將單體互相加成反應生成高分子。根據化學反應機制，加成反應可分為陰陽離子加成、自由基加成、開環加成等反應。

##### 2.1.1 離子型聚合 (Ionic Polymerization):

係指用離子型引發劑或啟始劑(initiator)引發其增長鏈端基帶有正或負電荷的加成聚合或開環聚合反應。主要可分為兩種反應，陽離子聚合與陰離子聚合，與自由基聚合相比，離子型聚合對反應條件較為嚴苛，對反應環境中之空氣與水氣等雜質更為敏感且較難控制，因此它在工業上的應用不如自由基聚合廣泛。

**陽離子聚合(Cationic Polymerization):** 常用質子酸、路易士酸、碳烯陽離子鹽做為引發劑，用以製造聚異丁烯(polyisobutylene, PIB)產物，包含聚丁烯(polybutene)和丁基橡膠(butyl rubber)。

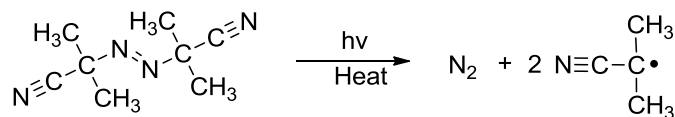
**陰離子聚合(Anionic Polymerization):** 常用碳負離子(carbanion)，又叫碳陰離子做為啟始劑來產生聚二烯烴(polydiene)合成橡膠、丁苯橡膠(styrene butadiene rubber, SBR)和苯乙烯熱塑性彈性體(thermoplastic elastomer)。

##### 2.1.2 自由基加成反應(Free Radical Addition):

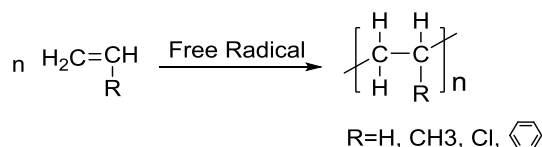
常見的雙鍵或三鍵的單體聚合反應是藉由連續加成自由基(free radical)的一種聚合方法所形成之聚合物，這種反應稱為自由基聚合反應。聚合反應的開端需要藉由起始劑(例如: azoisobutylnitrile, AIBN)的幫助，使用 AIBN 在照射紫外光或受熱時會產生自由基(如圖六)，此自由基會去攻擊單體的雙鍵或三鍵，從而引發一連串的自由基聚合反應(如圖七)。<sup>5</sup> 生活中常見的塑料如: 聚乙烯(polyethylene, PE)、聚丙烯(polypropylene, PP)、聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)、聚苯乙烯(polystyrene, PS)、聚甲基丙



烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)等。在塑膠垃圾回收分類代碼分別如下：1 是聚對苯二甲酸乙二酯(PET)、2 是高密度聚乙烯(HDPE)、3 是聚氯乙烯(PVC)、4 是低密度聚乙烯(LDPE)、5 是聚丙烯(PP)、6 是聚苯乙烯(PS)、7 是聚乳酸(PLA)或其他。



圖六、AIBN 在照射紫外光或受熱時產生自由基反應機構



圖七、PE, PP, PVC, PS 聚合示意圖

### 2.1.3 開環反應(Ring Opening):

環狀單體在引發劑或催化劑作用下開環後聚合，形成線形聚合物的反應。例如：內酯(lactone)和內醯胺(lactam)開環聚合可以分別得到聚酯(polyester)及聚烯胺(polyamide)之聚合物。

#### 開環移位聚合 (Ring Opening Metathesis Polymerization, ROMP)

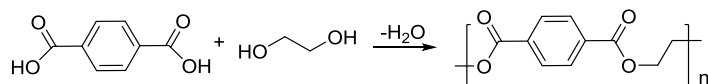
開環移位聚合是一種烯烴複分解反應，常用來製造重要的工業用產品。此反應主要是利用環烯烴的環張力釋放的能量(例如：環戊烯)，並在過程中使用各種催化劑及不同的取代物或溶劑皆可合成出不同分子量之聚合物。環烯烴的開環複分解聚合，可以製作許多重要的石化產品，在工業發展中特別重要的是可以合成出廉價的單體或具有特殊性質的聚合物以降低生產之成本。<sup>6</sup>

### 2.2 縮合反應 (Condensation Reaction or Step Reaction):

當單體透過兩個官能機的不斷反應而結合成一個新的高分子，在分子聚合反應過程中會失去些小分子。<sup>7</sup>如所失去的小分子為水，則此過程則稱為脫水反應。其他常見失去的小分子包括氯化氫、甲醇或乙酸等。因為此高分子縮合聚合之反應速度較前述陰陽離子及自由基之加成反應緩慢，故又稱為逐步聚合反應(step reaction)。

#### 聚對苯二甲酸乙二酯(Polyethylene Terephthalate, PET)

是由對苯二甲酸(para-terephthalic acid, PTA)和乙二醇(ethylene glycol, EG)經過縮合聚合產生(如圖八)。PET 之性能優良，硬度及韌性極佳、成本低、用途廣泛，故常作為填充容器原料，又稱為「寶特瓶」。

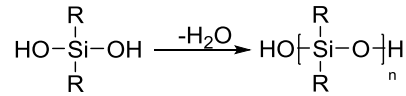


圖八、對苯二甲酸和乙二醇縮合反應

#### 矽氧聚合物 (Polysiloxanes, Silicone)

是一個介於有機與無機的聚合物，其化學式為 $[-R_2SiO-]_n$ ，其中R=甲基、苯基等有機集團。這些材料由無機矽氧鍵當骨架( $\dots -Si-O-Si-O-Si-O-\dots$ )，矽原子以共價鍵結合有機集團的支鏈所組成(如圖九)。通過控制骨架的長度、有機集團的種類和骨架的交聯，

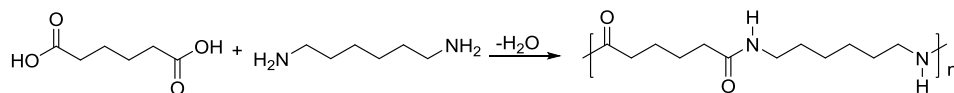
可得到具有不同性質的矽氧聚合物，從液體的矽油到柔軟彈性的矽凝膠、矽橡膠和剛性的矽樹脂。<sup>8</sup>矽膠在 -100 to 250°C 間能保持穩定之性質)，矽氧樹脂具有拒水性，可用作水密封。對氧氣、臭氧氣、和陽光有很好的抗氧化能力及具有彈性與良好的電絕緣性。矽膠的透氣性佳，例如對氧氣的滲透能力約為丁基橡膠的 400 倍，故矽膠廣泛使用在醫療用材料。<sup>9</sup>



圖九、矽氧聚合物的縮合聚合反應

### 聚醯胺(Polyamide, PA)

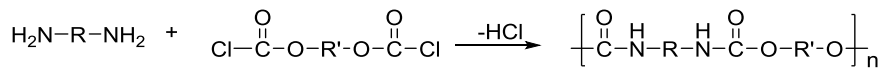
聚醯胺是由含有羧基和氨基的單體通過醯胺鍵聚合而成的高分子。他們可為自然生成，例如羊毛，絲等各種蛋白質，也可為人工逐步聚合，最廣為人知的例子是尼龍 66 (如圖十)，其命名源自於己二胺和己二酸所含的六個碳原子。在聚合物的鏈中己二胺和己二酸互相交替，在尼龍中其醯胺鍵的方向也不斷交替。由於其極端的耐用性和強度，人工聚醯胺聚合物通常用於紡織品、汽車零件、地毯、運動裝、食物包裝、眼鏡架、鏡片、飛機、自行車輪胎、護甲、防護手套、防火衣、防火頭盔等用途。



圖十、己二酸和己二胺縮合聚合生成 Nylon66

### 聚氨基酯(Polyurethane, PU)

聚氨基酯通常是指主鏈中含有氨基甲酸酯特徵單元的高分子 其合成方法為利用雙氯甲酸酯和二胺縮合生成(如圖十一)。這種高分子材料廣泛用於黏合劑、塗層、低速輪胎、墊圈、車墊等工業領域。在日常生活領域聚氨基酯被用來製造各種泡沫和塑料海綿。聚氨基酯還被用於製造醫用器材和材料。由於聚氨基酯具有非常低的導熱係數，其材料為基礎的新型牆體保溫材料開始在新式建築工法中逐漸被應用。



圖十一、聚氨基酯縮合聚合反應機構通式

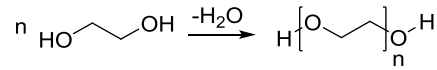
### 聚醯亞胺(Polyimide, PI)

其合成方法為：二酐和二胺在非質子極性溶劑如二甲基甲醯胺二甲基亞砷中進行縮合聚合，生成聚醯胺酸，之後加熱固化脫水成聚醯亞胺。聚醯亞胺是主鏈分子結構含有醯亞胺基團的雜環高分子化合物，具有適用溫度廣可達 380°C 的耐熱性外、耐化學腐蝕、高強度等優點。為電子、電機兩大應用的上游重要關鍵原物料，電子產業以 3C 產品為主，廣泛應用於半導體封裝、液晶顯示器、通訊等相關產業。

### 聚乙二醇(Polyethylene Glycol, PEG)

是由乙二醇脫水縮合聚合而成(如圖十二)，聚乙二醇可以用於修飾藥物蛋白，以保護藥物分子延長其作用半衰期。作為細胞融合劑，它可引起鄰近的細胞膜的黏合，繼而使細

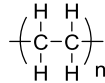
胞融合為一。此外聚乙二醇也是一種食品添加劑，常用於糖果、巧克力製品包衣，在食品中可用於作為被膜劑。<sup>10</sup>



圖十二、乙二醇脫水縮合聚合生成聚乙二醇

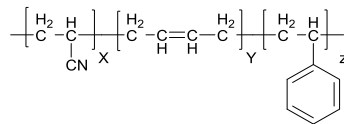
### 3. 高分子依聚合單體組合型式(Monomer Assembly Type)方式:

3.1 單元聚合物(Homopolymer): 由一種單體聚合而成的聚合物如聚乙烯(PE)(如圖十三)。



圖十三、聚乙烯分子式

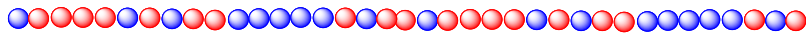
3.2 共聚物(Copolymer): 含有兩種或兩種以上單體成分的聚合物如 ABS 工程塑膠 (如圖十四)。



圖十四、ABS 工程塑膠 (Acrylonitrile Butadiene Styrene) 分子式<sup>11</sup>

#### 3.2.1 無規則(Random Copolymer):

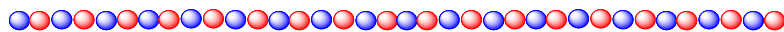
共聚物中兩結構單元 A 和 B 隨機出現，其中 A 和 B 自身連續的單元數一般在幾個到十幾個，無規則聚合物的結構單元在聚合物鏈上的含量比等於單體 A 和 B 放進聚合反應中的含量比(如圖十五)。<sup>12</sup>



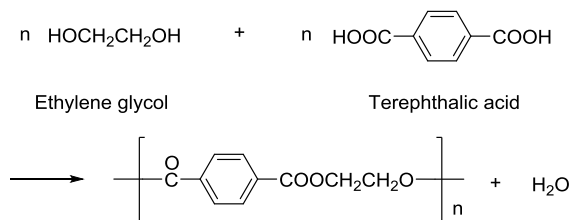
圖十五、無規則共聚物示意圖

#### 3.2.2 交替式(Alternating Copolymer):

共聚物中兩結構單元 A 和 B 嚴格交替相間，兩者在共聚物中的摩爾分數均約為 50%(如圖十六)，生活應用為寶特瓶材質(PET) (如圖十七)。



圖十六、交替式共聚物示意圖



圖十七、Polyethylene Terephthalate (PET)合成步驟

#### 3.2.3 嵌段式(Block Copolymer):

由較長的單一結構單元 A 形成團鏈段和較長的單一結構單元 B 形成另一團鏈段所構成，其中每一鏈段可達幾百到幾千結構單元。近來隨著控制自由基聚合反應的發展其 A 和 B 的結構單元的組成隨主鏈的延伸而漸變，不像無規和交替共聚物基本不變，也不像接枝

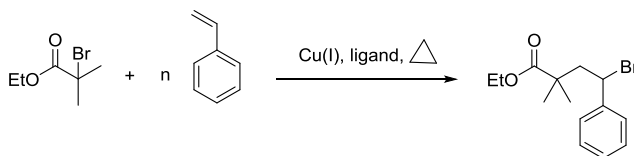
共聚物呈現突變關係，例如原子轉移自由基聚合反應(如圖十八)。<sup>13</sup>



圖十八、嵌段式共聚物示意圖

#### 原子轉移自由基聚合(Atom Transfer Radical Polymerization, ATRP):

ATRP 通常使用過渡金屬作為催化劑，其中烷基鹵化物作為起始劑。過渡金屬配合物，如 Cu, Fe, Ru, Ni 和 Os, 已被用作 ATRP 的催化劑。原子轉移自由基聚合有四個重要成分：單體，起始劑，催化劑和溶劑(如圖十九)。



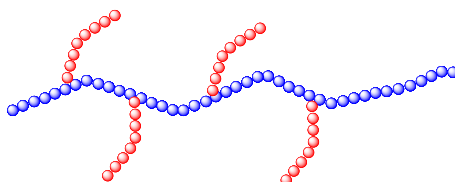
圖十九、原子轉移自由基聚合反應機制

#### 基團轉移聚合(Group Transfer Polymerization, GTP):

是一種較新型的嵌段式聚合方法，其中以甲基丙烯酸酯類單體的基團轉移聚合最為重要，此乃因其聚合速率適中，並具有活性聚合的特質。與陰離子活性聚合相比，基團轉移聚合可在室溫附近(20~70°C)進行嵌段式聚合反應，更具有實用價值。基團轉移聚合所使用的起始劑及觸媒為結構較特殊的烯酮矽縮醛及其衍生物，以二甲基烯酮甲基三甲基矽縮醛(MTS)最為常用。

#### 3.2.4 接枝式(Graft Copolymer):

接枝共聚物在結構上屬於支化聚合物，不僅有主鏈及較長的支鏈，且主鏈和支鏈是由不同的種結構單元所組成，主鏈為結構單元 A，而支鏈為結構單元 B。有時接枝聚合物的主鏈和支鏈可能都是共聚物，例如主鏈是 A 和 B 的無規則共聚物，支鏈是 A 和 B 的交替共聚物，整體仍是接枝共聚物(如圖二十)。<sup>14</sup>



圖二十、接枝式共聚物示意圖

### 4. 高分子依聚合反應形態(Reaction Mode)可分為:

#### 4.1 總體聚合 (Bulk Polymerization):

總體聚合是單體混合起始劑在使用光、熱等作用下的聚合，它的特點是成分簡單，通常只含單體和少量起始劑，優點操作簡單，產物單純，缺點是聚合產生熱不易排除。工業上應用產品主要有聚甲基丙烯酸甲酯(有機玻璃、PMMA)、高密度聚乙烯(HDPE)和聚苯乙烯(PS)，運用離子及配位聚合的產品主要有低密度聚乙烯(LDPE)、聚丙烯(PP)。<sup>15</sup>

#### 4.2 溶液聚合 (Solution Polymerization):

單體及起始劑(或催化劑)溶於適當溶劑中進行的聚合，其優點是黏度低、傳熱快、聚合溫度容易控制。缺點是聚合度比較低、混入溶劑不易除去、純度較差，生產成本高。在工業上適用於直接使用聚合物溶液的場合，如塗料、膠黏劑、合成纖維紡絲液等。<sup>16</sup>

### 4.3 懸浮聚合 (Suspension Polymerization):

懸浮聚合又稱為珍珠聚合(pearl polymerization)是溶解有起始劑的單體被攪拌成小液滴在水介質中進行聚合，一個小液滴就相當於本體聚合的一個小單元。在大量水介質中進行聚合產生微米顆粒，具有容易散熱、分離、洗滌之優點，因此純度較高。為防止聚合反應時粒子相互黏結在一起，須加分散劑，以便在粒子表面形成保護膜。懸浮聚合的反應機理與本體聚合相同，也有均相聚合和沉澱聚合之分。懸浮聚合物的粒徑約 0.05~2mm (或 0.01~5mm)，主要受攪拌和分散控制。懸浮聚合主要用於生產聚氯乙烯、聚苯乙烯和聚甲基丙烯酸甲酯。懸浮聚合主要用於生產膠黏劑、水性漆和塗料等產品。

17

### 4.4 乳液聚合 (Emulsion Polymerization):

乳液聚合是單體借助乳化劑和機械攪拌，使單體分散在水中形成乳液，再加入水溶性之起始劑於水相中產生單體聚合反應。優點是聚合速度快、產品分子量高、用水作分散基介質、有利於傳熱控溫。反應達高轉化率後乳液聚合的粘度仍很低，分散整體穩定，較易控制和實現連續操作，通常乳膠可以直接用作最終產品。缺點是聚合物分離析出過程繁雜，反應管道容易堵塞，因產品中殘留雜質會影響產品之性質。採用乳液聚合生產的品種主要有丁苯橡膠、氯丁橡膠、丁橡膠和聚氯乙烯乳膠。<sup>18</sup>

## (二) 高分子物理

國立清華大學化學工程系 陳信龍

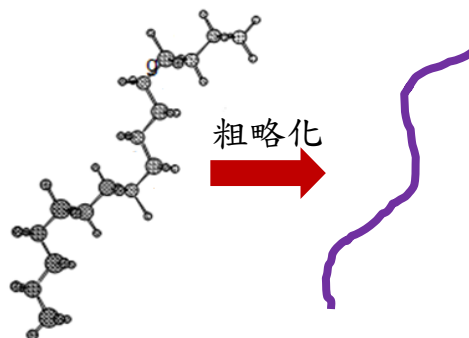
### 什麼是「高分子物理」？

我們使用某種高分子材料，最主要是要考量它的性質，如強度、透明度、耐熱性等是否符合我們的需求，而高分子材料的性質和微觀世界裡的物理結構，如分子聚集排列的狀態等，有十分密切的關連性，高分子物理就是探索高分子材料微觀物理結構的領域；透過微觀結構的了解及操控，可以進一步開拓高分子材料新的性質與應用，這是研究高分子物理的目的之一。

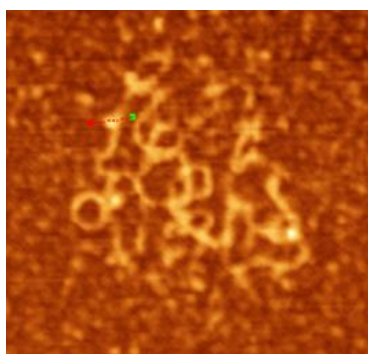
### 高分子獨特的長鏈結構

高分子是「很龐大或分子量很大的分子」，一個小分子如乙烯的化學結構式為  $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ ，它的分子量是 28 g/mol。將乙烯透過「聚合反應」可以合成出「聚乙烯」這種高分子，它是由很多  $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)-$  單體單元串連而成(如圖二十一所示)，分子量可達數萬甚至數百萬。因此，高分子是一條長長的分子鏈，通常我們可以把它粗略地用一條扭曲的線來表示，如圖 1 所示。高分子鏈的形狀不是固定的，鏈中的碳原子會因熱能而以碳-碳鍵為中心旋轉，眾多碳原子旋轉至不同的位置，會促使高分子鏈出現各種不同的形狀，或稱「構形」(conformation)。當溫度夠高時，較高的熱能會促使碳原子不斷地旋轉，因此高分子鏈的形狀或構形會一

直不斷地改變（請參考網址：[https://www.youtube.com/watch?v=ek9vd7\\_PDjk](https://www.youtube.com/watch?v=ek9vd7_PDjk)）。長鏈結構（圖二十二）是高分子獨有的特徵，而這個特性正是賦予高分子不同於小分子性質的主要因素。



圖二十一 高分子的長鏈化學結構，我們可以把高分子鏈粗略化，用扭曲的線條來表示。



圖二十二利用原子力顯微鏡所觀察到的高分子長鏈。

接下來我們舉例說明長鏈結構造成高分子那些特殊的性質或特性。

### (1) 高分子鏈的構形與橡皮筋的彈性

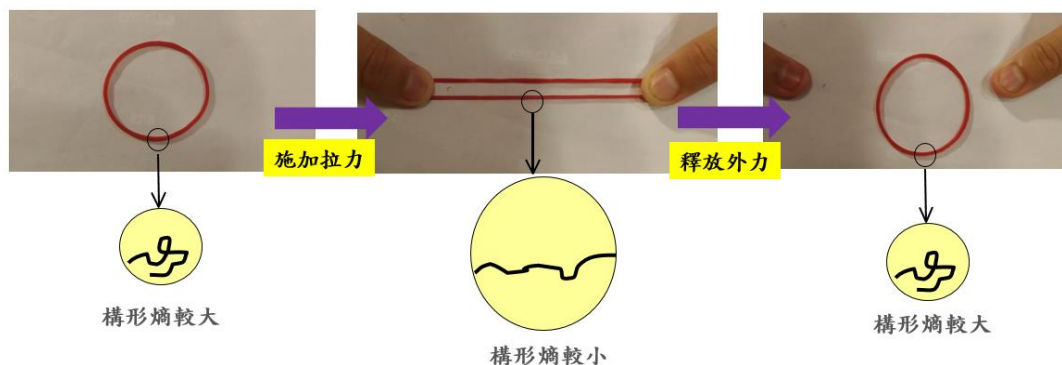
橡皮筋是一種高分子材料，我們把橡皮筋拉伸之後再放掉，橡皮筋會立即縮回原來的形狀，這就是著名的「橡膠彈性」。橡皮筋在外力釋放後的回縮是一個自然發生的程序；在熱力學上，這樣的自發程序是一個「自由能」降低的程序。自由能（A）與系統的能量（E）與熵（S）有關，即：

$$\text{自由能 (A)} = \text{能量 (E)} - \text{溫度 (T)} \times \text{熵 (S)}$$

一個狀態的自由能愈低表示這個狀態愈穩定，由上面的式子可知，一個狀態的能量(E)愈小或熵(S)愈大，該狀態的自由能就愈低，因此這個狀態就愈穩定。一個系統的能量主要與分子間作用力有關，而熵則跟系統

的「亂度」有關，熵越大，代表亂度愈高。

高分子鏈在不受外力的情形下，分子鏈可以吸收外界的熱能，很自由地改變分子的形狀或構形，此時高分子的形狀亂度很高，所以「構形熵」很大。當高分子鏈被外力拉直時，它能夠改變形狀的自由度就變小了，所以它的構形熵就降低了。根據這個特徵，我們可以瞭解為什麼橡皮筋在外力釋放後會縮回原來的狀態。當橡皮筋被拉伸時，裡面的高分子鏈的構形熵下降，造成自由能增加；當外力去除後，分子鏈會立刻蜷縮回原來的狀態，以提升構形熵，來降低自由能，如圖二十三所示。因此，高分子的彈性主要是由「熵」的改變所驅動的，與金屬材料不同（金屬材料如彈簧的彈性主要是由「能量」的改變所驅動的）。



圖二十三 橡皮筋彈性示意圖，橡皮筋鬆弛時，其內部高分子鏈構形熵較大，自由能低，而當橡皮筋被拉伸時，內部高分子鏈構形熵降低，造成自由能增加，所以當外力釋放後，高分子鏈會立刻蜷縮回原來的狀態，以提升構形熵，來降低自由能。

## (2) 高分子鏈被凍結了：高分子材料的玻璃轉化現象

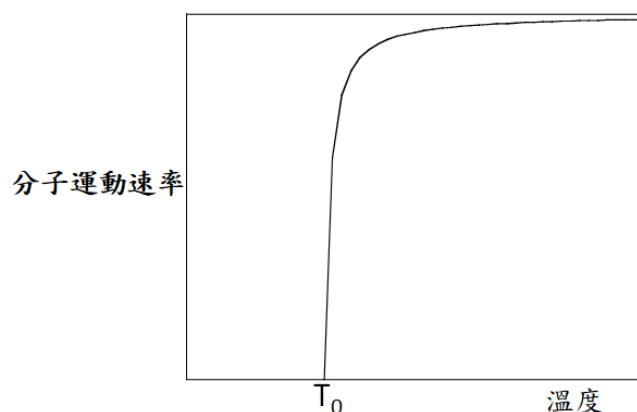
我們做化學實驗要帶乳膠手套，乳膠手套在室溫下是軟的，而且具有不錯的韌性，我們稱這個狀態為「橡膠態」。如果我們把乳膠手套丟到溫度低於 $-150^{\circ}\text{C}$ 的液態氮中，乳膠手套會變得又硬又脆（請參見網址：<https://www.youtube.com/watch?v=gDljp0UxYUk>），我們稱乳膠手套被「玻璃化」，這個又硬又脆的狀態稱為「玻璃態」。所以，高分子材料在足夠高的溫度時是橡膠態，當它被冷卻到某特定溫度以下時，便轉化為玻璃態，這個特定的溫度稱為「玻璃轉化溫度」（glass transition temperature），簡稱 $T_g$ 。不同的高分子材料的 $T_g$ 不同，而 $T_g$ 的高低會決定高分子材料的應用範圍，例如用來做鏡片的高分子材料的 $T_g$ 一要遠高於室溫（這樣鏡片在室溫下才是玻璃態）。所以，用來作為乳膠手套的高分子材料的 $T_g$ 一定要遠低於室溫。

高分子鏈在玻璃轉化溫度發生了什麼變化，而導致整個材料從橡膠態變成玻璃態呢？我們前面提過，在足夠高的溫度下，充足的熱能使得高分子材料中的分子鏈可以不斷改變形狀，高分子鏈甚至可以一邊改變形狀一邊移動，此時材料中的分子鏈可以較自由地運動，材料就會呈現橡膠態的特性。分子的運動速率跟溫度有關，溫度越低，運動速率越慢，我們可用以下的公式來表達高分子鏈的運動速率：

$$\text{分子鏈運動速率} \sim e^{\left(\frac{-B}{T-T_0}\right)}$$

這個公式稱為 Vogel-Fulcher 定律，公式中的 B 是一個常數，T 是溫度， $T_0$  是分子運動完全停止的溫度。這個公式所預測的分子運動速率隨溫度的變化趨勢如圖二十四所示。由圖中可以看出，當溫度趨近於  $T_0$  時，高分子鏈的運動速率會急速下降，所以當溫度很靠近  $T_0$  的時候，分子鏈的運動會變得非常緩慢，我們說分子被凍結住，無法做大規模的運動，此時高分子材料便會呈現玻璃態的特性（請參見以下網址觀看分子在降溫過程中運動性的變化：<https://www.youtube.com/watch?v=iQc860lgbuA>）

。所以玻璃轉化溫度是高分子鏈運動性產生急劇變化的一個溫度，當溫度高於  $T_g$  時，高分子鏈運動自由度高，此時材料呈現橡膠態，溫度低於  $T_g$  時，分子鏈被凍結住了，無法自由運動，所以高分子材料呈現玻璃態。



圖二十四 Vogel-Fulcher 定律所預測的分子運動速率隨溫度的變化趨勢。

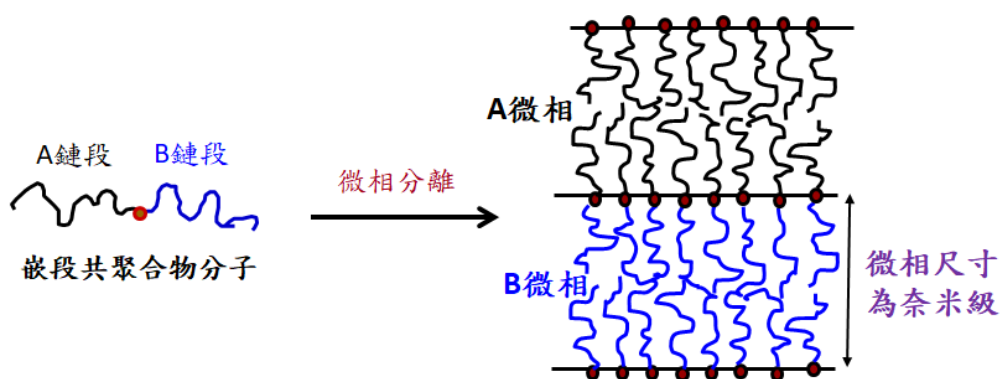
### (3) 以高分子鏈的尺寸特性來建構奈米結構

高分子的分子量很大，所以它的分子尺寸也比小分子大許多；要如何表達一條蜷曲高分子鏈的尺寸呢？我們可以用一個圓球的空間將這條高分子鏈框住，如圖二十五所示，這個圓球的半徑便可以用來表示高



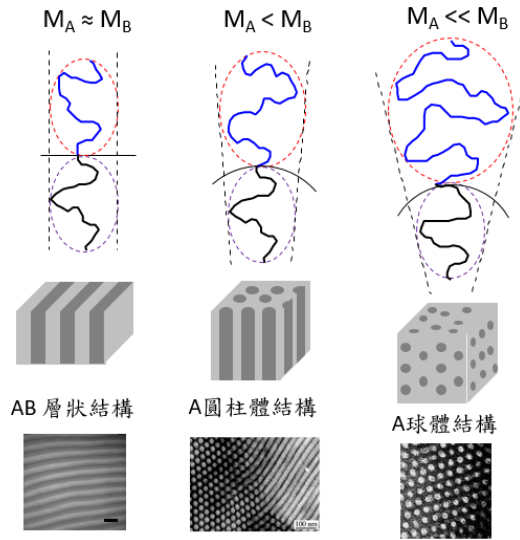
子鏈的尺寸，這個半徑稱為環動半徑(radius of gyration,  $R_g$ )。以一條分子量為 100,000 g/mol 的聚乙烯為例，它的環動半徑大約為是 14 奈米(nm)，所以高分子的分子鏈尺寸正位於奈米科技感到興趣的 1 ~ 100 nm 的尺度範圍，於是高分子可被用來做為一種奈米材料。

我們舉一種叫做嵌段式共聚物(block copolymer)的高分子為例，來說明高分子可以用來建構特殊的奈米結構。嵌段式共聚物是將二段不同化學結構的分子鏈(A 與 B)連結在一起所形成的高分子(如圖二十五所示)，當 A 與 B 鏈段互相排斥對方時(例如一段為親水性，另一段為親油性鏈段)，二者會分開聚集，發生所謂的「微相分離」(microphase separation)現象，形成 A 微相與 B 微相，如圖二十五所示。由圖二十五可看出，這些微相的尺寸大約與兩條高分子鏈的尺寸相當，所以是在奈米級尺度，因此，嵌段式共聚物的微相分離程序可形成奈米結構。有趣的是，我們可以控制 A 與 B 兩個鏈段的相對長度(或分子量)，來控制形成之微相的幾何形形狀。如果兩鏈段分子量相當，則 A 與 B 鏈段會形成層狀結構，若 B 鏈段分子量比 A 鏈段大許多，則 A 鏈段會形成奈米圓柱體或奈米球體的結構，如圖二十六所示。一個嵌段式共聚物材料內含有許多這樣的微相，眾多的微相會進一步地堆積成規則的立體圖案，例如眾多的圓球微相會自行形成體心立方的堆積。這就好像樂高玩具一樣，嵌段式共聚物的分子會自行微相分離形成圓球、圓柱、或是平板形狀的積木，然後這些積木進一步堆疊起來，排列成規則的立體圖案。如何操控這種高分子材料的樂高遊戲，對於發展新奈米材料(如光子晶體、奈米複合材料、奈米孔狀材料等)是一項重要之技術，因為我們可以藉由奈米圖案與尺寸來調控材料的光、電、磁、催化等性質。



圖二十五 嵌段共聚物分子及其 A 與 B 鏈段發生微相分離之示意圖。微相分離所形成的 A 微相與 B 微相的尺寸為奈米級。

$M_A$ : A鏈段之分子量  $M_B$ : B鏈段之分子量



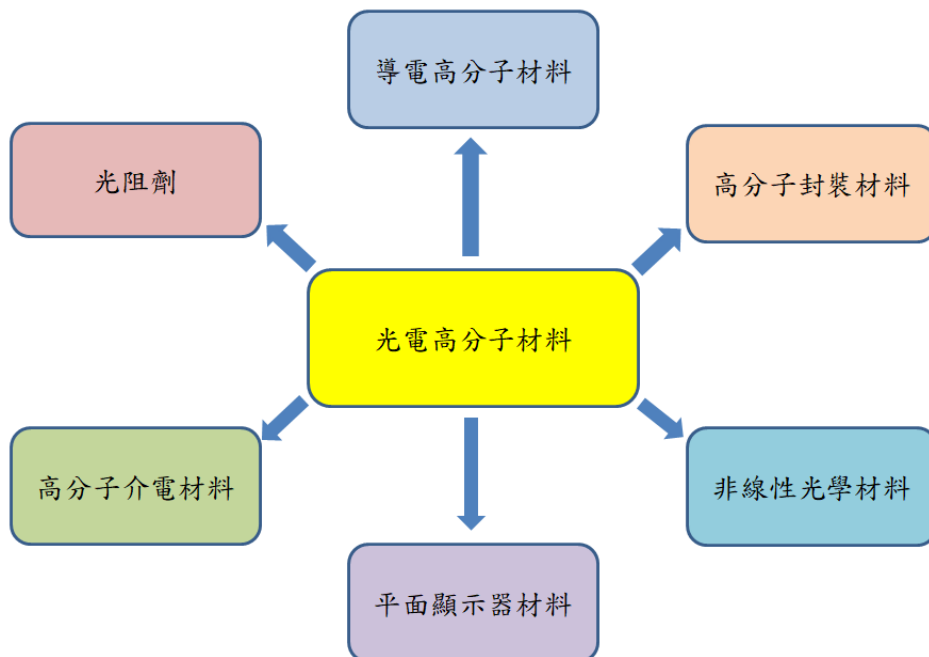
微相之電子顯微鏡影像

圖二十六 控制嵌段共聚物兩鏈段之分子量( $M_A$ 與 $M_B$ )可以控制其微相分離所產生的奈米結構，包括層狀、圓柱體及球體結構。最下方為用電子顯微鏡實際觀察到的影像。

### (三) 光電高分子材料

國立成功大學材料科學及工程學系 許聯崇

高分子材料在近代光電工業的發展扮演一個重要的角色，範圍涵蓋半導體、電子封裝、能源、資訊及通訊產業等。高分子材料在光電領域的應用主要包括光阻劑、高分子介電材料、高分子封裝材料、導電性高分子材料、非線性光學材料及平面顯示器用高分子材料等(圖二十七)，以下採重點說明。

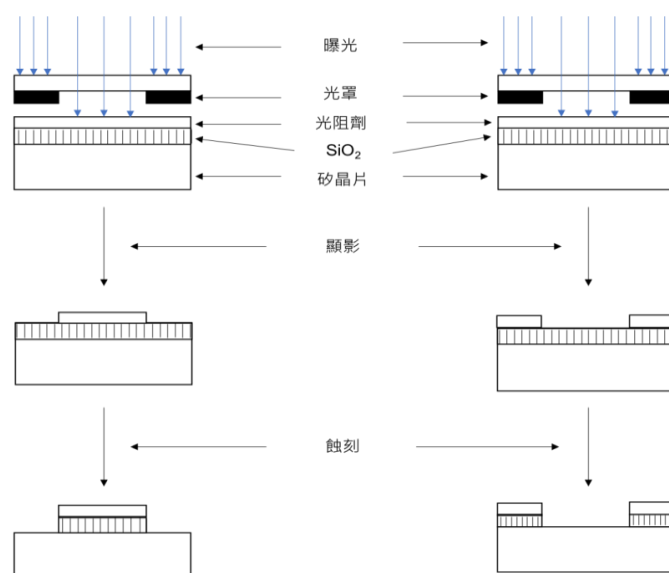


圖二十七、光電高分子材料及其應用

### 光阻劑(photoresist)

光阻劑是一種感光性的高分子材料，可用於光微影製程 (photolithography)，製造微細的半導體積體電路。半導體工業的發展，能夠從微米級的製程，進展到目前的 7 奈米或 5 奈米製程，主要是依靠光阻劑及曝光設備的發展。

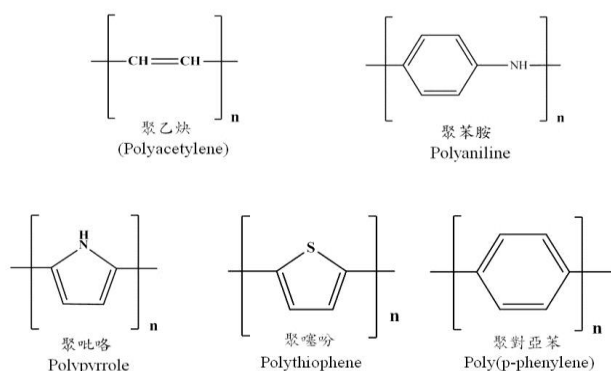
光阻劑分為正型光阻(positive photoresist)和負型光阻(negative photoresist)。如圖二十八所示，正型光阻劑是高分子材料曝光後，分子鏈斷裂或極性改變，使曝光區的高分子易於被顯影液溶解，得到和光罩相同的圖案。負型光阻劑是高分子材料曝光後產生交聯反應，使曝光區的高分子不易被顯影液溶解，而得到和光罩相反的圖案。光阻劑不僅可應用在 IC 製程，其他在電子封裝，平面顯示器，發光二極體上，都需使用它。



圖二十八、光阻劑及光微影製程

### 導電高分子材料

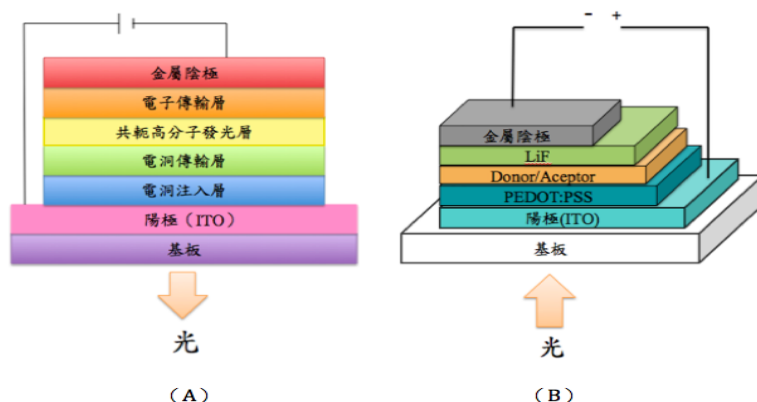
一般高分子材料大都是絕緣體不導電。在 1997 年，H. Shirakawa, A. G. MacDiarmid 及 A. J. Heeger 三人共同發現摻碘的聚乙炔高分子具有和金屬一樣高的導電度，開啟了本質導電高分子的研究熱潮，三人也獲得 2000 年諾貝爾化學獎。本質導電高分子具有共軛雙鍵的結構，因  $\pi$  電子軌域相互影響，使能帶變小，可以得到半導體或導體的性質。導電高分子主要的應用包括高分子發光二極體(PLED)，高分子太陽能電池(OPV)，高分子薄膜電晶體(OTFT)，有機記憶體及電致變色材料等。我們可以透過分子設計，導入不同的官能基(functional group)到高分子的結構內，可以得到不同光電特性的共軛高分子材料(圖二十九)。



圖二十九、代表性的導電高分子材料

高分子發光二極體(PLED)的原理是施加電壓至共軛高分子做成的元件，電子和電洞分別由陰極和陽極注入，至高分子材料中再結合形成激子(exciton)，緩和回到基態時，將多餘的能量以光的形式放出(圖三十(A))。

高分子太陽能電池(OPV)的原理和 PLED 相反，太陽光由 p-type 的共軛高分子吸收，產生激子，激子擴散到摻雜的 n-type 的材料的異質界面，而產生分離，電子電洞分別傳輸到陰陽電極，產生電能(圖三十(B))。

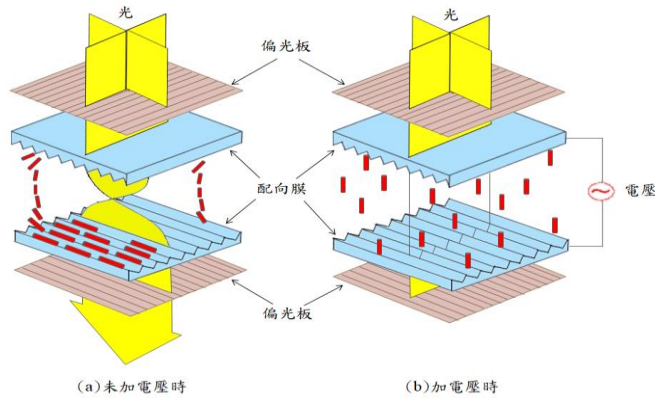


圖三十、高分子發光二極體(A)及高分子太陽能電池(B)的元件結構

### 平面顯示器用高分子材料

平面顯示器須使用多種高分子光學薄膜材料，例如偏光板(polarizer)、配向膜(alignment film)、光學補償膜(compensation film)或相位差膜(Retardation film)、增亮膜、擴散膜等(圖三十一)。

偏光板的功能在於將非偏極的自然光轉為偏極光，而液晶顯示器就是利用此偏極光加上液晶扭轉特性來達到控制光線的通過與否，形成明暗。偏光板的主要構成材料包括保護膜(PET)，支持膜(TAC 膜)，含碘的 PVA 膜，離型膜及光學膠層。配向膜主要的功能為使液晶分子排列的方向整齊一致及提供液晶預傾角，讓液晶在沒有電場施加的情況下，能夠有著一致的方向性。主要構成材料以聚醯亞胺(polyimide)為主。



圖三十一、液晶顯示器之工作原理

#### (四) 生醫高分子材料

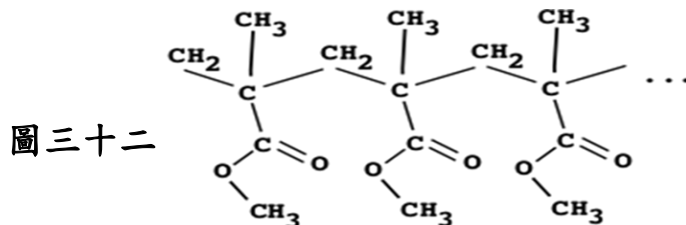
國立交通大學材料科學與工程學系所 劉典謨

在生醫材料的世界裡，生醫高分子材料無論在種類、物理化學性質、生物親和性質及相關臨床應用方面，是所有材料中最具複雜及最廣泛使用的材料。在臨床上，從皮膚治療、牙科、骨科、眼科、癌症治療、心血管疾病、中樞神經疾病、再生醫學、藥物傳輸等等，生醫高分子材料因具備各種可調控的物化及生物特性，皆扮演極為重要的角色。生醫高分子材料可以長久放置於人體，而不與人體組織產生反應，也可以設計成與人體組織、器官類似的生理結構、機械結構、降解程度等的醫療元件，更可與人類各種細胞/幹細胞互相結合，形成新型的結構組織，進行各項細胞醫療，是本世紀最重要醫學工程課題之一。

在分類上，本文以當前臨床上最廣泛使用的生醫高分子進行簡單介紹：

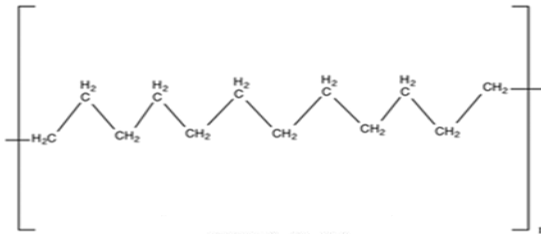
1. 不可降解性合成生醫高分子：大多數的合成生醫高分子均無法被人體所吸收。常見的合成高分子生醫材料有--

1-1 聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethylmethacrylate, PMMA, 圖三十二)：聚甲基丙烯酸甲酯是以甲基丙烯酸甲酯(MMA)為單體，經自由基起始反應後，形成聚甲基丙烯酸甲酯。聚甲基丙烯酸甲酯在生醫材料主要的應用包括假牙、骨水泥與隱形眼鏡。<https://en.wikipedia.org/wiki/PMMA>



1-2 聚乙烯(polyethylene, PE, 圖三十三)：依其密度可分為低密度聚乙烯 (low density polyethylene, LDPE)、高密度聚乙烯 (high density

polyethylene, HDPE)與超高分子量聚乙烯(ultra high molecular weight polyethylene, UHMWPE)。上，多使用於濾心(圖三十四)及過濾材料。  
(<https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene>)



圖三十三



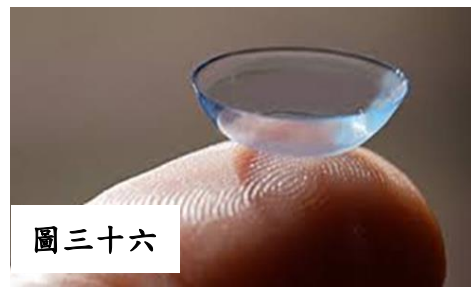
圖三十四

1-3 矽膠(silicone rubber): 其在生醫材料上的應用有人工心臟瓣膜的球閥、人工血管、心導管(圖三十五)、隱形眼鏡(圖三十六)以及用來美容手術的填充材料等。

([https://en.wikipedia.org/wiki/Medical\\_grade\\_silicone](https://en.wikipedia.org/wiki/Medical_grade_silicone))



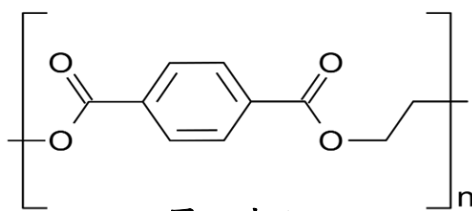
圖三十五



圖三十六

1-4 聚酯類高分子(polyester, 圖三十七): 聚酯類高分子是由具有羧基(carboxyl group)與羥基(hydroxyl group)的單體, 經 polycondensation 共聚合所得到的共聚物。在生醫材料裡較知名的有達克隆(Dacron)。達克隆在生醫材料上的應用主要有: 大口徑人工血管, 人工心臟瓣膜的縫合布圈以及人工韌帶(圖三十八)等。

([https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene\\_terephthalate](https://en.wikipedia.org/wiki/Polyethylene_terephthalate))



圖三十七



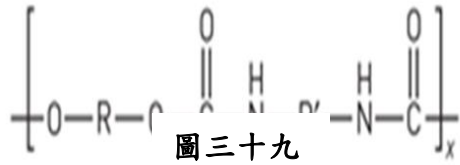
圖三十八

1-5 聚胺基甲酸酯 (polyurethane, PU 圖三十九): 聚胺基甲酸酯在生醫材料上的應用有: 人工血管、心導管(圖四十)、與人工心臟的心室袋狀物等。

(<https://en.wikipedia.org/wiki/Polyurethane> and

<http://blog.parker.com/medical-polyurethanes-for-life-science-app>

ications)



圖三十九

圖八

2. 可降解性合成生醫高分子

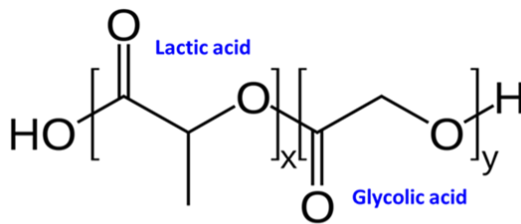


圖四十

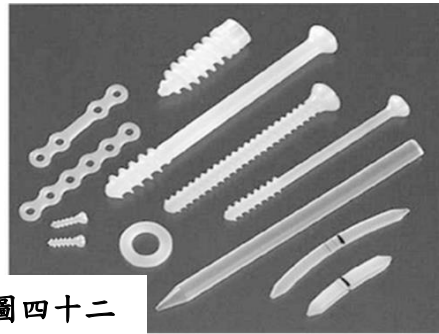
圖九

2-1 聚乳酸-聚乙醇酸(poly[lactic-co-glycolic acid], PLGA 圖四十一)-是目前臨床應用上非常廣泛的生物可降解高分子，不同組合比例 (lactic acid: glycolic acid)，有不同的機械特性、生物親和性、親疏水性、及生物降解性，可應用在手術縫線、骨材、各種醫療植入物 (圖四十二)、和藥物傳輸。

([https://openwetware.org/wiki/PLA,\\_PGA,\\_and\\_PLGA\\_as\\_biomaterials](https://openwetware.org/wiki/PLA,_PGA,_and_PLGA_as_biomaterials))



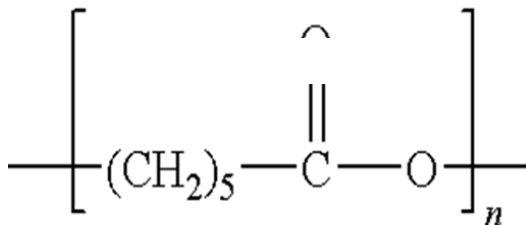
圖四十一



圖四十二

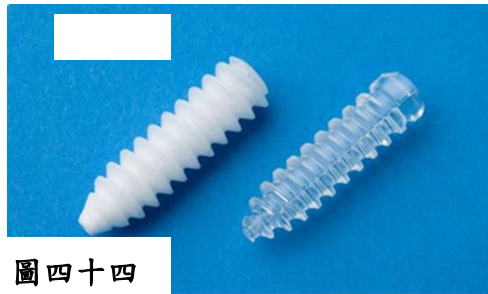
2-2 聚己內酯 (Polycaprolactone, PCL 圖四十三)-利用共聚形成骨材、植入物 (圖四十四)、或藥物傳輸系統的材料。PCL 通常可取代 PLGA，滿足長期使用型植入物的臨床要求，主因是 PCL 有較低的生物降解速率，而在長效型藥物釋放的應用上也被廣泛使用。

(<https://en.wikipedia.org/wiki/Polycaprolactone>)



圖四十三

圖四十一



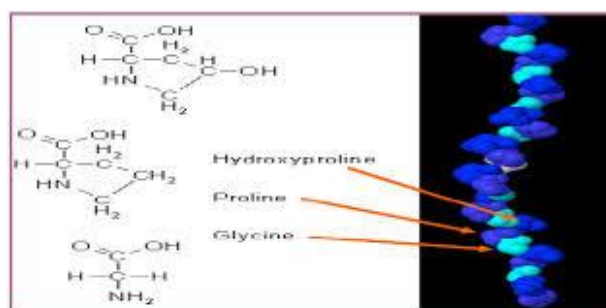
圖四十四

圖四十一

3. 天然生醫高分子，天然高分子在體內通常可被酵素所分解，且具優異的生物

相容性，故目前有愈來愈多的產品經由天然高分子材料所製備，它們皆有良好的生物分解性及相容性。廣為人們使用的天然高分子材料有：

3-1 膠原蛋白(Collagen, 圖四十五): 膠原蛋白可以從生物組織裡萃取純化出來之後，直接或經過重組做為生物組織材料。由於免疫排斥的問題，這些膠原蛋白生醫材料必須先經過交聯處理後，才能植入人體。由於膠原蛋白具有良好的生物相容性、機械強度以及可製做成多孔性的結構，因此非常適用於做為細胞培養的基材、暫時的組織填充材料以及製做各式人工器官/組織的基材等。

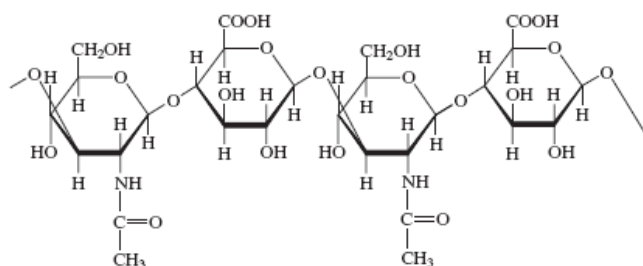


圖四十五

(from:

<http://www.collagenmenu.eu/our-scientific-expertise.html>)

3-2 透明質酸(Hyaluronic Acid, 圖四十六): 透明質酸為一帶許多負電荷的重複性雙糖單元天然高分子，分佈於動物體結締組織的細胞外間質內，其水溶液為具黏彈性的水膠，有潤滑、吸震、保護細胞等功能。在臨床應用上、以傷口敷料、醫美、抗發炎、關節補充液、及癌症治療為主。



圖四十六

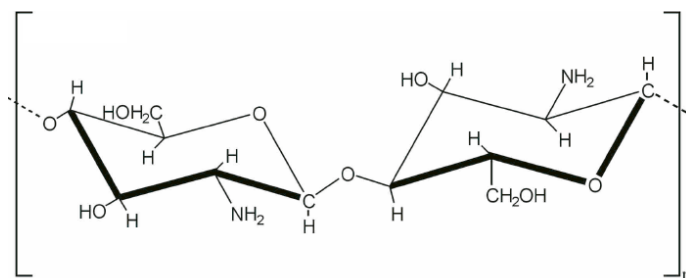
(from:

General, Organic, and Biological Chemistry (5th Edition), by [Karen C. Timberlake](#), Amazon Inc.)

3-3 幾丁聚醣 (Chitosan, 圖四十七): 又稱殼醣素，是由幾丁質 (chitin) 經由不同程度的脫乙酰基反應而得的非均一性聚合體。幾丁聚醣為 N-乙酰葡萄糖胺與 N-葡萄糖胺為結構單元之共聚合體。幾丁聚醣可溶解於稀釋的有機酸中，可提昇幾丁聚醣在臨床醫療上的應用價值，包括敷材、止血劑、經皮吸收貼片、口服藥劑、藥物傳輸等。由於幾丁聚醣良好的生物相容性、無毒



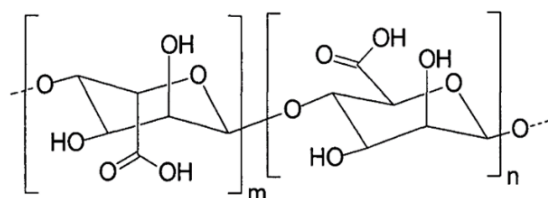
性、可生物體內分解(溶菌酶)、價格便宜以及生產原料不虞匱乏等優點，使得幾丁聚醣成為近年來高分子生醫材料中相當受重視的材料。



圖四十七(from: Jorge López-García, Marián Lehocný,\*, Petr Humpolický and Petr Saha, J. Funct. Biomater. 2014, 5, 43-57)

3-4 褐藻酸鹽(Alginate, 圖四十八): 褐藻酸鹽為一帶許多負電荷的多醣類高分子，以鈣鹽或鎂鹽存在於褐藻類植物中。為一線性 (1-4)-linked  $\beta$ -D-mannuronate (M) 及 C-5 epimer  $\alpha$ -L-guluronate (G) 共價結構型成之共聚高分子。其分子量介於 10,000 - 600,000 g/mole。褐藻酸鹽於室溫下可溶於水或鹼性溶液中，配製成黏稠之溶液，可以做為醫藥或化妝品的乳化劑。另外，褐藻酸鹽可與二價陽離子如鈣或鎂等，形成網狀結構之膠體離子錯化合物，生醫應用上使用褐藻酸鹽包覆動物/人體細胞或藥物的載體，做為再生醫學或組織工程、藥物釋放之用。

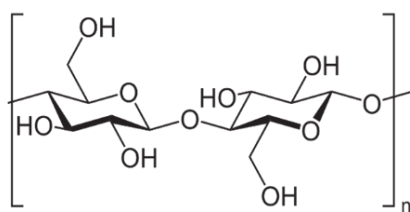
([https://en.wikipedia.org/wiki/Alginic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Alginic_acid))



圖四十八

3-5 纖維素及其衍生物 (cellulose, 圖四十九): 為構成植物體木質部與其表皮細胞的主要成分，為自然界存在最為豐富的有機高分子。其化學成分上約含 44.4% 碳、6.2% 氫、以及 49.4% 氧。由於纖維素不易被水及大多數溶劑溶解，因此 必須經過高溫酯化等化學反應後製成特定結構體。目前此材料多做成薄膜或中空纖維，應用在血液透析。

(<https://en.wikipedia.org/wiki/Cellulose>)



圖四十九

### References:

1. <http://www.acttr.com/tw/tw-faq/tw-faq-nmr/357-tw-faq-what-is-crosslink-density-how-to-measure.html>
2. Polym. Chem., 2015, 6, 25-29
3. Chem. Soc. Rev., 2015, 44, 815-832
4. [http://www.sohu.com/a/126788986\\_472924](http://www.sohu.com/a/126788986_472924)
5. Odian, George. Principles of Polymerization 4th. New York: Wiley-Interscience. 2004. ISBN 978-0-471-27400-1.
6. Journal of Molecular Catalysis A: Chemical. 1998, **133** (1 - 2): 191 - 199
7. W. H. Carothers. Studies On Polymerization And Ring Formation. I. An Introduction To The General Theory Of Condensation Polymers. Journal of American Chemical Society. 1929, **51** (8): 2548 - 59.
8. Science of Silicone Polymers, Silicone Science On-line, Centre Européen des Silicones - CES
9. Garden State EnviroNet Statement on NRC Silicone Foam Issues
10. 食品添加劑手冊. 化學工業出版社. ISBN 9787502538538.
11. [http://www.mingdao.edu.tw/physics/pdf/optional\\_08.pdf](http://www.mingdao.edu.tw/physics/pdf/optional_08.pdf)
12. Painter P. C. and Coleman M. M., *Fundamentals of Polymer Science*, CRC Press, 1997, p 14
13. 高分子化學 (增強版). 化學工業出版社. 2007: 307 - 309
14. <https://zh.wikipedia.org/wiki/%E5%85%B1%E8%81%9A%E7%89%A9>
15. <https://baike.baidu.com/item/%E6%9C%AC%E4%BD%93%E8%81%9A%E5%90%88>
16. <https://baike.baidu.com/item/%E4%B9%B3%E6%B6%B2%E8%81%9A%E5%90%88>
17. <https://baike.baidu.com/item/%E6%82%AC%E6%B5%AE%E8%81%9A%E5%90%88/10880486>
18. <http://psdn.pidc.org.tw/ike/doclib/2003/2003doclib/2003ike21-0/2003ike21-0-307.asp>

# 複合材料

李國榮<sup>1</sup>、林樹均<sup>2</sup>、戴念華<sup>2</sup>

<sup>1</sup>義守大學材料科學與工程學系<sup>2</sup>清華大學材料科學與工程學系

## 1、概述

人類文明的進步與材料科技的發展有密不可分之關係，而材料科技的發展是經歷了一個相當漫長的探索過程；經過數百年的努力，人們意識到單一材料的性能已難滿足高科技與現代化生活的需求，才瞭解將兩種或兩種以上的材料結合在一起，截長補短以獲得性能更優異的新材料，此種新材料便是所謂的『複合材料』。目前複合材料已成為航太、國防與民生工業等領域中不可或缺的重要材料，許多已開發國家已將先進複合材料的研發視為國家安全及經濟發展極重要的關鍵因素。複合材料最著名的應用例子就是最重視輕量化的飛機材料，不管是軍用戰機(圖 1)或者民航機(圖 2)都大量使用複合材料。尤其是 2010 年上市的波音 787，複合材料使用占體積比達 80%，換算成重量比為 50%，聲稱每個座位減輕 30% 的重量，主要使用碳纖複合材料，除了機身、結構外，複合材料也應用在噴射引擎的壓縮器葉片與引擎罩。



圖 1 使用大量複材的 F-35 及 F-22 戰機[<http://big5.sputniknews.cn/military/201803291025025736/> & [http://big5.china.com.cn/military/txt/2012-05/15/content\\_25387539.htm](http://big5.china.com.cn/military/txt/2012-05/15/content_25387539.htm) ]



圖 2 使用大量複材的波音 787 及空中巴士 A380 客機

[<https://www.wired.com/2013/01/faa-boeing-787-review/>,  
<https://www.seatmaestro.com/the-inside-scoop-on-the-airbus-a380/>]

## 2、複合材料的定義與分類

什麼是複合材料？其英文為 composite materials 或只寫成 composites，主要是結合兩種相的材料，其中一種材料稱為強化相 (reinforcing phase)，通常是以纖維、薄片或顆粒等形式埋入另一稱之為基材相 (matrix phase) 的材料內，其強化相材料與基材相材料可互為金屬、陶瓷或高分子材料，藉由各種製程技術組合成新型的多元多相的固體材料，除保留原組成材料的主要特色外，藉由透過適當的材料設計使各組成材料的性能互補、調和，從而獲得新的優越性能。

其中，強化相通常會以較小尺寸的型態存在，其原因在於當材料的尺寸小到某種程度(如奈米、微米...等)，材料內部的缺陷就較少，材料所表現出來的性質就會較為優異。此外，若強化相為纖維型態(圖 3)，其極高的長度/直徑比(aspect ratio)，能更有效的強化，因此適合作為複合材料中補強之用途。

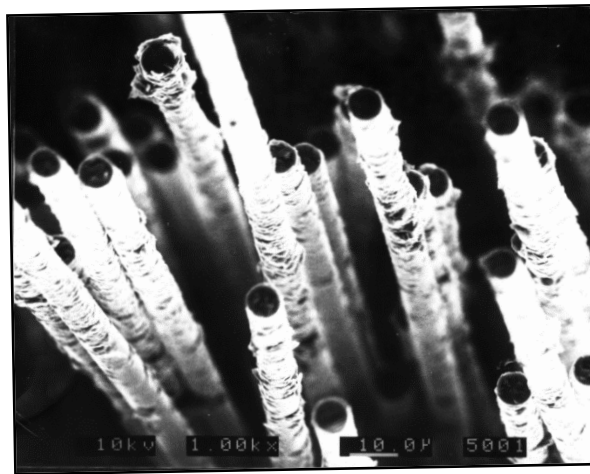


圖 3 電子顯微鏡下的碳纖維[義守大學材料系李國榮教授提供]

另一值得注意的是，複合材料的強化相和基材相之間的界面(interfaces)，由於在複合材料製作過程中所產生複雜的物理或化學鍵結等因素，在界面附近微區的結構、型態與性能變化對複合材料的性能表現亦有重大之影響，因此可以說複合材料的性能是由其“基材相”、“強化相”及兩者間“界面的交互作用”所控制的。

複合材料通常有以下幾種分類方式：

- (一)按基材類型分為：1. 高分子基複合材料 (polymer matrix composites, PMC)； 2. 金屬基複合材料 (metal matrix composites, MMC)； 3. 陶瓷基複合材料 (ceramic matrix composites, CMC)； 4. 碳基複合材料等。
- (二)按強化材幾何形態分為：1. 顆粒強化型複合材料； 2. 連續纖維強化型複合材料； 3. 短纖維或晶鬚強化型複合材料； 4. 片狀材料強化型複合材料； 5. 纖維編織強化型複合材料； 6. 積層狀複合材料 (二維)； 7. 奈米複合材料等。

而有關複合材料的命名方法，通常是將強化相(或分散相)材料放在前面，基材相(或連續相)材料放在後面，之後再輟以複合材料。如碳纖維和環氧樹脂所構成的複合材料，稱為碳纖環氧樹脂基複合材料，常寫成“碳纖維/環氧樹脂複合材料”或簡寫成“碳纖/環氧樹脂”；由硼纖維與鋁所構成的複合材料稱為“硼纖維鋁基複合材料”，簡寫為“硼纖/鋁”，以此類推。

### 3、複合材料的歷史沿革

在自然界中有許多天然的複合材料，如竹、木、椰殼、骨骼等，以木材為例，其結構為許多直徑不同的管狀纖維分散於木質素的基材中，纖維的直徑與排列疏密由表層到內層各不相同，表層纖維直徑小而排列緊密，內層則相反，這種複合結構提供極佳的強韌組合(圖 4)。

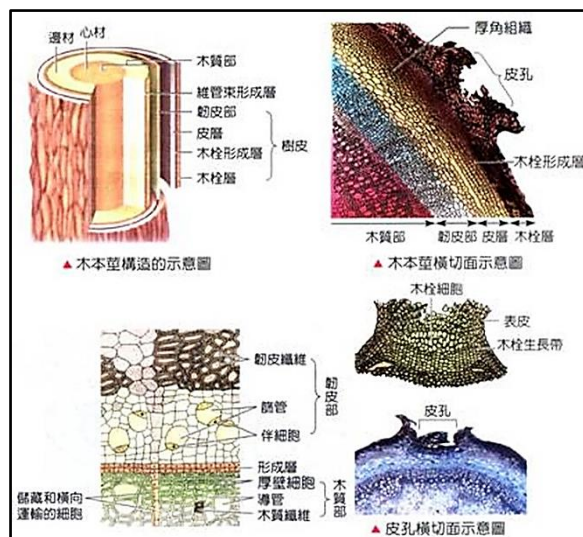


圖 4 木本莖橫切面組織

[<https://s0024037.weebly.com/33686303402241124907122892708336896332872115133021.html>]

人類很早就有製造所謂複合材料的智慧，如考古學家在距今 7000 年前的西安半坡遺址中發現用草拌泥製成的牆壁和磚坯(圖 5)，這種建築材料的性能既優於草，又優於泥，此說明人類早已了解複合材料的性能優於單一材料。



圖 5 稻草強化泥土 [<https://bashny.net/t/en/295145>]

材料科技發展到 20 世紀中葉，複合材料製品已不單純是天然材料的複合組合了，而是在高分子、冶金、陶瓷、化學、力學、機械等科學基礎上，形成集研發、設計、生產、應用於一體的系統。而近代複合材料的發展從基材上來看首先是軟基材，然後逐漸發展到較硬和更硬的基材，即從高分子到金屬到陶瓷基材。

有關複合材料發展的概念始自於橡膠的應用：西元 10 世紀前南美洲亞馬遜河流域的居民，就用天然橡膠的樹脂液塗於布上，待乾燥後成為防水布；接著在 19 世紀中葉及 20 世紀初期因橡膠加工的二項發明(加硫及加碳黑)，大大提升橡膠的品質，而發展沿用於汽車之輪胎至今。

### 3.1 高分子基複合材料

在眾多高分子基複合材料(PMC)中，以纖維強化高分子(塑膠)基複合材料 (fiber reinforced polymer (plastics): FRP) 的發展最具代表性，隨著各類纖維及高分子樹脂陸續開發，玻璃纖維 FRP 在 1930~1940 年代開始蓬勃發展。1950 年代末期，由於耐熱性纖維的需求，美國人將 rayon (縲縈纖維) 碳化製成碳纖維，並於 1959 年由美國 Union Carbide 公司開始生產。在此同時，日本大阪工業研究所在 1959 年發明用 PAN (polyacrylonitrile, 聚丙烯腈) 纖維製成 PAN 基碳纖維。此外，日本之吳羽化學則使用分解原油製造乙烯 (ethylene) 或乙炔 (acetylene) 之副產物-瀝青 (pitch) 為原料，製造瀝青基碳纖維。1950 年代之後藉由高性能強化纖維與高性能樹脂的組合，製成性能更優異的 FRP 複材，如石墨纖維/環氧樹脂、克維拉纖維/環氧樹脂、碳纖維/聚醯亞胺樹脂等多樣性組合。

### 3.2 金屬基複合材料

由於高分子基複合材料耐熱效果有限，因此科學家進一步設計將耐熱性、高模數、高強度纖維或顆粒埋入金屬基材製成耐熱性較優異的金屬基複合材料 (MMC)。在 1960 年代後半，美國已研發出硼纖維/鋁金屬 (B/Al) 的結構材料，用於太空梭的部份組件，包括主骨架、肋條、制動器支撐架等，比原鋁合金構件重量減輕 44%。1970 年代末，人們開始採用石墨纖維和碳化矽纖維作為強化材料製造 MMC，在性能上彌補單一金屬材料的不足，使材料的耐磨性、耐熱性、抗潛變等性質均有較大的提升。而 1980 年代發展了能將鋁、鈦、鎳等金屬間化合物等性能較高的金屬作為基材的成型技術，進一步推動了 MMC 的發展。但由於 MMC 的製程較高分子基複合材料困難，導致其產量及應用範圍均不及 FRP。

### 3.3 陶瓷基複合材料

陶瓷基複合材料 (CMC) 是在 1970 年代第一次石油危機發生後，為了節省能源及提升引擎高溫運轉之效率，所興起的一項集合現代多種科學成果的新技術。陶瓷材料具有強度高、硬度大、耐高溫、抗氧化、耐磨損、耐化學腐蝕、熱膨脹係數小、密度低等優良特性，這些優異性能是一般金屬材料、高分子材料及其複合材料所欠缺的，但由於陶瓷材料致命的缺點--“脆性、對缺陷敏感”，因此限制了它們的應用，因此科學家透過在陶瓷基材中加入顆粒、晶鬚 (whisker) 或長纖維等方式，藉由使 CMC 破壞過程中裂紋擴展、轉向，纖維脫粘、斷裂及由基材中拔出等界面延緩過程(圖 6)，吸收大量的外界能量，達到增韌(或補強)陶瓷、改善脆性的目的。

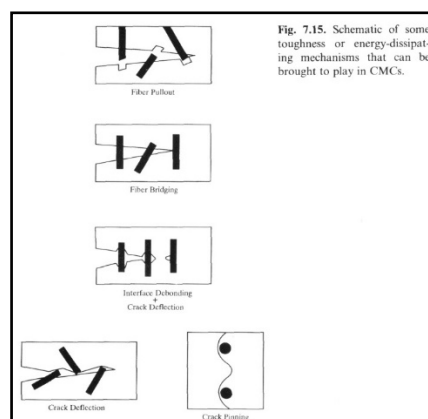


圖 6 陶瓷基複合材料韌化機制 [K.K. Chawla, Composite Materials Science and Engineering 2<sup>nd</sup>

CMC 發展的歷史較短，其應用範圍也較 FRP 窄，而 CMC 所用的補強纖維通常必須抗氧化、耐高溫，且須與基材間有物理和化學相容性，目前主要有氧化鋁、碳化矽、氮化矽，特殊抗氧處理的碳纖維等系列纖維，而作為基材的也是一些特殊的陶瓷材料，如氧化鋁、氮化矽、碳化矽、玻璃陶瓷等。

### 3.4 碳基複合材料

所謂碳基複合材料就是以碳纖維強化碳基材複合材料(carbon fiber-reinforced carbon matrix composites) 簡稱為碳/碳複合材料或碳/碳(carbon/carbon composites, C/C)，其中無論纖維或基材皆由單一碳材料所組成。碳/碳複合材料 (C/C) 的發現來自一次錯誤但美麗的實驗，1958 年美國 Chanco Vought 航空公司為測定碳纖維強化酚醛樹脂複合材料中的碳纖維含量，由於實驗過程的失誤，樹脂沒被氧化，反而被熱解(pyrolysis)而意外得到了碳基材。

C/C 是由碳纖維及其製品（碳氈或碳纖維布或碳纖維編織體）補強的碳基複合材料，其組成元素只有一個，即碳元素。它是一種性能極佳且具潛力的高溫結構材料。C/C 在 2000 °C 時仍能保持高強度和彈性模數、高斷裂韌性等優異的機械性質，甚至隨溫度升高，強度反而上升(圖 7)，並具有優異抗熱震性能。這使 C/C 成為目前唯一可用於耐溫達 3000°C(在絕氧的狀態下)的高溫複合材料。C/C 自 1960 年代問世以來大體經歷了四個發展階段，即 1960 年代完成了液相碳基材前驅體含浸(liquid carbon precursor impregnation)和氣相滲入法 (CVI) 的製程技術研究；1970 年代，應用開發研究，用作導彈及火箭噴嘴和飛機剎車片；1980 年代，熱結構材料應用開發階段，用作太空梭鼻錐體、機翼兩側前緣、機身腹部等構件；而從 1990 年代至今，則不斷致力研究於降低成本，開發新製程技術和民生工業之應用。目前 C/C 的研究水平已僅次於樹脂基複合材料，領先金屬和陶瓷基複材，且逐步開發更廣泛和多功能的工程應用。

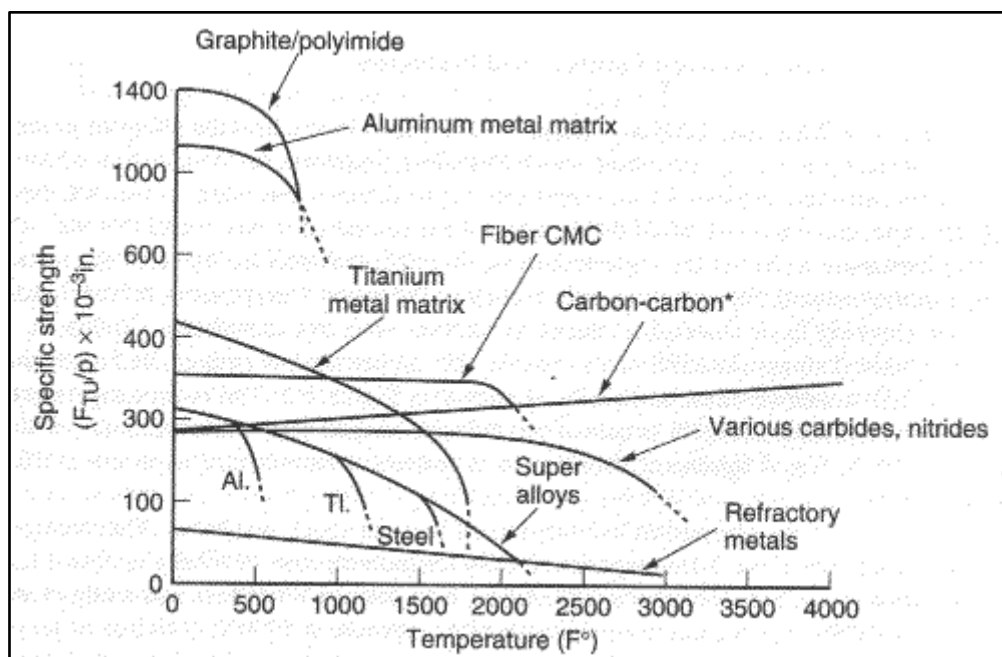


圖 7 碳/碳複合材料及其他材料高溫強度比較[<http://kansu.tripod.com/me451/2.html>]

#### 4、複合材料的特性

與傳統材料相比，複合材料最大的特點是可設計性，可透過適當的設計與調配獲得某特定需求之性質，即藉由組成材料的選擇和組合、界面控制、製程技術等方式進行設計和控制，以符合環境條件及應用性能要求，此種“材料設計”之概念在複合材料製作及應用中實踐的相當充分。此外，複合材料通常具有下列特點：

##### (1) 比強度、比模數高

材料的拉伸強度與密度之比稱為比強度，材料的彈性模數與密度之比稱為比模數。比強度和比模數高代表複合材料(特別是 FRP)具“輕質高強”之優勢。例如碳纖維強化環氧樹脂複合材料的比強度約為鋼的 5 倍，鋁合金的 4 倍，鈦合金的 3.5 倍；比模數約為鋼、鋁、鈦的 4 倍(圖 8)。

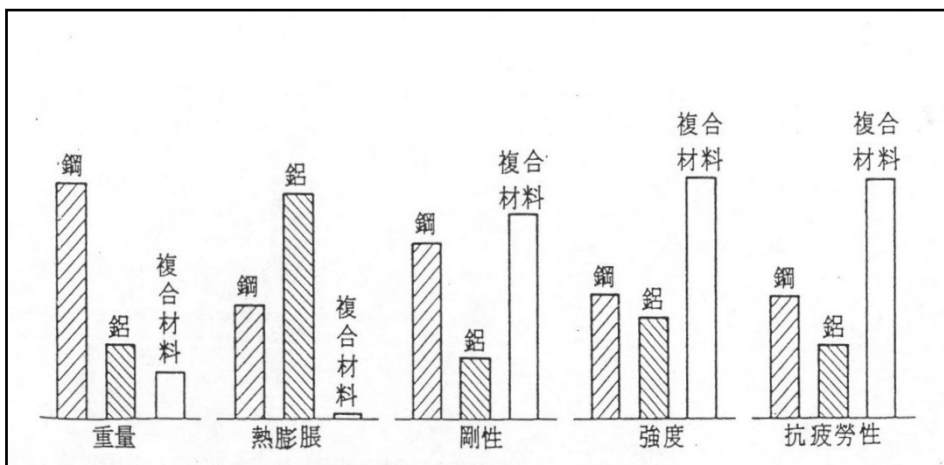


圖 8 傳統單一材料與複合材料性質比較[劉國雄、林樹均、李勝隆、鄭晃忠、葉均蔚，工程材料科學，全華出版社，1994，p733]

##### (2) 抗疲勞性好

所謂材料的疲勞是指即使在低的操作應力下，材料經長期反覆循環的交變負荷仍發生破壞之現象，通常金屬材料的疲勞強度為拉伸強度的 30-50%，而碳纖維樹脂基複合材料的疲勞強度則為其拉伸強度的 70-80%。因此，即使在長期交變負荷條件下的複合材料構件，仍具有較長的使用壽命和較佳的安全性。

##### (3) 安全性高

複合材料的破壞過程不似傳統脆性材料的破壞過程那樣突然發生，而是經過基材損傷、裂開、界面剝離、纖維拉出、纖維斷裂等一系列過程，所以當破壞發生，少數纖維發生斷裂時，負荷又會藉由基材的傳遞，迅速分散至由其他完好的纖維承受，藉此延緩了災難性破壞突然發生的情況。

##### (4) 阻尼減震性佳

受力構件的自振頻率除與形狀有關外，還與結構材料的比彈性模數平方根成正比，因此高比模數的複合材料有較高的自振頻率，此外，複合材料基材與纖維間的界面具有較大吸收振動能量的能力，因此使複合材料振動阻尼較高。



## 5、複合材料之應用

雖然複合材料的種類眾多，應用領域也相當廣泛(圖 9)，但是目前各種工業所使用的複合材料製品仍以高分子基複合材料佔最大宗，其主要原因除價格便宜、質輕外，最重要的是其製程較其他複合材料簡易、迅速。可惜的是，高分子基複合材料受限於基材之特性，因此其耐溫能力較其他複合材料為低，雖一直努力朝開發高溫高分子基材發展，但仍無法與碳/碳複合材料及陶瓷基複合材料相比擬。所幸除部分航太、國防工業組件需使用耐高溫之複合材料外，大部分的民生、運輸等工業組件之使用溫度，均在高分子基複合材料所能提供之範圍。



圖 9 複合材料的應用領域

### 5.1 航太領域之應用

二十世紀初，木材、鐵絲及布為飛機材料之主要來源，而在二次世界大戰後，強調高強度、抗腐蝕性的鋁合金材料成為飛機材料之主流，一直到 1960 年後，部分飛機之次結構件如鼻錐罩 (radome) 整流器 (fairing) 及副翼 (flap) 開始採用以玻璃纖維複合材料。隨著複合材料材質之不斷改良及提升，複合材料在飛機上使用部位亦隨著擴大，主結構件、次結構以複合材料取代金屬材料更是比比皆是。新一代強調速度、匿蹤及操控性的各類戰機 (前面圖 1)，更是使用大量的複合材料。而商用的民航客機最為知名的為兩大飛機公司所生產之新世代巨無霸客機，波音 787 及空中巴士 A380 (前面圖 2)：其中波音 787 碳纖複材用量約 21~24 噸/架；空中巴士 A380 碳纖複材用量約 37 噸/架。

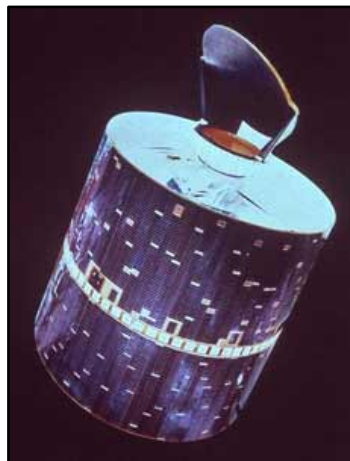


圖 10 日本櫻花 2 號通訊衛星 [[http://space.skyrocket.de/doc\\_sdat/cs-2.htm](http://space.skyrocket.de/doc_sdat/cs-2.htm)]

而在太空領域的應用上，各類太空結構組件必須具備重量輕、尺寸安定性佳及抵抗外太空惡劣環境之關鍵需求，此也是複合材料被大量用來取代金屬材料之主因。如日本在 1983 年發射之櫻花 2 號通訊衛星（圖 10）之中心圓筒（直徑約 1 米，高 1.5 米）是用碳纖維複合材料製成，重量僅 18 公斤為傳統鋁金屬的一半。另外，太空梭在進出大氣層鼻尖及翼端瞬間溫度可高達 1650 °C，而商用客機在緊急剎車時，剎車碟片溫度高達 1350 °C，在此種高溫的嚴苛條件下，許多材料的強度均已下降且無法支撐，唯有碳/碳複合材料具有質輕、耐極高溫、低磨耗等優異性能，可作為飛機剎車片、太空梭鼻錐體材料，以及做導彈及火箭噴嘴（圖 11）。

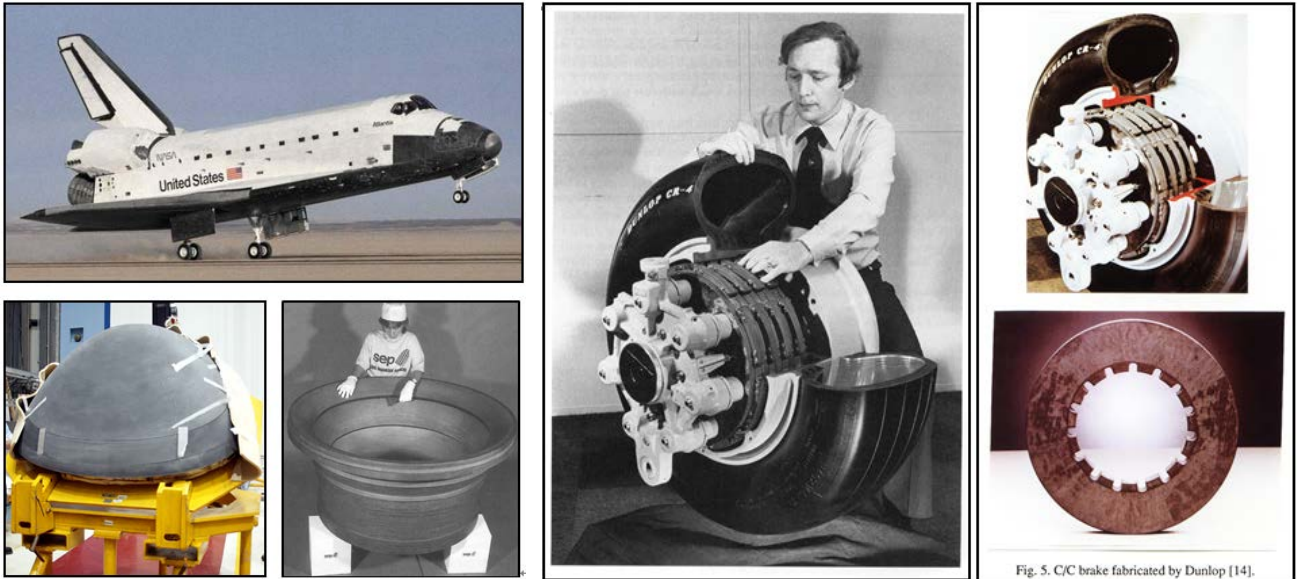


圖 11 碳/碳複材用於太空梭鼻錐體、火箭噴嘴及飛機剎車片[E. Fitzer, Carbon Reinforcements and Carbon/Carbon Composites, Springer, 1988, p.318,

<https://chicago.cbslocal.com/2013/05/20/sw-side-school-dedicates-sculpture-to-crew-of-columbia-space-shuttle/>]

**5.2 運輸工具之應用**

**(1) 汽車**

傳統之汽車工業以鋼鐵為主要材料；但隨著汽車輕量化之要求，利用塑膠或複合材料來取代金屬材料是最直接有效之方法。自 1970 年代起，汽車工業製造商即利用纖維強化高分子基複合材料製造汽車零組件，取代原先的金屬製品，其數目已達數百種以上，包括保險桿、後視鏡座、輪圈蓋、通風隔板等；而在內裝件方面則有儀表板、門柱、內飾板等，其他部分有儀錶板支承件、車門、座椅、車身面板、燃料油箱、引擎蓋、電氣連接器、散熱風扇等（圖 12），這些汽車零組件之生產方式大多以射出成形佔多數，主要是以短纖維補強丙烯腈丁二烯苯乙烯 (ABS) 及尼龍等高分子基材製作，藉此增加零件之機械強度。其他如底板等大型構件或受力較大之零組件則以編織布、不織布長纖等材料利用手工積層法、模壓或樹脂轉注成形方式來生產。而即使複合材料較為昂貴，現在也有愈來愈多的高級車以碳纖維打造車身（圖 13）。

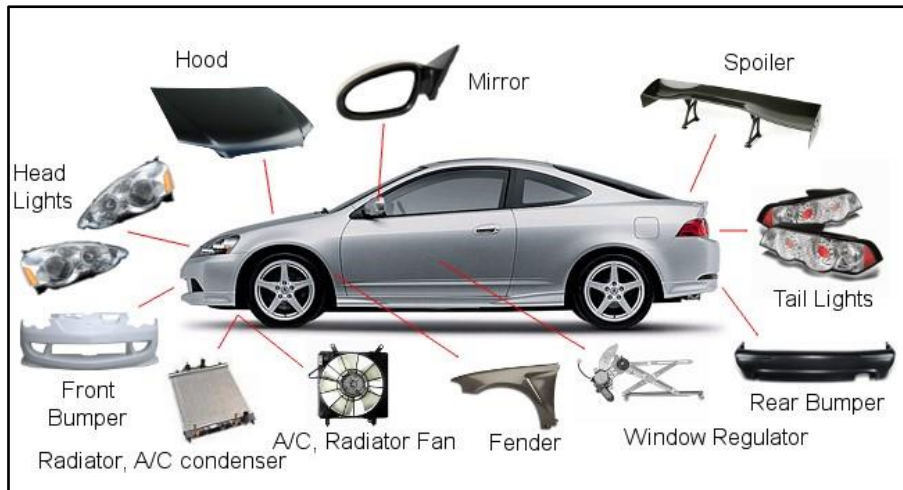


圖 12 以複合材料製作的汽車零組件

[<http://www.lfirt-plastic.com/news/why-car-front-end-modules-love-long-glass-fibe-11182003.html>]



圖 13 以碳纖維打造車身的 Lamborghini Aventador

[<https://www.autoevolution.com/news/lambo-aventador-based-mansory-carbonado-is-a-carbon-dream-55888.html>]

## (2) 自行車

目前自行車已不僅是代步工具，自行車運動已蔚為一風潮，不管男女老少，不限環境場域，總有許多自行車愛好者騎單車馳騁在鄉野林道或都市叢林，而其中碳纖維自行車已成為引領潮流，風行全世界之指標，台灣也成為碳纖維自行車製造的大本營。許多自行車零組件幾乎都採用複合材料，主要複合材料結構件有車架、前後叉、手把、輪框等；而配件種類更有很多複合材料製品，從剎車把手、變速架、踩踏曲柄到水壺架等，幾乎可說是全複合材料自行車；其中碳纖維複合材料自行車不僅具有輕量化、高強度等優異特性，其優異的吸震能力，即使騎乘在顛簸的道路上，也可提供騎乘者更佳的平順及舒適感而減少疲勞(圖 14)。



圖 14 碳纖維自行車及其組件[<http://cool3c.incar.tw/article/61204>]

### (3) 摩托車

擁有一台外型超炫、超帥、性能超強的摩托車是許多男人之夢想，近期已有愈來愈多的摩托車(特別是越野機車及重型機車)採用複合材料作為其組件，如 Renard Motorcycles 是採用碳纖維複合材料車架，車架重量僅 6.8 kg (圖 15)。而 YAMAHA 公司所生產的 GMT94 機車也採用大量的碳纖維複合材料作為零組件(如引擎蓋隔熱板、輪胎支架、排氣管等)，除提供輕量化及優異強度外，亦提供極佳的散熱效果，同時纖維的織紋讓車身更具美感(圖 16)。另外，機車用的安全頭盔也已開始採用碳纖維或玻璃纖維高分子基複合材料製造，BMW 公司生產了一頂號稱世界最輕的碳纖維頭盔，提供騎士更安全、舒適及美觀的選擇(圖 17)。



圖 15 Renard Motorcycle

[<http://www.csi-composites.fi/asiakasratkaisut/vauhtia-ja-vaantoa-moottoripyoran-runko/?lang=en>]



圖 16 YAMAHA GMT94 機車[<http://photos.gmt94.com/saison-2009,154,4,6,bub-composites.html>]



圖 17 BMW 公司生產的碳纖維頭盔

[<https://advrider.com/index.php?threads/new-carbon-fiber-bmw-helmet.33977/>]

#### (4) 大眾運輸工具

複合材料具質輕、易於一體成型且較易製作大型曲面零件，耐腐蝕、阻燃耐火等優點，因此可應用在講求高速化、省能源、及車廂舒適化之大眾運輸工具，如高速火車、捷運、地鐵等軌道車輛的組件，均已大量採用 FRP 複合材料，如以碳纖維複合材料製造高強度的流線型車頭前端頭蓋、座椅骨架、轉向架構件等，並用來取代傳統軌道車輛上由鋁板、鋁蜂窩等材料做成的牆板、頂板、間壁、座椅骨架、司機台等內飾部件，均大大減少全車之重量，例如日本鐵道技術研究所與東日本鐵道公司聯合研製的 CFRP 高速列車車頂，每節車廂可減重 300~500 kg；德國福伊特公司推出的碳纖維複合材料過渡車鈎，總重量僅 23 kg，比鋼鐵過渡車鈎減重一半；而法國 TGV 雙層車體所採用的蜂巢夾層複合材料(圖 18)，則較鋁製車體減重達到 25% 以上。



圖 18 法國 TGV 車體採用蜂巢夾層複合材料

[<https://www.happyrail.com/en/tgv-lyria>,<https://www.wired.com/2014/12/aluminum-foam-trains/>]

#### (5) 船舶之應用

複合材料具有重量輕、比強度和比剛度高、耐疲勞、耐化學腐蝕、耐磨性好、熱膨脹係數低等優點，因此深受造船界的重視。從 1940 年代美國海軍首次將複合材料用於船舶建造，開始掀起了船舶建造的新篇章，而美國也是目前複合材料造船量的世界首位；1996 年美國製造的探海艇，是以石墨纖維強化環氧樹脂的單殼結構，可下潛 6096m 的深度；2006 年美國所建

造的 M80 Stiletto 是最新型高速隱形快艇(圖 19)，是以一次成型的最大碳纖維船體，由於無焊接、無鉚接的技術工藝，大幅度實現船隻整體輕量化，使快艇能輕易獲得較高航速。

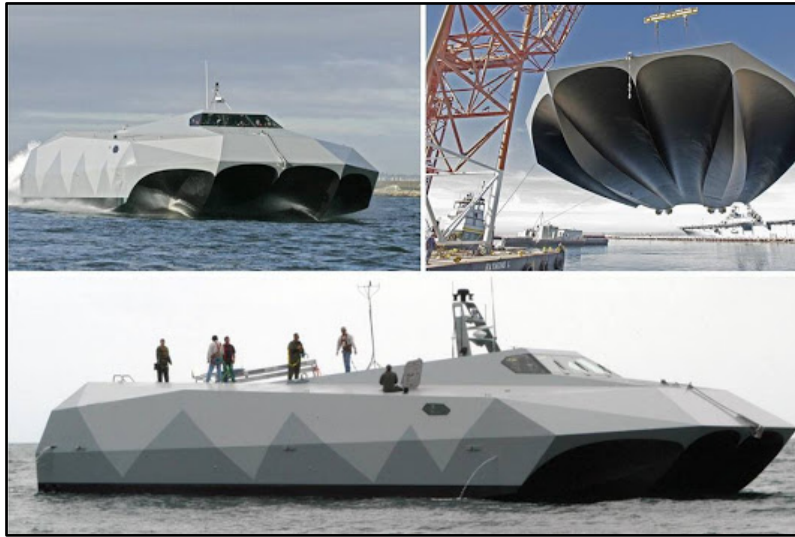


圖 19 以碳纖維為船體的 M80 Stiletto 高速隱形快艇

[<https://plus.google.com/+DavidArkwright/posts/L8dQgcVyX3i>]

日本則在 1960 年代初成為美國遊艇承包建造基地，為後來建造複合材料漁船和大型艇奠定了基礎。到了 1993 年，日本複合材料漁船的數量就已經超過 32 萬艘，複合材料遊艇則超過了 20 萬艘。

目前全世界各國已相繼研製各類複合材料船舶，FRP 複合材料已逐漸使用在快艇、遊艇、賽艇及拖網漁船等小型商業漁船，甚至水上摩托車上(圖 20)。而用於船舶零組件的複合材料主要有碳纖維，芳綸纖維和玻璃纖維等；複合材料船體的典型結構形式則主要有五種：單板加肋結構、夾層結構、硬殼式結構、波形結構及其混雜結構。



圖 20 複合材料用於各類船舶工具

[<http://www.asia-pacificboating.com/news/2017/05/heesen-sells-47m-project-ruya-to-american-owner>, <https://kknews.cc/news/9lxoqq.html>, <https://www.topazsailboats.com/why-topaztopper/topaz-arg-o/#prettyPhoto>]

## (6) 磨擦材料之應用

所謂磨擦材料是指利用(或強調)材料的磨擦特性，帶動(離合器)或停止(煞車)物體運動的材料。其應用範圍非常廣泛，包括渦輪葉片、引擎汽缸、軸承、齒輪、軸封、煞車(brake)系統、離合器(clutch)系統及人體的關節等，其中以煞車及離合器系統所使用之磨擦材料為最主要且最大量的應用。應用於煞車及離合器系統中的磨擦材料主要是製成碟片(disk)、來令片(lining)或襯墊(pad)等型式之組件(圖 21)，在煞車過程中各組件彼此對磨，而將動能轉換成熱能，使熱能被材料吸收或發散至大氣中，同時透過制動時的磨擦作用，減少磨擦材料與對磨材料間的相對運動，藉此停止或帶動機件。大致而言，磨擦材料實屬一混合型的複合材料，主要由基材(matrix)與強調各功能特色的潤滑劑(lubricant)、摩擦調整劑(friction modifiers)及強化材(reinforcement)構成，所注重及強調的為其磨擦及磨耗功能之特色，若依據使用能量範圍不同分類，大致可分為橡膠基磨擦材料、有機類(石棉系、非石棉系及半金屬基)磨擦材料、金屬基磨擦材料、碳基磨擦材料及陶瓷基磨擦材料等。



圖 21 各類煞車及離合器系統組件及磨擦材料

[<https://www.wahlee.com/ZH/Products/Details/?id=CPgPo21BnVXRkPta2vniCw==&Top=vXieWLdaf3QpULKohE4j4Q==>]

1998 年 Porsche 和德國航太實驗室(DLR)共同研發 carbon ceramic brake，1999 年德國法蘭克福國際汽車大展中，Daimler-Chrysler 汽車公司首次展出其研發的陶瓷煞車片，而此陶瓷煞車片是採用高溫熔滲(melt infiltration)及反應鍵結(reaction-bonding)之方式所製成的碳/碳-碳化矽複合材料(圖 22)。根據 Daimler-Chrysler 公司指出，使用重量輕(密度僅為鑄鐵的 1/4~1/3)、耐高溫且敏感度高(可輕易地達到煞車效果)的陶瓷煞車片，可提高煞車片約 10 倍壽命，因此目前部份高價位系列轎車大都使用陶瓷基煞車模組系統，如：Mercedes-Benz、Porsche Series、Ferrari、Audi A8、Alfa Romeo 等。



圖 22 碳/碳—碳化矽複合材料陶瓷煞車片組件

[<http://therealcarsreviews.blogspot.com/2013/11/carbon-ceramic-brakes-vs-conventional.html>,  
<https://www.motorpasion.com/tecnologia/hacia-los-frenos-ceramicos-de-carbono-mas-asequibles>]

### 5.3 民生工業運動器材之應用

複合材料在民生應用上最大宗的就屬運動器材，從 1970 年代碳纖維複合材料製程普及化後，複合材料就逐步應用到各式各樣的運動器材上。高強度碳纖維複合材料具有質輕、高強度、高剛性、低膨脹係數、耐腐蝕及阻尼性能好能吸收更多的振動等眾多優點，讓球拍製造商在球拍的勁度、球感、擊球性能等設計上有更自由的空間。常用之運動器材包括網球拍、羽球拍，高爾夫球桿、釣魚竿、壁球拍、撐竿跳竿及運動護具等（圖 23）。以高爾夫球桿為例，以 CFRP 所製造的球桿較原先金屬桿重量減了約一半，而其強度、勁度不減，其製作方式有纏繞法及手捲法兩種，而其使用之樹脂大致為熱固性環氧樹脂；但由於熱塑性塑膠之阻尼性佳，可帶給打球者較舒適之感覺，因此相信在不久之將來熱塑性複材生產之運動器材將取代熱固性複材，而在市場上佔有率也將大幅提升。

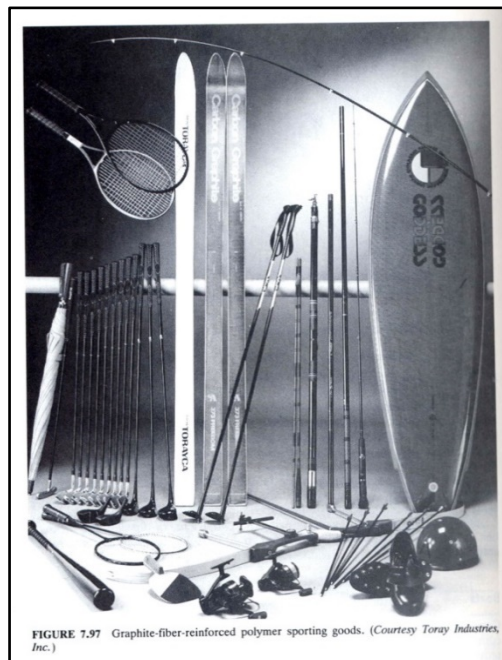


圖 23 各類碳纖維複合材料運動用品

[[https://www.researchgate.net/figure/Carbon-fiber-reinforced-polymer-sports-equipment-courtesy-Toray\\_fig16\\_318760459](https://www.researchgate.net/figure/Carbon-fiber-reinforced-polymer-sports-equipment-courtesy-Toray_fig16_318760459)]



## 5.4 建築工程之應用

複合材料在建築業中主要應用領域包括：纖維強化混凝土、纖維強化高分子建材、碳纖維複合材料補強貼片和其他應用（如非承重牆板、防水防腐蝕塗層、電磁屏蔽板和導電板、耐磨鋪耐化學腐蝕地板等）。日本於 1972 年首先以玻璃纖維強化混凝土(GRC)，開啟複合材料在建築工程應用之門，其中以瀝青短碳纖維強化混凝土，拉伸強度與彎曲強度較傳統混凝土高 5~10 倍，延伸度高 50~60 倍，且撓曲延展性高 200~300 倍；而質輕、耐蝕、耐候、耐燃、可設計性佳及強度高的 FRP 複材則可用於製作各式各樣的建築組件如門窗、框、浴缸、盥洗設備、廚具、雕像等（圖 24）；碳纖維補強貼片則是取代傳統以鋼板補強方式，利用碳纖維布包覆在因地震、天災等因素而受損開裂及鋼筋外露的鋼筋混凝土結構體，藉此提升受損結構體的強度及耐震能力，由於碳纖維布柔軟度佳、抗腐蝕、且質輕不會對原結構體造成負擔，加上施工時可較不受空間限制，也不須大型施工機具，因此極適合應用任何空間的補強作業，如涵洞、隧道、橋樑、古蹟等修護工程（圖 25）。

### 建築新感覺

為您實現設計上的理想境界  
為您解決施工上的困難習題

**GRC玻璃纖維強化水泥製品**

產品項目：建築土木景觀

建築外觀線板、造型、羅馬柱、扶手欄杆、壁飾、浮雕、花台、預嵌磁磚帷幕牆、玄關、隔音牆、雨庇、仿石假山、水景、花鉢、水鉢、造型模板、水溝（蓋）、其他特殊造型、專業製模生產

歡迎垂詢或來函

台中都會公園   國家圖書館二樓消防梯   鹿港府前街   仿石欄杆   仿石圍牆

### GRC.FRP.GRG 藝術造型製品廠

本公司為配合21世紀市場的潮流需求、夢想及真摯獨特造型、取代傳統呆板而無變化之造型。新建材運用現代傳統機械、造型新、精緻美日新造型、提升居住之觀美。服務項目及造型尺寸不在此圖面所示，可依建築設計所需，任意變度皆可配合。

**總工程款可省下30%或營造成本可省30% 工程進度快1/3**

營業項目：GRC、FRP、GRG強化纖維石膏板、一級防火建材、防震PPE纖維加勁筋骨材

- 專業的住宅別墅造型創造者服務項目含施工、設計。
- G.R.C：文化石材庭園設計及各種藝術品、壁燈組合壁。
- 羅馬柱、各型座底、陽台扶手、廣角窗、老虎窗、窗台座、花台、玄關、樓梯、垂簾花簾花、線板、造型屋頂、側窗屋頂。
- 火磚牆美牆、主屋梁牆、瀑布、外觀造型雕塑、泥塑、廟宇、靈骨塔、歐式巴洛克風格建築造型...等。
- 歡迎各設計師設計高難度、雄偉的造型。新舊大樓外觀造型工程、中庭、歐式設計。
- PPE應用：主結構、護土牆、隧道、橋樑、碼頭、海（河）堤、垃圾掩埋場、海埔新生地...等。

圖 24 各類纖維複合材料在建築業中應用實例

[<http://12358.chinawww.com.tw/edm.html>], [<http://www.tsf.com.tw/edm.html>]



圖 25 碳纖維補強貼片 [[http://strongsolid.blogspot.com/2016/08/blog-post\\_10.html](http://strongsolid.blogspot.com/2016/08/blog-post_10.html),  
<http://www.solid-base-eng.com/design/2016-01-291/index.html>]

另外，塑木複合材料（Wood-plastic composites；WPC）的組成，主要是採用廢棄木粉（腳料、鋸屑等）、農業纖維（稻稈、稻糠、果殼等）、植物纖維（亞麻、黃麻等），與高分子塑料（包括PE、PP、PVC 等新料或再生熱塑性塑膠）配方原料複合而成，由於其原料絕大部份為廢料，生產過程低污染且產品可以回收重製，因此相當符合環保及節能等議題的產品，所以也稱為「綠塑木」。塑木複材產品具有無毒性、耐衝擊性、具有防水及抗酸鹼性、抗候性、耐汙染、抗菌性，易於保養維護等優於一般天然木材材質的特性。另一優勢為塑木可添加低煙無鹵阻燃劑，使其在燃燒時不會產生毒廢氣，可解決木料建材防火的問題，未來可望取代傳統木料建材，作為安全材質。塑木複合材料的適用範圍廣泛，包含有景觀造景、傢俱、木地板等地方（圖 26）。



圖 26 塑木複合材料 [[http://www.xajgw.com/supply/XiAn\\_85.html](http://www.xajgw.com/supply/XiAn_85.html),  
<http://www.ifuun.com/a2018030710746675/>]

## 5.5 醫學工程之應用

複合材料在醫學工程之應用主要包含生醫植入材及醫療器材兩方面，在生醫植入材方面，著重於材料的生物相容性、耐磨耗、耐蝕性及強度，主要是以顆粒狀的陶瓷粉末或陶瓷纖維為強化材，以高分子材料(丙烯酸樹脂)或陶瓷材料(氫氧基磷灰石、三鈣磷酸鹽)為基材所製成的

生醫複合材料為主，近年來也發展在金屬植入材表面被覆複合陶瓷膜以增加其耐磨耗、耐蝕性及表面生物活性。

在醫療器材之製作方面，所著重之功能在於複合材料之輕量化及高比強度及係數，目前已開發之器材包括輪椅、照射用床（圖 27）、義肢（圖 28）、假牙等。以複合材料所製作之醫療器材除具多功能性與可設計性外，其部分優異的特殊性能是傳統醫療器材所難比擬，以醫療床板為例，碳纖維複合材料製作之醫療床板，其X光之吸收度為傳統鋁床板的1/5，藉此可減低治療時輻射線因床板的反射所對人體造成的傷害，同時降低了人體對輻射線的吸收率。儘管以複合材料所製作之器材比傳統器材的成本高，所以早期在開發初期階段推展較為不易，但隨著製程技術的進步降低製程成本，及複合材料所製作之器材具有優異的性能，目前較先進的醫療器材已均採用複合材料，其需求量亦大為增加。



圖 27 各類複合材料醫療器材

[<http://www.geopolmonitor.com/worldwide-refurbished-medical-imaging-equipment-market-2021-applications-geographic-regions-opportunities-challenges-drivers-forecast/>]



圖 28 碳纖維複材義肢 [<https://bashny.net/t/en/295145>, <https://kknews.cc/zh-mo/tech/ea9bnay.html>]

## 5.6 電子電機方面之應用

複合材料在電子電機之應用十分多樣性，主要包含印刷電路板、電子構裝、揚聲器(喇叭)

零組件、電子連接器、電機產品等方面，在印刷電路板應用上，以玻璃布強化環氧樹脂銅積層板用量最大；電子構裝則以樹脂(環氧樹脂、聚亞醯胺樹脂)添加無機填充料(Silica、氧化鋁)及各種助劑所組成之複合材料為主；而 FRP 及碳纖維則大量使用於製作機電及 3C 產品的外殼；此外碳纖維近期則成為 Hi-Fi 音響喇叭的最佳選擇；最有趣的是碳纖維亦可應用來製作小提琴及吉他等樂器 (圖 29)。



圖 29 複合材料應用於在印刷電路板、揚聲器、樂器及 3C 產品外殼

[<https://detail.1688.com/offer/528838140362.html>, <http://clearcarbon.com/portfolio-items/carbon-violin-made-for-luis-and-clark/>]

在電子構裝中，如何將高密度 IC 或高功率 LED 大量廢熱排出，以免造成元件效率降低甚至損壞，最關鍵者是連接基板與散熱鰭片的均熱片(heat spreader)，其需要熱膨脹係數與基板相近，以避免使用時高低溫循環的熱漲冷縮造成界面裂開，喪失傳熱能力；而熱傳導係數越高越好。圖 30 所示的鑽石銀基複合材料均熱片，其熱膨脹係數大於銀的兩倍(達  $953 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )，熱膨脹係數只有銀的三分之一( $6.4 \times 10^{-6} / \text{K}$ )，這種高熱傳導低熱膨脹的鑽石銀基複合材料均熱片，在高密度 IC 或高功率 LED 電子構裝上有很好的應用潛力。

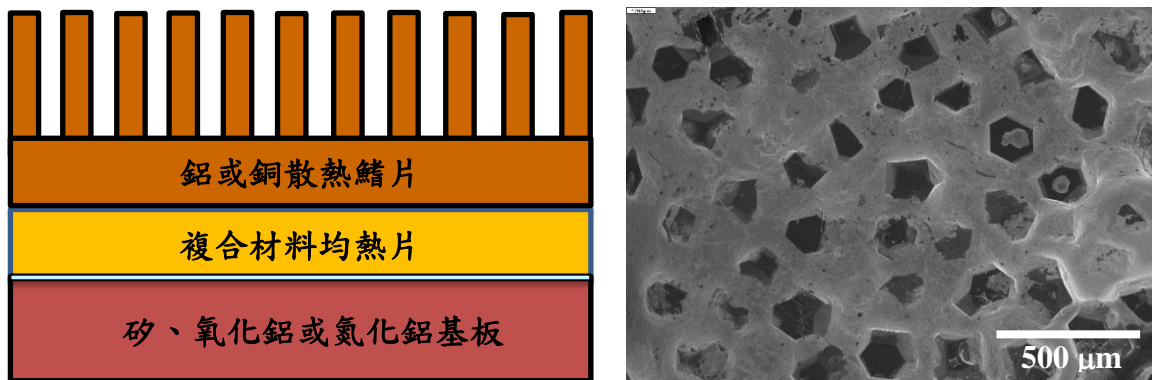


圖 30 左圖為電子構裝中均熱片用來將基板發出的熱快速傳到散熱鰭片，右圖為高熱傳導低熱膨脹的鑽石銀基複合材料均熱片的表面微結構，一顆顆鑽石嵌在銀基地上。[清華大學材料系林樹均教授提供]

## 5.7 其他應用

超硬合金(hardmetals)是一種複合材料，比高速鋼更耐溫、更耐磨，主要用在切削、鑽孔、模具上，如圖 31 左圖為常見的各種形狀切削刀具，材質可以是碳工具鋼、高速鋼、超硬合金、氧化鋁。超硬合金有兩種，一種以鈷黏結碳化鎢(WC/Co)，稱為黏結碳化物(cemented carbides)；另一種以鎳黏結碳化鈦(TiC/Ni)，稱為瓷金(cermets)。將鈷或鎳黏結金屬改成適當的高熵合金，做出來的碳化物/高熵合金複合材料，具有比一般超硬合金更高的硬度與韌性組合，除了可以降低鈷的毒性、減少成本外，還可以增加切削工具壽命，極具應用潛力。

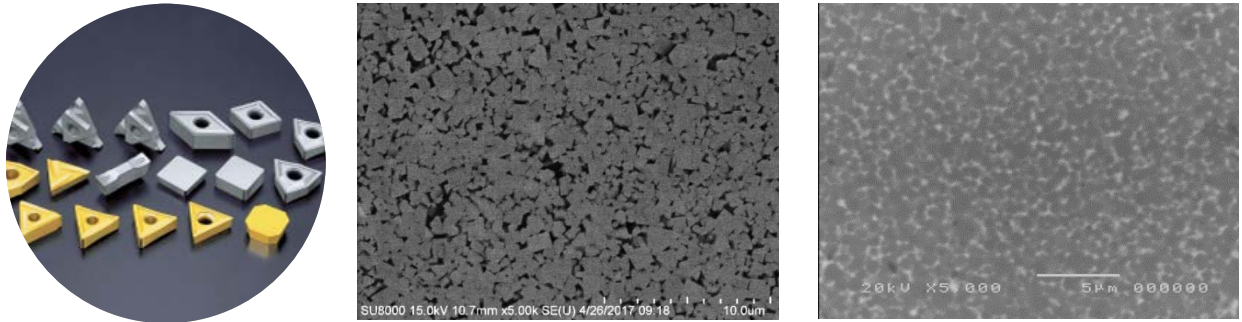


圖 31 左圖為常見的各種形狀切削刀具，金色者有鍍 TiN；中圖為更耐磨、壽命更長的新式超硬合金刀具，以高熵合金(黑色)黏結碳化鎢(灰色)，WC/10%CoCrMoNiTi；右圖為高熵合金(白色)黏結碳化鈦(灰色)，TiC/20%CoCrFeNiTi。[清華大學材料系葉均蔚教授提供]

複合材料除了上述各領域之應用外，也應用於能源領域，如海底油田探勘及開採的探油平台 TLP(Tension Leg Platform) 一座約用 200~1000 噸的 CFRP (圖 30a)。而風力發電最關鍵的部分是葉片，目前風力葉片已是 100% 的複材產品，主要是以玻璃纖維或碳纖維強化環氧樹脂(epoxy)複合材料為主(圖 30b)，而風力葉片的重量及剛性對風力發電是一重要因素，為避免大氣紊流造成葉片顫動或週期負荷導致疲勞破壞，加上葉片朝大型化發展，未來使用碳纖的需求度將大為提高。



圖 30 複合材料應用於能源領域 (a) 探油平台 (b) 風力發電

[<https://www.marinelink.com/news/production-projected353587.aspx>,

<http://www.acquisitionsdaily.com/2013/09/27/vestas-in-offshore-tie-up-with-mitsubishi/>]

## 6、複合材料的挑戰

儘管複合材料具備許多優異的性能，且對高科技尖端技術的發展有重要之影響，同時已成為航太、國防與民生工業等領域中不可或缺的重要材料，但是複合材料仍持續面臨許多挑戰急待持續地克服與突破：

1. 成本偏高影響競爭力，複合材料的組成原料一般較單一材料昂貴，特別是微小化的強化材通常都較昂貴，此外將不同材料進行組合的製程成本亦較高，造成所製成的複合材料單價都偏高，間接影響其應用競爭力。
2. 可靠性相對較差影響應用面，複合材料的性質因深受其組成(強化材及基材)、界面交互作用、製程方式及條件等眾多因素的影響，常造成各批次產品的規格、性質起伏較大，可靠性較差。
3. 回收困難，複合材料的回收是一棘手之挑戰，它不似金屬等材料能回收、重製、再利用，除了部分熱塑性基材複合材料可回收外，通常大部分的纖維複材在回收後，會以絞碎之方式，加入混凝土中，重製成纖維強化混凝土。

相信隨著科學技術的進步，目前複合材料所面臨的各項困難及挑戰將一一被突破與克服，而因應各類應用需求所設計開發的新類型尖端複合材料亦將不斷的推陳出新，而未來的世界對複合材料的需求度、依賴度及使用量也將不斷的提高。

## 7、參考文獻

- [1] 許明發、郭文雄 "複合材料-初版" 高立, (1998)
- [2] 許明發、郭文雄 "複合材料-第三版" 高立, (2007)
- [3] 許明發、柯澤豪、劉顯光、郭文雄 "複合材料入門" 尖端材料科技協會, (2005)
- [4] 徐國財、張立德 "奈米複合材料" 五南, (2003)
- [5] 周森 "複合材料:奈米 生物科技" 全威, (2002)
- [6] 劉佐光 "功能複合材料" 曉園, (2006)
- [7] 顧宜(主編)、林金福、林尚明、段維新、葉逸彥、嚴建國(審定) "複合材料" 新文京開發, (2002)
- [8] 吳人潔(主編)、段維新、翁慶隆、郭永聖(編) "複合材料" 新文京開發, (2004)