

出國報告(出國類別：進修)

赴英國雪菲爾大學進修授課型材料  
科學及工程理學碩士心得報告(The  
University of Sheffield, Master of  
Science in Material Science and  
Engineering)

服務機關：軍備局生製中心第 205 廠

姓名職稱：李宇軒 上尉

派赴國家：英國

出國日期：107 年 7 月 20 日至 108 年 9 月 25 日

報告日期：108 年 10 月 8 日

## 摘要

本次進修係奉國防部 107 年 7 月 3 日國人培育字第 1070010427 號令核定赴英國謝菲爾大學(The University of Sheffield)進修授課型材料科學及工程理學碩士。職於 107 年 7 月 20 日啟程赴英，於核定之修業期限內依學校規定取得畢業所需之 180 學分並完成論文繳交。職於 108 年 9 月 25 日返抵國門，並於隔日(26 日)向軍備局生產製造中心第 205 廠辦理報到手續，本心得報告係以職在英國進修期間針對進修課程、論文研究主題及學習心得作報告。報告格式分為摘要、目的、過程、心得及建議事項等五項。

# 目次

壹、目的.....	3
貳、過程.....	3
參、心得.....	40
肆、建議事項 .....	42

# 「赴英國謝菲爾大學進修授課型材料科學及工程理學碩士」

## 心得報告

### 壹、目的

本次進修係奉國防部 107 年 7 月 3 日國人培育字第 1070010427 號令核定赴英國謝菲爾大學(The University of Sheffield)進修授課型材料科學及工程理學碩士。上課地點為英國雪菲爾，期間分為三個學期，每學期約為 3 個月，根據系上修業規定，碩士畢業標準為取得 180 學分以上並通過論文評鑑；職的指導老師為 Dr. Adrian Leyland，主要研究方向為應用於液態腐蝕的鍍層其表面狀態與結構分析，在學期間修習計材料製程及其性質(Materials Processing and Characterization)等 9 門課程，共取得 180 學分。

### 貳、過程

#### 一、進修學校簡介

雪菲爾大學 (University of Sheffield) 是一間位於英國雪菲爾的大學。該校在 1905 年取得皇家憲章，其前身是 1828 年成立的雪菲爾醫學院，以及在 1897 年成立的雪菲爾大學學院。雪菲爾大學是英國六所「紅磚」高等學府之一，也是素有英國常春藤聯盟之稱的羅素大學集團成員之一。經過一百多年的發展，雪菲爾大學在教學與研究方面建立起卓越的聲譽，為英國 20 所最佳研究型大學之一，亦是英國眾多百年大學中，具有國際聲望的名校之一。



雪菲爾大學是英國六所「紅磚」高等學府之一，也是素有英國常春藤聯盟之稱的羅素大學集團成員之一。經過一百多年的發展，雪菲爾大學在教學與研究方面建立起卓越的聲譽，為英國 20 所最佳研究型大學之一，亦是英國眾多百年大學中，具有國際聲望的名校之一。

奠基於雪菲爾本身悠久的工業基礎，雪菲爾大學於 2001 年時與美國波音公司合資創立先進製造研究中心(Advanced Manufacturing Research Center, AMRC)進行產學合作，發展至今，合作夥伴從歐美等國大型企業諸如：Boeing、Rolls-Royce、BAE Systems 及 Airbus 到地方企業皆有長期或短期合作計畫，將豐沛的研究能量與全球產業鏈密切結合，建立雪菲爾大學在世界先進製造領域的地位，藉此在 2019 年獲得了全英工程研究投資與收入金額第一名的榮譽，超越熟知的帝國理工、牛津、劍橋。

該校 2018 年泰晤士高等教育世界大學排名中位居世界第 104 名，在 2019 年 QS 世界大學排名中，雪菲爾大學位居世界第 75 名，特別是在材料科學領域更是位居全英前五。另外在學生服務方面，為應對多達 140 個國家的學生，其組織相當著重於國際交流以及應對不同文化間的需求，以宗教方面舉例，在學校的每棟建築物內都可見到穆斯林的禱告室，由此可知學校對學生的照顧，更值得一說的是其學生組織於每日都安排不同的活動，囊括的領域亦極其寬廣，從運動到與地區商家合作的靜態活動一應俱全，在年收入高達四億英鎊的績效之下，亦已連續 12 年獲得 Times Higher Education Student Experience Survey 評選為全英國第一名。

## 二、課程進修

課堂上主要採用與台灣相同之教學式上課方式，學生若須更詳細的資訊，則依授課教師所提供之相關書籍清冊自行研讀，若有疑惑或不解之處，可使用電子郵件詢問或於課後詢問，授課教師僅針對重點部分進行講課說明。依課目要求不同，授課教師亦會安排作業或報告使學生對課堂所學有更進一步的認識並培養學生搜尋文獻及簡報之能力，以達學習之目的；另於學期末學校將舉行期末考試，學科總成績將綜合上述所述進行計算，畢業總成績則以學科及論文成績併同計算，達畢業標準者頒予畢業證書，並依成績高低區分為成績傑出 (Pass with distinction)、成績優秀 (Pass with Merit) 及成績一般 (Pass)。進修課程分為：材料科學 (Science of Materials)、材料製程及其性質 (Material Processing and Characterization)、實驗、模擬及數位技能 (Practical, Modeling and Digital Skills)、熱與材料應用 (Heat and Material with Application)、先進材料製造 (Advanced Material Manufacturing)、冶金程序 (Metallurgical Processing)、複合材料製造與設計 (Design and Manufacturing of Composite)、變形、破壞與疲勞 (Deformation, Fracture and Fatigue)、專題研究 (Project) 等，重點說明如后。

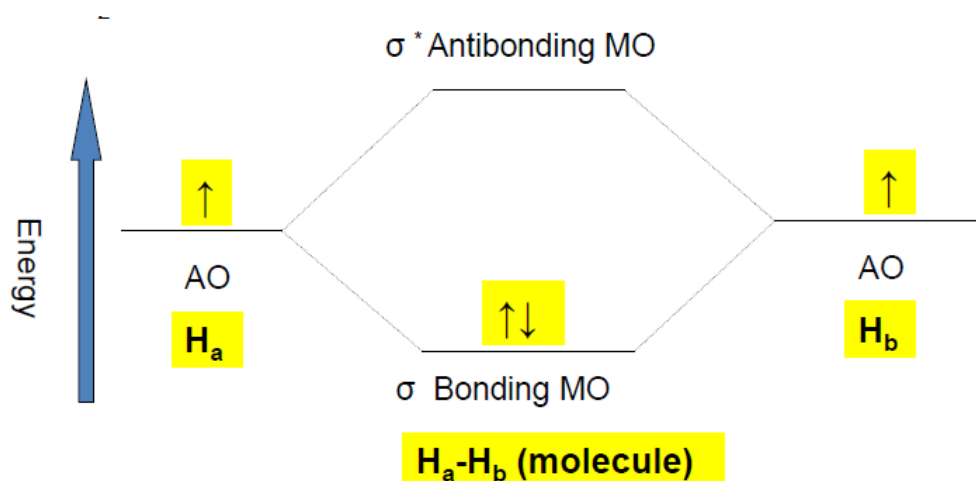
### (一) 材料科學

本課目分為化學鍵結、晶體、晶體缺陷、機械性質、相圖介紹、相圖轉化、無機固體、高分子與複合材料等 8 節，本課目可視為材料系入門課程，介紹影響材料性質的各個面向，包含鍵結方式、晶體結構、晶體缺陷及溫度變化。藉由這些基礎知識便能初步比較材料之間的機械性質並透過相圖了解材料的晶體結構在加熱過程中變化過程。

#### 1. 化學鍵結：

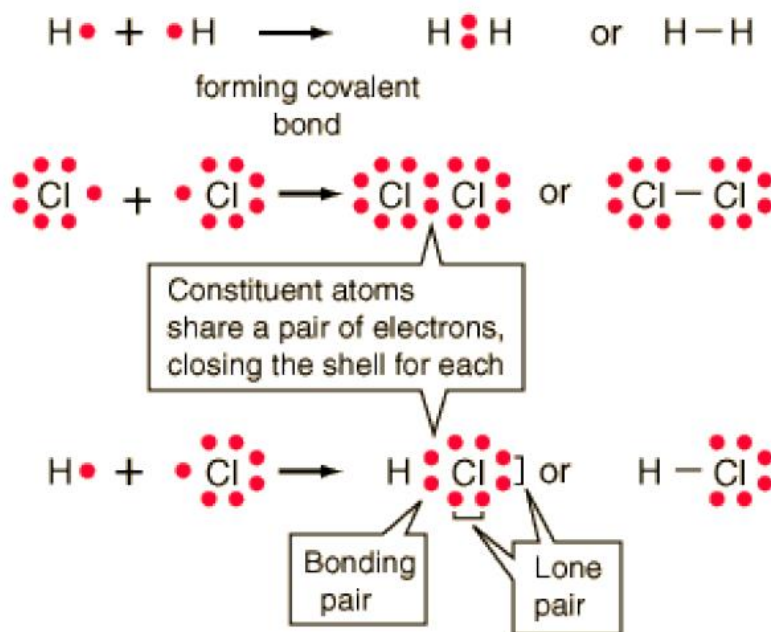
本章節主要介紹各種化學鍵結模式及其依循的原理，包含離子鍵、共價鍵和金屬鍵的區別在於不同原子間的電負度差異，在離子鍵的範疇內，

鍵結長度取決於其吸引力與排斥力造成的最低位能間距，每個原子各自的大小亦會影響其配位數的不同，以上皆會劇烈的影響各化合物的物理性質諸如熔點、晶型等等。而共價鍵的鍵結方式則取決於兩種理論，分子軌域理論及價鍵理論，前者適於預測分子特性，但不利於預測分子形狀，後者力於預測配位數及形狀，但不利於預測分子特性。



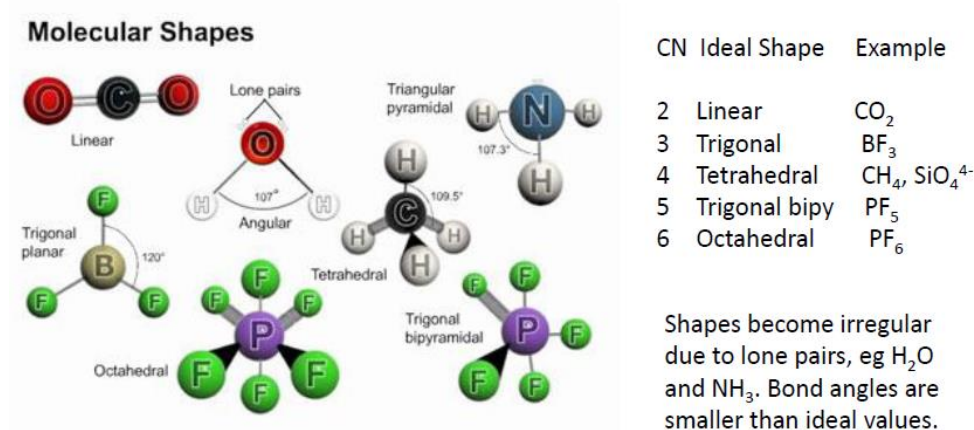
圖一：分子軌域理論

由上圖可知，當兩個氫原子要鍵結時，兩個原子各提供一個電子，並且會趨向最低位能的能階鍵結，同時兩個電子自旋方向會調轉。而以氮為例，因其擁有兩個電子，因此會有兩個電子在 Bonding 位階，兩個電子在 antibonding 位階，也因此氮不會與其他原子鍵結。



圖二：價鍵理論

上圖敘述了外層價電子可以做到四件事情，第一件是它們可以透過分享外層電子形成共價鍵。第二件是若同一個原子的兩個電子佔據了同一層原子軌域，則這兩個電子會形成孤對電子對，而孤對電子對會影響分子形狀。第三件則是同一個原子內的兩顆電子有時也會形成兩顆原子間的共價鍵。第四件為成對電子會形成 pi 鍵並使原子間形成雙鍵或三鍵。



圖三：分子形狀列表，能有效解釋孤對電子對及配位數是如何影響分子形狀以及鍵結間角度的變化。

## 2. 晶體：

單元晶體與晶格系統會影響材料本身的性質包含磁性、順鐵性、光學性質與硬度，單元晶體代表最小重複單元，其足以代表整個晶體結構，其中具代表性的有體心立方(BCC)、面心立方(FCC)以及六方最密堆積(HCP)，不同單元晶體會有不同的密度以及原子數量，而晶格系統中又分為七大晶系，分別為立方晶系(Cubic)、四方晶系(Tetragonal)、三方晶系(Trigonal)、斜方晶系(Orthorhombic)、單斜晶系(Monoclinic)、三斜晶系(Triclinic)以及六方晶系(Hexagonal)。而這些晶系又具備對稱性，可分為旋轉對稱(Rotational axes)、鏡像對稱(Mirror planes)、中心對稱(Center of symmetry)、反軸對稱(Inversion axes)和螺旋對稱(Screw axes)。依據布拉維晶格理論(Bravais lattices)，晶格可以分為 Primitive 以及 Centred，前者代表晶體中有晶格點在角落，後者則代表除了角落之外還有晶格點在其他地方。Centred 又分為 Face centred、Side centred 以及 Body Centred，綜上所述可整理為以下圖示。

Crystal System	Unit Cell Shape	Essential symmetry	Allowed lattices
Cubic	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	4x 3-fold axes	P, F, I
Tetragonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	1x 4-fold axis	P, I
Orthorhombic	$a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	3x 2-fold axes or mirror planes	P, F, I, A (B or C)
Hexagonal	$a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	1x 6-fold axis	P
Trigonal	$a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	1x 3-fold axis	R (Rhombohedral)
Monoclinic	$a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ, \beta \neq 90$	1x 2-fold axis or mirror plane	P, C
Triclinic	$a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	None	P

圖四：七大晶系及其對稱性、晶格系統分類

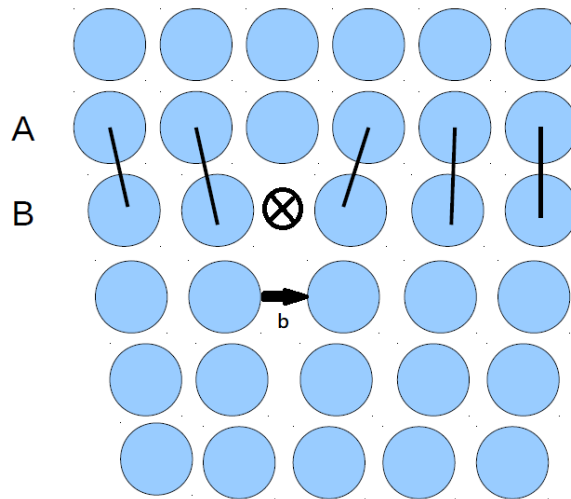
依據以上的分類可以歸納出 230 種可能的三維結構，我們稱之為空間群 (Space group)。目前有兩種命名法分別為 Schoenflies notation 以及 Hermann-Mauguin notation，較常見的為後者。在元素週期表上有超過 2/3 的元素為金屬原子，因此材料系較常探討的皆為金屬原子的結構，金屬的排列方式幾乎都為最密堆積以及最簡單的晶格結構，因此可推斷金屬具有異向同性的性質，而最密堆積有面心立方堆積以及六方最密堆積兩種，另外常見的結構是體心立方，但並非最密堆積，也因此具有很高的硬度。

### 3. 晶體缺陷：

現實中，沒有所謂的完美晶體。其中，晶體缺陷可分為點缺陷、線缺陷以及面缺陷。其中點缺陷又可分為孔洞(vacancy)以及間隙缺陷(interstitial)，孔洞即為原子排列之間的孔洞而間隙缺陷則是在正常的原子排列間隙中插入同種類的原子。此種點缺陷屬於與生俱來的，其數量與溫度及生成能量成指數關係。除了同原子之間的缺陷外，另有雜質造成的缺陷，稱之為外來點缺陷(extrinsic point defects)。這種缺陷亦可分為間隙缺陷(interstitial defects)及取代缺陷(substitution defects)兩種，此種缺陷的生成難易則取決於雜質的原子大小。而這些點缺陷的移動方式則是藉由原子之間的擴散而達成，擴散的難易度則取決於原子與周遭原子

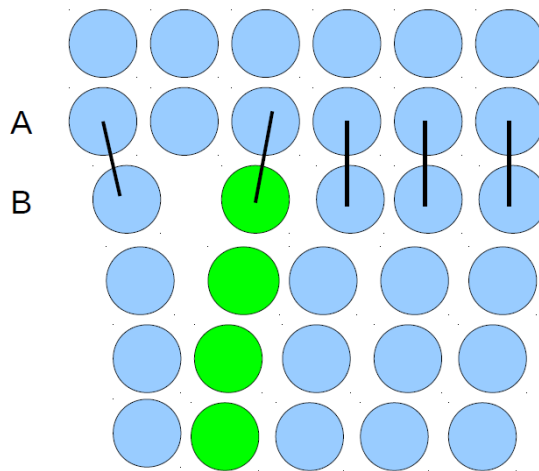


之間的連結性，若連結較弱，則容易擴散，反之亦然。孔洞間的擴散相較於間隙缺陷而言較易形成擴散。為了降低晶體內的晶格能，這些缺陷會傾向於聚集在一起，如此便可降低晶格缺陷對周圍原子排列造成的影響。當這些點缺陷聚集在一起，便會形成大範圍的缺陷例如：晶界(grain boundary)或疊差(stacking fault)。線缺陷中最為重要的則為差排(dislocation)，如下圖。



圖五、差排

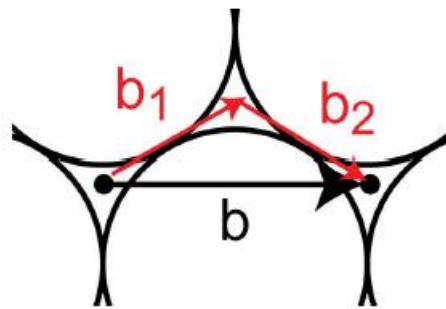
任何原子間的移動皆會採取最小能階的方式，以上圖為例，若 B 層原子要移動，則會如下圖的移動方式，僅移動一個原子。



圖六、B 層原子移動方式

而差排的定義方式則是基於以下兩者，伯格向量(Burger's vector)以及線向量(line vector)，以圖五為例， $b$  即為其伯格向量，而平面朝外則為其線向量。依據線向量與伯格向量之間的關係，可將差排分為刃差排(edge dislocation)、螺旋差排(screw dislocation)以及混和差排(mix dislocation)，刃差排其伯格向量及線向量為垂直而螺旋差排其伯格向量與線向量則互為平行。混和差排，顧名思義代表這段差排上綜合了刃差排以及螺旋差排。

差排的基本移動方式為滑移(glide)，此種機制歸類為保守型移動方式，基本概念為差排會在滑移面依滑移方向移動，且此滑移方向平行於滑移面。在滑移過程中，原子會依最低能量的方向來移動，因此有時會以部分移動的方式完成移動，如下圖所示，原子可能會遵循  $b_1$  到  $b_2$  的方向移動，亦或是直接以  $b$  向量進行移動，此兩路徑間的選擇則依照能量高低來判別。

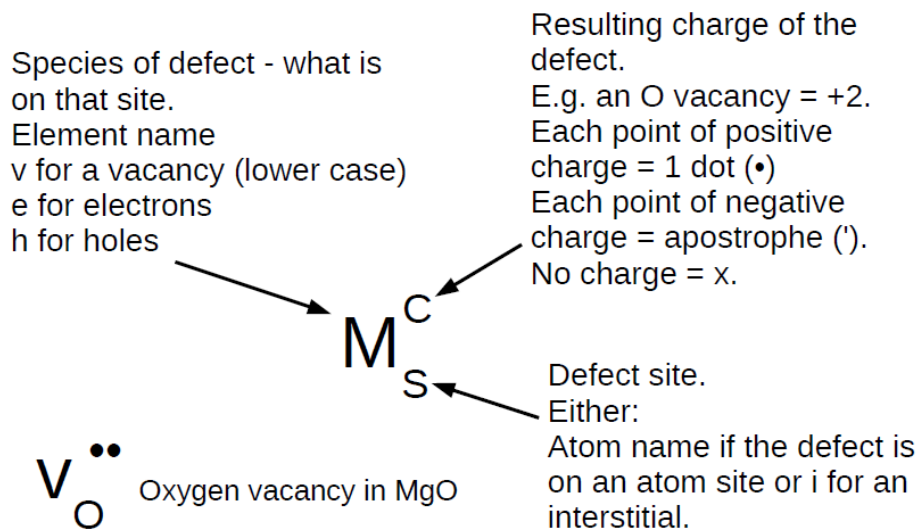


圖七、滑移方向選擇

而部分滑移會造成層錯現象(stacking fault)，而依據材料的不同，則會形成不同距離的部分差排，此一現象亦決定了材料的硬度或其抗拉硬度。除了保守型移動方式外，還有非保守型移動方式，例如爬升(climb)或交錯滑移(cross slip)，此種移動方式皆基於滑移方向不在滑移面上所形成。在不同的情況下，差排可能會不能移動，我們稱之為不動差排(sessile dislocation)，兩個差排在移動時亦可能會造成彼此無法移動，此種情形稱之為鎖定(locks)。不同的晶型結構其滑移面亦不相同，但基本上滑移面等同於晶體堆積最密面。

前述皆屬於金屬材料的缺陷範疇，另外在非金屬領域，其缺陷形式也有所不同。在陶瓷材料中，除了原子本身大小的關係之外，原子本身的電荷量則為另一考量點。依據前面講的孔洞(vacancy)的狀況，當原本應該是正電原子佔據的位置空出來時，我們會把這個孔洞定義為一個負電原

子佔據，則這個孔洞的帶電量被定義為 $-e$ 。因此，有一套命名方法來定義這些孔洞的特性，稱之為 **Kroger-Vink Terminology**，例子如下。



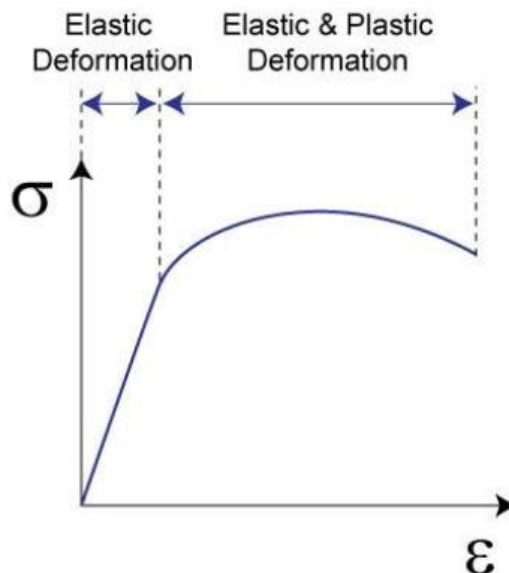
其中 M 代表缺陷的形式(V 代表孔洞、e 代表電子、h 代表電洞)，C 代表這個缺陷造成的電荷差異(正電荷以  $\bullet$  表示、負電荷以  $'$  表示、若無電荷差異，則以 x 表示)，S 則描述缺陷的原子(如該缺陷是一個原子點，則填上該原子的名字，或者是 i 代表間質性的)，因此若要描述在氧化鎂中的氧原子孔洞，則會表示為  $V_O^{..}$ 。如同金屬缺陷，在陶瓷缺陷中，孔洞和孔洞間也會相互合併，例如+2 的氧原子缺陷會與-2 的鎂原子缺陷合併，使電荷中和。當缺陷因此機制而聚合在一起，會造成周圍的原子空間擴大，我們稱之為團聚效應 (**cluster**)，此效應依據三個因數而變動，缺陷點尺寸、缺陷點電荷量以及缺陷的移動性。

#### 4. 機械性質：

材料科學很重要的一個點在於我們觀察的都是微結構，但是產品所呈現出來的都是其性質，作為材料系學生，如何將這兩點連結並順利呈現出所需性質即為材料學家所探究的方向。在機械性質這門課中，我們探究應力、應變、形變、等等相關性質及其與微結構之件的關係。在生產過程中，我們要先定義其應用範疇並決定我們所需的性質，而後挑選可能運用於此的材料，最後才決定製程。即使是同一材料，不同的製程會決定不同的微結構以及不同的性質。以鋼鐵的加熱為例，一、以冷軋的方式加工，二、加熱至  $950^{\circ}\text{C}$ ，並以爐冷方式冷卻，三、加熱至  $950^{\circ}\text{C}$ ，並以水冷方式冷卻，四、加熱至  $950^{\circ}\text{C}$ ，並以水冷方式冷卻，爾後加熱至

600°C 並恆溫 3.5 分鐘。第一個製程會得到硬且有些許延展性的鋼，第二個製程會獲得不那麼硬但延展性良好的鋼，第三個製程會獲得非常硬的鋼但其延展性不佳，第四個製程因為有回火的緣故，因此能獲得既硬又有良好延展性的鋼。

應力的定義為單位面積所受的力，應變則定義為原長度與長度變化量之間的比值。應力與應變又可分為工程應力/應變，以及真實應力/應變。其差別在於工程應力/應變是基於最初樣品的尺寸，而真實應力/應變則基於即時的樣品尺寸。變形可分為彈性變形(elastic deformation)與塑性變形(plastic deformation)。彈性變形的基礎則在於虎克定律，因為彈性變形期間，若釋放應力，則樣品會回復原尺寸，該形變非永久形變。塑性變形則相反，其形變不因應力的釋放而恢復原狀，應力已造成永久形變。而最能彰顯此性質的則為拉力試驗所呈現的應力應變圖(如下圖)。



圖八、應力應變圖

根據此應力應變圖，可以定義出其最大應力值(ultimate tensile stress)、降伏應力(yield stress)、延展性(ductility)，從拉力測試後的樣品斷裂方式亦可推測此樣品為脆性材料或延展性材料，脆性材料其斷裂面較為平整而延展性材料其斷裂面較不平整，且會形成杯子狀的斷裂面。

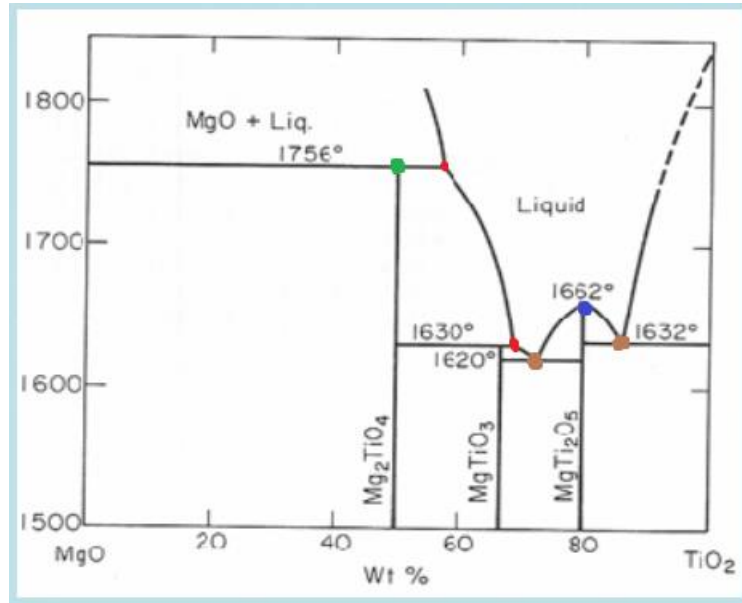
對於金屬而言，差排的移動會造成永久形變，形變量越大則金屬會越硬。當差排開始移動時，該點即為降伏點 (yield point)，因此當差排越難移動，則其強度會相對應提升。這些強化材料機械性能的方式可分為：應

變硬化 (strain hardening)、固溶強化 (solid-solution strengthening)、析出硬化/時效硬化 (precipitation hardening/ age hardening)、及晶粒硬化 (grain size strengthening)，通常這些方式提升了材料強度，反言之亦失去了一定的延展性。

對金屬材料而言，任何的製程都會牽涉到形變以及熱處理，且這兩項會影響微結構以及差排。當我們加熱形變後的金屬材料時，熱能會使結構趨向較低能量的形式，此期間可分為三階段，分別為，恢復 (Recovery)、再結晶(Recrystallisation)及晶粒生長(Grain growth)。在恢復階段，應變能會因差排的重形排列而釋放，再結晶階段時則是其能量藉由新晶粒的生長來釋放，晶粒生長則是上一階段形成之晶粒開始長成較大晶粒的微結構，降低晶界數量。此三階段皆會影響材料的機械性能，且依據需求不同，此三階段不一定都是我們所想要的。最後還有另外三種性質是我們會碰到的，分別為斷裂 (Fracture)、疲勞 (Fatigue)以及潛變 (Creep)。其中斷裂會隨著斷裂面、斷裂起始位置以及樣品的不同，其所需的應力亦有所不同。疲勞則是隨著應力的施加與釋放所造成，可分為三階段，斷裂起始點、慢速成長斷裂面以及快速斷裂面。多數材料會有其相對應的疲勞極限，意指低於某應力振幅，則疲勞斷裂不會發生。潛變則定義為材料在相對高溫環境下，材料會逐漸變形。通常這過程需要數千小時才會發生。

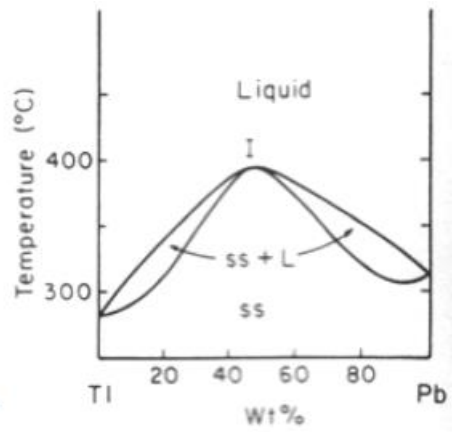
## 5. 相圖介紹：

相圖整合了數種資訊，包含化學組成、相容性以及各相的穩定溫度。同時，相圖是基於溫度動力學以及平衡的概念。在二元相圖中，我們會把 y 軸設為溫度，x 軸則設為化學成份比。其中化學成分必須為最小獨立化學組成，並且足以描述圖中各相的化學組成。在相圖的構成中，有一個規則稱之為相律，其表現為： $P+F=C+1$ ，P 代表相的數量，F 代表自由度，C 代表化學成分的數量。在計算某一相中的成分比率時，會運用槓桿原理來計算。在相圖中有幾個點是值得來提出的，其中包括了共晶點 (Eutectic point)、包晶點(Peritectic point)、一致熔融(Congruently melting)與非一致熔融(Incongruently melting)，共晶點代表所有成分一致由固態轉變為液態，包晶點則代表從一固液共存相轉變為全液相的點，一致熔融代表某一成分的化合物其熔融時會全部轉化為液態，其中無固相存在。非一致熔融則相反，當某一成分化合物熔融時，其中存在著固-液相。



圖九、相圖，其中綠點代表非一致熔融，紅點代表包晶點，咖啡色點代表共晶點，藍點代表一致熔融

此類相圖亦可運用於描述固溶體的完全混合或非完全混合，而如何繪製相圖則基於熱動力學中的吉布斯自由能 (Gibbs free energy)，因此以下相圖可被如此繪製出來。



圖十、固溶體相圖

在相圖中，亦有共析反應 (Eutectoid)與包析反應 (Peritectoid)，前者代表在冷卻過程中，一個固體相析出兩個固體相，後者則代表在升溫過程中，一個固態相析出兩個固態相，此兩現象亦經常在合金相圖中探討。

## 6. 相圖轉化：

上述的相圖介紹僅介紹相圖是如何繪製以及相關的點代表甚麼意義，在

相圖轉化的章節內，更多的是運用熱力學的概念解釋在相與相之間是如何轉換的，主要的是描述其結晶的過程，以糖水為例，在溫度下降時糖的結晶會生成，在不同介面之間相對應的表面能、生成的晶體其表面積及其體積固定的情況下，僅需考量當時溶液所處的溫度，依據此溫度的不同，即決定了此溶液會開始結晶還是保持液態。而結晶速率的慢與快則取決於其溫度差(驅動力)以及所處的溫度(移動力)，兩者必須取得平衡以快速得到較多的晶粒。

利用這理論，我們可以控制固溶體內析出的速率以及控制析出物的大小，此即析出硬化。但前述的情況是基於固溶體皆為均質物，在析出硬化中，通常牽涉的是兩到三種元素之間的關係。因此成團的物質有時還會具有高晶格能與較低的表面能，此為相干異相表面，若成團物質具有較低晶格能與較高的表面能，則為不相干異相表面。由此變成歸結出此方程式：

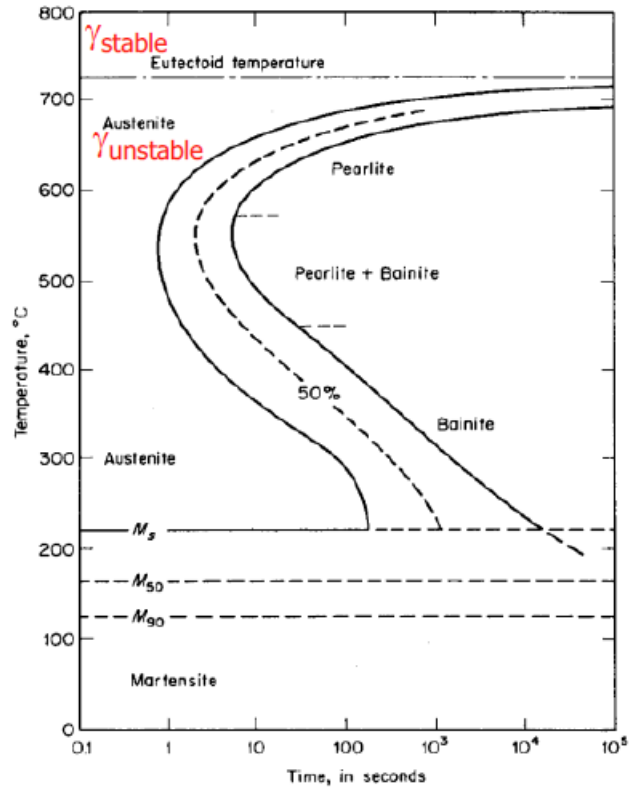
$$\Delta G^* = \frac{16\pi\gamma^3}{3(\Delta G_v - \Delta G_e)^2}$$

若要結晶，就要使此式趨近於最低值，也因此，使表面能( $\gamma$ )維持最低值是最為有效的。因此最先析出的結晶與溶液間必定是相干異相表面。

在析出硬化過程中，牽涉到三個步驟，分別是溶液處理、淬火以及回火。溶液處理中是將合金加熱至所有溶質皆溶進溶劑中。淬火則是將此合金迅速降溫，降低其擴散能力，使其形成過飽和溶液狀態。最後的回火則是將合金加熱至低於溶劑熔點的溫度。此過程能使過飽和溶液適當結晶成小晶體並均勻分布於合金內，如此便能增強合金的硬度。

前面所述相圖皆被稱為靜態相圖，因其皆未考慮時間變數，後來材料學家為了將時間變數納入考量，發展了時間溫度轉變圖 (Time Temperature Transformation)，在此圖中僅考量單一成分比的合金其隨著溫度與時間的相變化。以下圖為例，其描述了鐵碳(0.8%)相圖的時間溫度變化。





圖十一、鐵碳(0.8%碳)相圖的時間溫度轉變圖

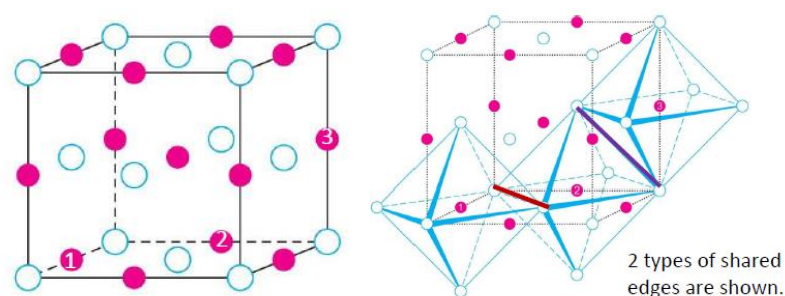
由此圖我們可以得知，若冷卻的速率不夠快，其形成的結晶即為粗大的波來鐵(肥粒鐵與雪明碳鐵形成的層狀結構)或形成變韌鐵(亦為雪明碳鐵與波來鐵形成的羽毛狀或針狀結構)，反之，若冷卻速率極快，則較易形成麻田散鐵(過飽和狀態溶液形成之)，從而獲得硬度極佳的合金。

## 7. 無機固體：

在無機固體中會探討緊密堆積與緊密堆積的結構(氯化鈉、氧化鎂鋁、氟化鈣和鈣鈦複合氧化物)以及一些非緊密堆積的結構(氯化鋇和氧化矽)。首先要知道最密堆積可分為兩種，六角最密堆積以及面心最密堆積，每一種堆積，其元素皆有相對應的配位數，例如鎂與銅其配位數皆為 12。藉由這些最密堆積結構，便可計算出最密堆積的單位晶格大小、單位晶格內有多少原子、以及單位晶格的密度。在單位晶格內會有兩種插入配位點(interstitial sites)，分別為四面體配位點(tetrahedral site)以及八面體配位點(octahedral site)，在任一緊密堆積球體中，皆會存在一個八面體配位點以及兩個四面體配位點。而不同的晶體其佔據的八面體配位點及四面體配位點亦不相同。在陰離子比陽離子半徑大的情況下，氯化鈉(NaCl)



其面心最密堆積由氯所堆積，八面體配位點皆由鈉所佔據。氯化鎘( $\text{CdCl}_2$ )其面心最密堆積由氯所堆積，1/2 個八面體配位點由鎘所佔據。鎳化砷( $\text{NiAs}$ )其六面最密堆積由砷所堆積，八面體配位點皆由鎳所佔據。氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )其六面最密堆積由氧所堆積，1/2 個八面體配位點由鈦所佔據。在有些晶體中，陽離子會同時佔據四面體配位點與八面體配位點，例如氧化鎂鋁( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )，其中鎂佔據了 1/8 個四面體配位點而鋁佔據了 1/2 個八面體配位點。對於具有較大的陽離子或較小的陰離子的晶體，例如氟化鈣或氧化鋯，陰離子會佔據全部的四面體配位點。而鋇錳複合氧化物則較為特殊，由於鋇原子半徑遠大於錳原子且鋇原子半徑與氧原子半徑相近，其氧化鋇會形成六方最密堆積，而錳會佔據 1/4 個八面體配位點。當我們考慮不同配位數下的晶體形狀時，會發現配位數為 6 的陽原子會形成八面體，其包含了 6 個角、12 個邊、以及 8 個面，若配位數為 4，則會形成四面體，並包含了 4 個角、6 個邊、和 4 個面。當我們以陽離子的角度來觀察晶體時便會發現不同的陽離子團會以不同的方式連結在一起，如下圖所示。



圖十二、鹽晶體(紅點為陽離子，藍點為陰離子)以及其八面體結構

從上圖中可以看出其八面體結構皆是邊對邊連結。而不同的配位數亦會形成不同的多面體，而除了以邊對邊連結之外，亦有點對點連結以及面對面連結，在這其中尤其以點對點連結以及邊對邊連結的晶體最為常見，而面對面連結的晶體最為罕見。其原因在於面對面連結其造成的原子間的斥力遠比點對點連結以及邊對邊連結的斥力還要大。上述情況僅適用於離子鍵鍵結的情況，在金屬鍵鍵結的情況下，則前述之排斥理論皆不適用，砷化鎳的晶體可以形成就是因為其皆為金屬鍵，也因此金屬晶體中，其四面體配位點及八面體配位點皆可以被佔據而不會產生排斥效應。

現今在電子領域，有兩個例子是離子化合物的應用，其一是鋇鈦複合氧化物的離子尺寸造成的結構變化，另一方面則是氧化鋯其非整數化學比值造成的化學成分變化。在結構變化部分，由於鋇可以被替換成鋇或者是鈣，由於離子尺寸的不同，會造成其容忍係數的差異，進而造成其結構的變化。此結構的變化會導致其應用的多元性，例如鋇鈦複合氧化物便適用於多層電容，而鈣鈦複合氧化物則適用於微波介電材料。在化學成分變化的部分，非摻入的導電體中，會因為高溫或低溫而使其電阻率變化。而晶格結構與氟化鈣一樣的晶體中，會摻入其他元素來形成多餘的電子或電洞。

#### 8. 高分子與複合材料：

高分子材料顧名思義包含了很多重複的單元，例如聚乙烯即為以乙烯為單元，重複數萬次至數百萬次形成的鏈狀結構。而這需要先從有機化合物開始講起，有機化合物有許多種類的異構物，包含順反異構物、同分異構物以及結構異構物。而這些有機化合物之間的鏈結則決定了其機械性質，當高分子材料組成兩種或以上有機化合物時，其鏈結方式則可分為隨意鏈結、交錯鏈結、區塊鏈結或交織鏈結。而其分子鏈呈現方式也大不相同，可分為線狀、分支、交互連結、3D 網狀結構等等。這些分子鏈的形式可藉由共價鍵形式增強機械性質抑或是改變其熔點。除了共價鍵之外，氫鍵等弱鍵結亦會增加不同分子鏈之間的吸引力。對於熱塑性塑膠而言，其具有第一和第二相轉換點，第一相轉換點代表其熔點而第二相轉換點代表玻璃轉化溫度，低於玻璃轉化溫度的塑膠會變成跟玻璃一樣的脆性材料，這是由於低溫限制了分子鏈的移動，進而喪失其低楊式係數的特質。在高溫下，高分子材料會趨近於流體，也因此其製程溫度大多高於熔點。

熱塑性塑膠其結構多為鏈狀或有分支的結構，較少為交錯連結的結構，其分子間鏈結方式也多為共價鍵，在不同分子鏈間則為較弱的凡德瓦力，無晶體的熱塑性材料具有玻璃轉化溫度但不會融化，而具有半晶體的熱塑性材料則同時具有玻璃轉化溫度以及熔點。常見的熱塑性材料有聚乙烯、聚丙烯、尼龍 66 等等，大致上可分為六類：聚烯烴彈性體(Polyolefin)、乙烯系聚合物(Vinyl polymer)、芳香烴聚合物(Aromatic polymers)、共聚物(Copolymers)以及縮合聚合物(Condensation polymers)。聚烯烴彈性體通常其具有較弱的剛性以及強度，但具有很高的韌性，同時，因為其結

構，導致其具有化學及濕氣的阻抗性，同時不具有氣體通透性。乙烯系聚合物則與聚烯烴彈性物大不相同，其具有高剛性以及強度，但缺乏彈性。芳香烴聚合物因其分子鏈以芳香環為骨幹，因此其具有高剛性、強度，同時具有一定程度的彈性。共聚物代表齊聚合物內的組成包含超過一種的單體，因此策略上會將高強度的聚合物和高彈性的聚合物化合在一起，以取得兩方面的優勢。縮合聚合物通常藉由聚合作用來形成，其過程中會產生水或其他分子的副產物。在這類化合物中，其結構依舊影響甚大，尼龍 66 中的氫鍵提供了強大的抗磨損力，而聚對苯二甲酸乙二醇酯(PET)則因其芳香烴骨幹提供出色的強度與剛性。為了增加熱塑性材料的晶體性，在製程中會施加擠拉成型以促進分子鏈之間的連結，進而大幅增加其機械性質。這類熱塑纖維包含 Kevlar 以及 Dyneema。

熱固性聚合物代表其在加熱過程中反應以及固化，與熱塑性聚合物的最大區別在於其無法回收再利用。其大量的交互鏈結以及 3D 鏈結，除了分子鏈中的共價鍵之外，分子鏈之間亦具有強力的共價鍵。因其特性，熱固性聚合物常於模具式製造時以塑膠粒以及固化劑的方式運用，並於模具中固化、聚合。熱固性聚合物可分類為 6 類，分別為不飽和聚脂樹脂(Unsaturated polyester resin)、乙烯基樹脂(Vinylester resins)、環氧樹脂(Epoxy resins)、酚醛樹脂(Phenolic resins)、氰酸酯樹脂(Cyanate ester resins)、雙馬來亞醯胺樹脂(Bimaleimide resin)。

在第二部分會提到如何有效強化纖維以及複合材料，首先在複合材料的製程中會添加其他的填充物，這些填充物的目的在於降低成本、增加剛性以及硬度、增加製程的可行性、控制重量等等。這些填充物的尺寸對於控制複合材料的機械性質至關重要。當這些填充物的粒子尺寸能有效降低時，在同樣的體積分率下能更有效的提升所需的機械性質。另外也必須確保填充物的尺寸分布區間相對窄小，以利於預測複合材料的機械性質。這些填充物存在的同時也必須考慮其形狀，通常運用面比率(aspect ratio)來描述粒子長與寬之間的比值。除了填充物，由於纖維比同體積的整塊材料具有較強的剛性與韌性，因此複合材料會利用纖維來增強材料的拉力性質。不同尺寸的纖維其強度也會有所不同，半徑越小的纖維其強度會越高。

通常工業上會運用的纖維包含玻璃纖維、碳纖維、以及其他聚合物纖維。在工業上應用來說，玻璃纖維的成本較為低廉，然而其機械性質較碳纖維低落，也因此玻璃纖維的應用領域也偏向日常用品或低技術含量的領

域。碳纖維其成本較高，然而其高強度使其應用領域多偏向高技術產業諸如跑車或航空業。聚合物纖維則多應用於防彈背心或其他複合材料的基底。在工業領域中，通常玻璃纖維會和不飽和聚脂基材結合運用，此方式可得到低成本且適當機械性質的材料。而碳纖維常會與環氧樹脂基材結合運用，以取得高機械性質的材料，反之其造價則較為昂貴。

複合材料可分為兩部分，纖維和基材，其中纖維負責提升材料的拉力強度與模數係數、抗潛變及高溫下的穩定度。而基材則負責強化材料韌性、剪力強度與模數係數以及壓縮強度與模數係數。近年，由於複合材量的低密度與高強度使其漸漸取代傳統材料。通常纖維不會直接運用到複合材料中，這些材料會先排列組織成薄層(lamina)再運用。其運用方式可分為連續纖維或不連續纖維。連續纖維更可細分成單一方向、兩個方向或多方向排列。而不連續纖維亦可區分為單一方向或隨意方向排列。這些排列方式都會影響複合材料各方向上的機械性質。基本上來說，在沿纖維長的複合材料楊氏係數可以運用混合定律來計算，式子如下： $E_{cl} = f_f E_f + (1 - f_f) E_m$ ，其中  $E_{cl}$ 、 $E_f$ 、 $E_m$  分別代表複合材料、纖維及基材的楊氏係數， $f_f$  代表纖維的體積分率。若是需要計算沿纖維橫切面的複合

材料楊氏係數，則式子如下： $E_{ct} = \frac{E_f E_m}{(1 - f_f) E_f + f_f E_m}$ ，此式為快速獲得結果

的版本，能大致比較兩複合材料之間的高下，在實際的運用上則較常運用 Halpin Tsai 的式子來計算纖維橫切面的複合材料楊氏係數，並搭配電腦輔助計算以獲得較為精準的數值。在複合材料領域，另一件需考量的事情則為纖維和基材間的鍵結，其鍵結程度取決於兩者之間的官能基關係。在 Kevlar 以及超高分子重量聚乙烯的情況，通常會藉由氧化表面或運用電漿處理來蝕刻表面或增加官能基來增加纖維和基材之間的鍵結。

## (二)材料製程及其性質

本課目介紹的材料製程分為三部分，依序為金屬製程、高分子與複合材料製程及陶瓷製程。期望藉由此課程提升學生對工業上主要運用的材料之批量生產製造方式有所了解，並於日後能因應不同產品造型進行工業生產。

### 1. 金屬製程：

金屬製造的層面包含了鑄造、擠壓、滾壓、鍛造以及較為高端的層積製

造及半固態製程。任何金屬成品的性質皆取決於其化學成分、製造方式、熱處理方式、表面處理方式，以上四者都會影響材料的微結構進而決定材料的最終性質。而作為材料工程師，我們必須要了解以上四者是如何影響材料微結構的，在維持適當性質的同時，也須同時考量其成本。生產製造過程可分為兩個大項，分別為材料製程以及組裝製程，在材料製程中又尤以形塑、性質增強以及表面處理三者為重。在此課程中，僅介紹金屬型塑的製程。

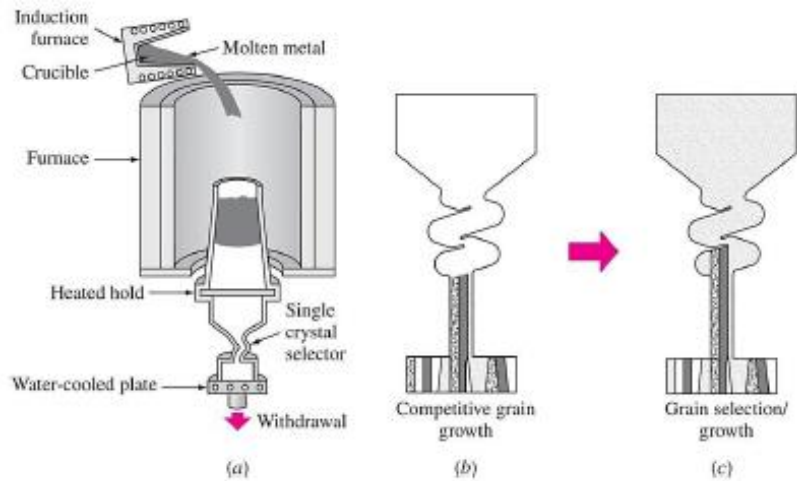
首先金屬加工可區分為熱加工、冷加工與溫加工，其區分基準為溫度高低，熱加工定義為其加工溫度高於熔點的百分之 60，冷加工定義為其加工溫度需低於熔點的百分之 30，溫加工其加工溫度則介於此兩者之間。任何的塑性形變皆牽涉到差排的生成與移動，當發生形變時，差排的數量就會開始增加，在冷加工時，由於其加工溫度在室溫，因此差排之間不易移動或結合。這些差排會因此造成加工硬化並增加接下來形變所需的壓力。由於冷加工會使晶粒變形與變瑣碎，此時會有很大的晶格能儲存在晶體內，當冷加工後升溫降低晶格能時，晶體會產生再結晶，而其驅動力為內部晶格能，當內部晶格能很大時，其所需的再結晶溫度會比晶格能低的情況低。由於冷加工所需的流動應力(flow stress)會越來越大，因此在加工期間須不時的施以退火(annealing)，以產生再結晶，以降低其所需的流動應力。由於加工期間極大的避免了高溫氧化，因此其尺寸精度與表面狀態極為優異。

在熱加工時，由於加工溫度在相對高溫，因此材料會進行動態恢復(Dynamic Recovery)，在此期間差排會易於移動，進行爬升或交錯滑移，進而使差排融合或形成低角度晶界或形成次晶體，由於此期間依然在進行加工，因此差排密度不變。由於熱加工會適時釋放晶格能，因此能使材料維持高度的延展性以及較低的流動應力。同時由於高溫下的氧化反應，其尺寸的精細度與表面狀態相較於冷加工而言會較差。

在溫加工時，由於其加工溫度的關係，並不會發生再結晶，但會發生恢復現象，也因此其流動應力會明顯的比冷加工還要低，卻同時賦予部分的加工硬化。此種加工方式結合了數種優點，例如良好的尺寸精度和表面狀態以及易於形塑複雜形狀。

選擇鑄造為生產工序的原因主要為易於加工成複雜的形狀，同時亦可降低生產成本與減少浪費。鑄造時，材料會歷經從液體逐漸凝固成固體的過程，由於冷卻速率的不同以及位於模壁或材料內部，成品內部會呈現兩種不同的晶形，分別為等軸晶體(Equiaxed Grain)與柱狀晶體(Columnar Grain)，此兩種晶形呈現的機械性能會有所差異，進而導致成品易於破壞。因此，需添加如鈦或硼等晶粒優化劑使成品的晶形均勻且細化。在航空領域內，由於燃氣渦輪葉片的工作環境處於高溫環境，因此其葉片需以單晶體工序製造以提升其抗潛變性質(見下圖)。





圖十三、單晶葉片鑄造法

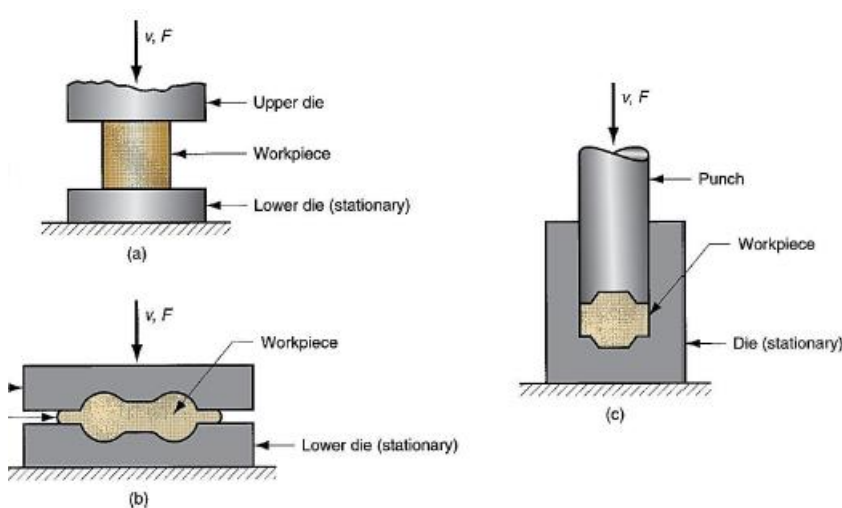
在此製造過程中，溫度控制是非常關鍵的，整個模具與內部的溫度需控制於略低於熔點，以降低晶體成長速率，同時必須從內部導出其潛熱，使其順利形成單晶成品。而一個材料能不能採用鑄造工序則需考量其熔解後與模具之間的反應性、其流動性以及其由液態轉固態後的縮水特性。

在倒入熔解液時，需考量其極端速度( $V_{crit} = \sqrt{\frac{2T}{r\rho}}$ ，其中  $\rho$  代表材料液態

密度、 $T$  為表面張力、 $r$  為倒入液柱的半徑)並計算模具的最高高度，以避免液體流動過程中將氧化物捲入液體中。鑄造的缺點也是相當顯而易見的，包括了孔洞性、雜質多、熱裂或冷縮等等。鑄造的方式可分為砂模鑄造、永久模鑄造法、重力壓鑄法、脫蠟法。其中砂模鑄造法的優點為：1. 模具較便宜 2. 可用於複雜形狀 3. 適用於所有合金 4. 沒有尺寸限制 5. 低產量時符合經濟效益。其缺點則為：1. 每單位造價較高 2. 表面較粗糙 3. 成品壁厚較厚。脫蠟法的優點則為：1. 較精確成品尺寸 2. 相對較便宜的模具 3. 使快速製造可行性提高 4. 可用於複雜形狀 5. 適用於超高溫材料，例如鈦。缺點則為：1. 較長的生產週期 2. 模具無法回收再利用。壓鑄法的優點則為：1. 高生產率以及高度自動化 2. 對鎂合金來說，成品壁厚較薄 3. 良好表面狀態 4. 大批量生產具經濟效益 5. 較好控制模具溫度。缺點則為：1. 工具耗費較高 2. 長前導時間 3. 尺寸有所限制 4. 僅限鋅、鋁、鎂、銅合金適用。

鍛造、擠壓和滾壓屬於基礎的整體形塑程序，其中鍛造為成品經由相對的模具之間的擠壓與形塑而成，擠壓則是成品透過擠壓通過開口的模具形塑而成，滾壓則是金屬片或金屬板經過兩相對的滾輪形塑而成。此三種整體形塑程序皆可應用熱加工與冷加工，因此大大增加其應用性。鍛造可分為兩種施力方式，分別為衝擊鍛造(**impact forging**)以及壓力鍛造(**press forging**)，壓力鍛造會使成品微結構呈現一定的晶格方向，通常會

垂直於壓力施加的方向。而衝擊鍛造一般不適用於延展性過低的金屬合金。鍛造除了以施力方式分類外，亦可分類為三種不同的模具形式，分別為：開模鍛造(open-die forging)、印模鍛造(impression forging)及無飛邊鍛造(flashless forging)，如下圖所示。



圖十四、鍛造模具形式(a)開模鍛造(b)印模鍛造(c)無飛邊鍛造

開模鍛造會因為模具與材料之間的摩擦力而導致酒桶效應，對於熱加工的开模鍛造而言，此效應會因為材料與模具間的熱傳導而更加劇。



圖十五、酒桶效應

從上圖可看出，在酒桶效應下，上下兩端因摩擦力而無法與中間部分同步擴張，也間接導致其中的為結構變形。為解決此效應的影響，無飛邊鍛造被視為可行的替代方案，由於其壓柱會完全壓入模具內，因此可有效避免酒桶效應以及飛邊的產生，進而減少材料的浪費與節省成本。

擠壓的成品具有統一的橫切面是由於其製作工序為一材料柱經擠壓經過模具而成型。因此適合製作門框或窗框等需要一致橫切面的成品。其具有兩種形式：直接擠壓及間接擠壓，施力方向則分為垂直施力與水平施力兩種，其中水平施力較為常見，而動力源則分為水力壓機與機械壓機，水力壓機適合半連續直接擠壓成型，通常用於較長的元件，機械

壓機則常用於獨立元件的冷擠壓加工。

滾壓是最廣泛運用的金屬製造工序，由於此工序可以達到高產量以及精確的控制成品的狀態，在滾壓的過程中，材料會經過高壓應力，表面的剪應力也可能會導致材料本身加工失敗，致使材料的浪費。滾壓製造的設備是相對較為巨大且昂貴的，其滾輪形式可分為二輓式、三輓式以及四輓式。通常越多滾輪的形式能更好的控制成品的尺寸，並維持成品的品質。當滾壓加工從金屬板加工至金屬片之後，對於精密度的要求會更高，因此也有二十輓式的滾壓機在業界應用。除了金屬片或金屬板的加工外，I 柱以及 H 型的部件也可經由滾壓生產。較先進的製程會將滾壓機與連續鑄造機串聯，一方面可以提高自動化程度同時也可降低生產成本。對於滾壓工序而言，不論截面積縮減率過高或過低都會造成成品的缺陷。當縮減率過低，應力都將集中於材料表面，導致材料產生波折、不平坦。若縮減率過高，則材料的邊緣將因過高的剪應力而產生鋸齒狀。

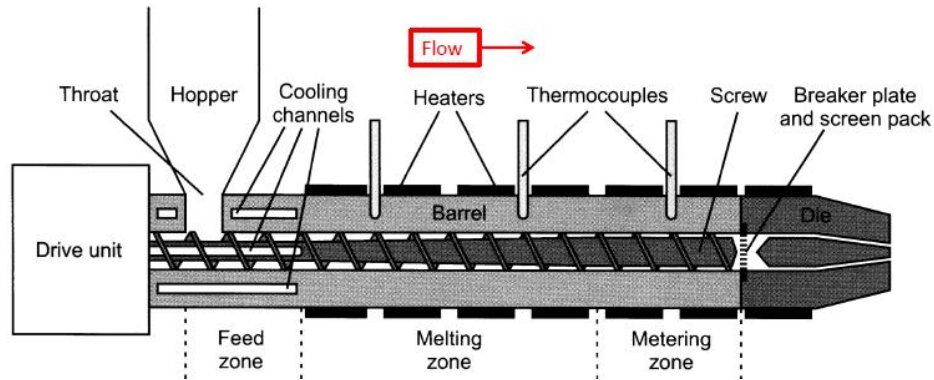
針對先進的半固態製程，其主要概念為在一定溫度下，金屬會呈現熔融態，其具備一定的流動性但又同時具備固態的特性。此特性使其在填充模具時能保持流動性，同時又可避免鑄造件孔洞過多或鍛造件高殘留應力的缺點。**半固態製程**可分為觸變成型(Thixoforming) 和流變成型(Rheoforming)，其差異性為觸變成型是半固態材料加熱至部分固態及部分液態再填入模具內，流變成型則為材料在進入模具前，冷卻至部分固態及部分液態。其優點在於生產的零件接近最終產品的尺寸，因此可以減少後續的加工程序，其次由於合金僅需加熱至半熔融態，因此能源消耗相較於全液態鑄造低下很多。然而半固態製程的成本也較傳統製程昂貴，因此只有在半固態製程能提供較好的品質、適合設計的零件、減輕重量等等的狀態下會是一個較好的選項。層積製造，另一方面則是直接將設計階段與製造階段整合。但目前適用的材料多為鈦合金、鈷化鎢及其他的航空材料，由於每一層堆積時皆已先預熱過，因此成品內部較無殘留應力。同時其疲勞破壞特性較鑄造及鍛造優異。目前此項技術應用領域多為高端市場，諸如航空業、高端汽車製造業、醫療用途或其他的高客製化產品。其優點在於高度客製化、減少零件數量、減少製程步驟、減少材料浪費、縮短設計至製造的時程。基於上述理由，層積製造可說是全面性的改變了製造業的面貌。

## 2. 高分子與複合材料製程：

常見的熱塑性材料其加工策略為 1.加熱至軟化或融化 2.均質化(添加其餘配方等等)3.填充模具 4.冷卻，而對於所有聚合物或複合材料加工而言，聚合物的排列方向是最為關鍵的。其排列方向決定了成品的最終機械性



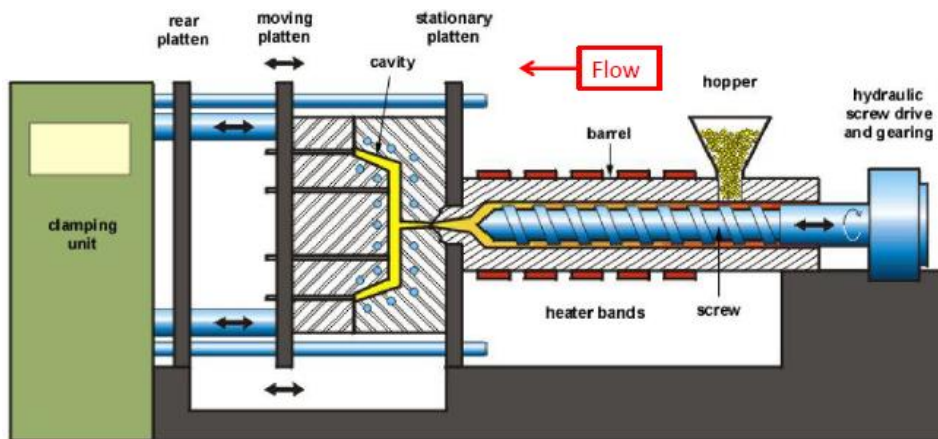
質，並且順著聚合物排列方向的機械性質會比其他方向還高。聚合物加工可大致分類為 1.擠壓成型(Extrusion)2.射出成型(Injection moulding)3.旋轉模製(Rotational moulding)4.熱成型(Thermoforming)5.模吹法(Blow moulding)。其中擠壓成型的優點在於可製造橫切面一致之產品且絕大部分之熱塑橡膠皆可加工。而擠壓成型時其聚物流動方向即決定了其排列方向，因此其機械性質最強的方向為成品的長邊。



圖十六、擠壓成型製造示意圖

塑膠原料由進料斗(Hopper)進入擠壓成型機，透過中間的加熱單元(Melting zone)使塑料易於塑型，最後在量測區(Metering zone)形成理想的尺寸，避免塑料流之中殘留大量孔隙或造成成型壓力過大致使缺陷產生，最後則通過模具(die)成型。其中擠出機螺桿(Extruder Screw)也是一個重要的元件，由於單螺旋螺桿其效率較低，因此雙螺桿為現在常用之選項。雙螺桿提升了整個製造效率以及降低塑料流的後壓力。一個良好的擠壓成型模具設計時需考量能否保持一致的擠壓成型速率以及最小的壓力差。另外模具設計時也需考量形減少直角的數量，盡量以曲線代替，不同的塑料其本身在不同相時其膨脹率的差異以及流動塑性的釋放也會影響模具的設計，以上皆需於設計模具時通盤考量。

射出成型可用於生產從簡單到複雜形狀的成品且可適應不同的尺寸。在成品本身可維持高精度表現的同時亦保證了其快速生產的能力。其成本有大部分是投資於機具與模具的設計，但其營運成本和單一產品成本是相對低廉的。對於可應用的材料來說，大部分的熱塑性材料皆可使用，最近也有部分的熱固性材料可運用於此製程。



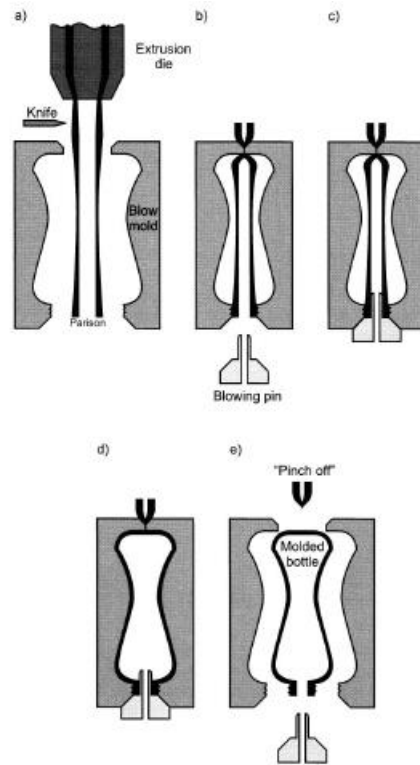
圖十七、射出成型製程簡圖

塑料從進料斗(hopper)進入螺桿內,經過加熱程序後再由螺桿將塑料推入模具內填充成型,當溫度下降至塑料凝固後即可移動滑動平台(moving platen)將塑料件移除,並重複進行生產。射出成型亦有其缺陷,包括先進入模具的塑料提前凝固,導致後續塑料流無法有效填充模具以及塑料凝固過程的收縮情況都可能導致成品外觀的缺陷與成型的不完全。而模具在設計的同時也要考量孔隙的平衡與塑料通道的流動性。

另一方面,旋轉模製則適用於製造較大體積且中空的成品,例如安全圍欄或帳棚基座等等。其製作流程包含填充模具、加熱並旋轉、冷卻、脫模。注意的點在於在加熱與冷卻過程中皆需旋轉模具以保證成品的造型。旋轉模製可整合不同材料型成多層材料的成品,但是需要考量不同材料間的黏合性、熔點以及收縮性。通常旋轉模製的四個步驟會分別在三個工作站完成,每一個工作站皆連接至一工作臂,在每一工作臂上完成諸如加熱、冷卻等等程序。

熱成型則常運用於軟塑膠的成品製造,諸如塑膠包裝殼或蛋盒等等。其製成可分為真空製程、壓力製程以及機械製程。在真空製程中,塑料膜會先固定於模具上方,待加熱完畢後會由模具下方抽真空,進而使塑料膜因真空而向下牽引,完成塑型。壓力製程亦為類似製程,差別在於壓力由塑料膜上方施加。對於熱塑型製程來說,其問題點在於較難控制成品壁厚以及成品的邊角較難填滿。因此相關的前處理例如塑料膜的預先拉伸或模具設計時減少直角都是可行的方式。熱塑型相較於射出成型的優勢在於其小批量生產時經濟效益是較高的,同時由於工作壓力較低,因此可以使用便宜的模具,進而降低成本。

膜吹法則常運用於生產瓶狀物或容器等中空物品。相較其他製程而言具有較薄的壁厚並且產生較少的廢料。



圖十八、模吹法製程

經由擠壓出的型坯(parison)會用模具先夾住，並從底部灌入空氣使塑料包覆模具，待塑料冷卻即可將殘餘料剪除並脫模。底部殘餘料的部分對於成品來說是脆弱點，任何破壞即是從該點開始。此製程可應用於小至數毫升的容器大至數百公升的容器。另一進階製程為射出吹模法

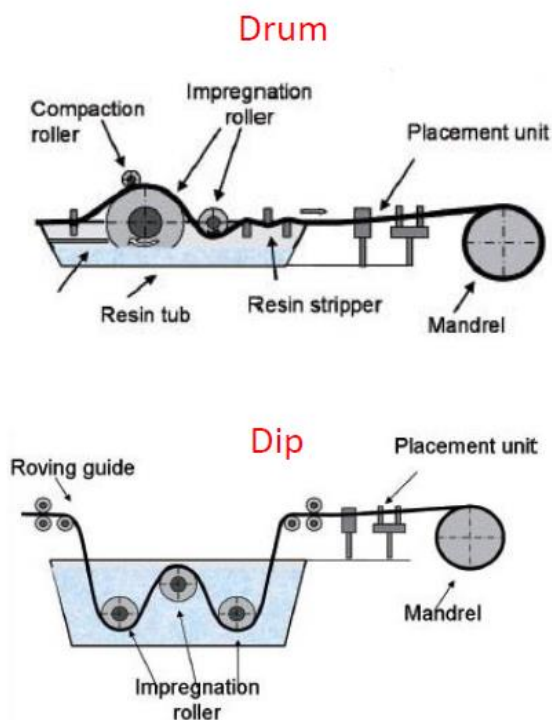
(Injection blow moulding)，其包含四個步驟，1.運用射出成型技術先預先型塑 2.軟化預先型塑的部件並安裝進模吹法的模具中 3.充氣，將部件塑型製成品大小 4.移除模具。此製造方法避免了殘餘料，減少了材料浪費亦減少了脆弱點的存在。

複合材料的製程相較於聚合物製程更為考量纖維和基材之間如何結合，因此在製程中要隨時保持正確的形狀、溫度以及壓力。常見的製程包括濕式層積法(wet lay-up)、壓塑成型(Compression moulding)、纏繞成型(Filament winding)、樹脂傳遞模塑成型(Resin transfer moulding)、拉擠成型(pultrusion)、預浸置製程(Pre-preg)。在濕式層積法中，可採用人工層積或噴灑層積的方式進行加工。加工程序大致如下，先將脫模劑塗抹在模具上，再塗上保護膠。接著將纖維布放置於模具中並將基材塗抹於纖維布上，運用滾筒與刷子將基材與纖維確實貼合，重複施加基材與纖維直至達到預期厚度，最後使其硬化。硬化的溫度與壓力要求則不盡相同，硬化可於室溫或升溫環境下進行，但室溫下可節省成本，升溫環境下則可以提供較好的性質。硬化的壓力可以運用真空包來促進基材與纖維間

的密合度，亦可施加額外的壓力獲得最好的結果。噴灑層積法則大致與人工層積法相似，不同之處在於噴灑層積法是將纖維和基材噴灑至模具，後續再用滾輪將其滾壓紮實。此方式可降低人力成本但設備成本將會提升。由於噴灑層積法使用的是短纖維，因此其成品的機械性質並不好，但可以獲得品質較為一致的成品。

壓塑成型是由兩個模具製作而成，原料部分則為已按比例混合的基材與纖維，經由擠壓與加熱使原料成熔融態而填滿兩模具間的空間。原料的選用則可分為泥土狀的配方(25%未飽和聚酯，20%切碎的玻璃纖維及55%的填充物，填充物多為碳酸鈣或氧化鎂)、片狀複合物或塊狀複合物。其優點包括：1.可用於任何形狀 2.成品的兩面皆良好 3.可達到自動化 4.良好的品質一致性，其缺點則為：1.不佳的機械性質 2.無法在成品中穿孔 3.中等的固定資產投資 4.受限於模具的尺寸。

纏繞成型其概念為纖維先經過樹脂液後再纏繞在棍狀物上。以此製作中空狀的管狀物。纖維浸泡樹脂液的方式有兩種，分別為浸泡式與鼓式。



圖十九、上圖為鼓式，下圖為浸泡式

由圖十九可以清楚的看出鼓式是藉由一滾輪沾附樹脂液並與纖維做結合，運用擠壓輪(Compaction roller)可增加纖維和樹脂之間的結合程度，樹脂刮除板(Resin stripper)則可以有效的將多餘的樹脂刮除，避免其降低成品的機械性質。浸泡式則是將纖維浸泡於樹脂液中，其後透過兩相對的滾輪將多餘的樹脂擠出。在此製程中，需要控制的要素在於通過樹脂液的速度、模心的旋轉速度以及纖維和模心纏繞的角度，另外維持固定

的纖維張力也是相當重要的。纏繞成型基本上可分為三種纏繞方式，包含環狀纏繞(Hoop winding)、螺旋型纏繞(Helical winding)以及雙極纏繞(Polar winding)。環狀纏繞能提供極佳的圓周性質，螺旋型纏繞則能提供優異的扭轉及摺疊性質，雙極纏繞則能提供優異的長邊性質。纏繞成型的優點有以下四點：1.適用於任何尺寸 2.良好的內緣 3.相對來說較為自動化 4.品質一致性較為良好。缺點則為：1.成型形狀受限 2.不良的外表 3.無法製作孔洞 4.中等的固定資產投資。

樹脂傳遞模塑成型則採用較為不一樣的方式，首先將纖維預成型，使其大致形成最終成品的形狀，而後將預成型的部件放入模具中並注入樹脂，待其硬化後在將其取出。此製程的優勢在於可以有效提升纖維的占比，進而提升成品的機械強度。在此流程中，尤其要注意的是採用的樹脂其流動性一定要夠高，才足以使樹脂流入模具的每一個角落。此程序與射出成形類似，但由於施加的壓力較低，因此可運用較便宜的模具，例如鋁材。因此，此種製程被視為經典的免高壓固化製程(out of autoclave)。其優點包含：1.任何形狀、尺寸皆可製作 2.良好的表面 3.可達成部分自動化 4.良好的品質一致性，缺點則包含：1.樹脂注入時纖維會移動 2.中等至大額的固定資產投資 3.需要特定的高流動性樹脂。

預浸置製程與樹脂傳遞模塑成型的概念相仿，其纖維會先編織成布狀並預先浸泡至尚未固化的樹脂中，此部分是複合材料生產商製作的流程，由於需避免樹脂提前固化，因此浸泡樹脂後的纖維需存放於負 18°C 的環境下。當生產商使用時，則將纖維布依需要的形狀剪下並黏貼於模具上直至預期的厚度，即可升溫並加壓固化。若僅使用真空包進行固化，則可以移除揮發物及表面孔洞，並且增進纖維占比。然而在採用真空包並加壓的情況下，則能最大化的增加纖維占比。此製程的優點在於：1.能獲得最好的機械性質 2.適用於任何形狀 3.可自動化。缺點則為：1.設備、模具等等皆非常昂貴 2.僅一面外觀良好 3.尺寸受限於加壓機或模具的尺寸 4.根據製造技術的不同，成品性能會有所差異。也因其造價高昂，因此常運用於航空業、國防產業、跑車或 F1 賽事。

### 3. 陶瓷製程：

在材料領域，陶瓷可被定義為一切非有機及金屬的材料，這些材料在自然界中以晶體的形式存在並藉由燒結金屬及非金屬元素而成。常見的包括氧化鋁或氮化矽。其之間的鍵結多為離子鍵或共價鍵，少數會以金屬鍵的形式連結。其應用的領域廣泛含括生醫、電子、核工、機械及一般民生用途。一般而言，陶瓷製程可包含四個步驟：原料製備、成型、高溫燒結及成品。傳統陶瓷從數世紀前及已誕生，當時的製程與上述製程相差無幾但型成之為結構僅足以用於瓷器等民生用途。現代陶瓷技術亦

是基於上述四個步驟，但其工序更為繁複，使其足以滿足現代產業需求。現代陶瓷製程可大致分為六大步驟：挑選原材料(Raw material selection)、配料(Batching)、粉末處理(包含鍛燒及研磨)(Powder processing)、成型(Forming)、燒結(Sintering)。

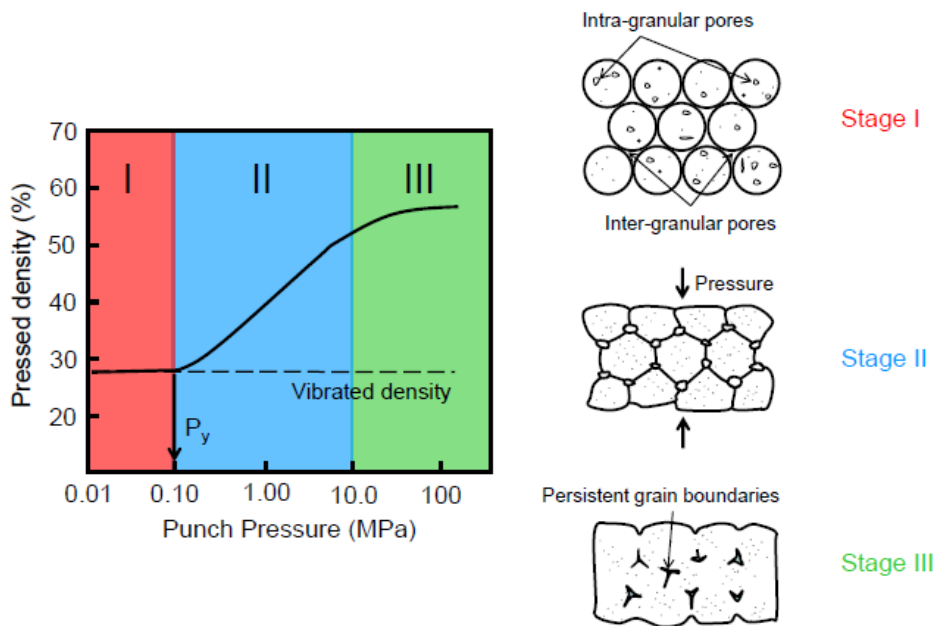
在挑選原材料方面，基於不同用途，其要求的材料純度亦有所不同。對於傳統瓷器等等而言，並不需要純度要求。對於工業用礦物而言，其純度要求則需 85-98%以大量生產建築材料、部分電子陶瓷材料或添加於玻璃製程中。而工業無機化合物的要求則更為嚴格，其純度要求須達 98-99.9%。特殊無機化合物的要求是最為嚴格的，其純度必須高於 99.9%。此類化合物用於化學氣相沉積(CVD)、溶膠凝膠法(sol-gel process)等高端製程以生產高科技陶瓷產品。唯有達到此高純度，才能精細控制化學組成、成品內部均一性及顆粒尺寸。以氧化鋁的製程為例，首先要尋找富含鋁土礦的岩層，目前探知富含鋁土礦藏的國家計有澳洲、巴西、中國、圭亞那等等，但就氧化鋁的產量而言，以澳洲的產量居首，其次是中國再來是巴西。為了取得所需的顆粒形狀與尺寸，析出製程的控制是必須的，由於析出製程的成敗是由結晶與長晶所控制，並依溶液的溫度及濃度控制結晶及長晶的速率。因此提高溶液的過飽和濃度會提升結晶速率並降低顆粒尺寸。而提高溫度則能有效提升溶液的過飽和度。在溶膠凝膠法中，膠質顆粒會與溶液形成膠體，此狀態能限制化學物質的擴散與集合，膠體會經過乾燥、鍛燒及研磨形成粉末。

配料步驟的一開始會依二元相圖尋找適合的配方比並將適當尺寸的原料進行混合。在混合中有幾個要素是相當重要的，包含：顆粒尺寸分布、顆粒形狀、顆粒密度等等。理想狀態下的混合應達到單一分子其周圍(最近距離)皆為其他分子。現實中最理想的狀態則為隨機分布，雖無法達到完全分散，但分子分佈是完全無序的。而混合的機制可歸因於擴散混合及對流混合。通常混合的先期會以對流為主，將分子大區塊的先行分離，後期則以擴散為主，促使分子間的分散以達到均勻性。

研磨是一種相當有效的降低顆粒尺寸，並生產一致特性的產品。顆粒尺寸是藉由顆粒間相互擠壓或撞擊而縮小並趨於一致的。陶瓷材料在巨觀上被歸類為脆性材料，然而在微觀狀況下，陶瓷材料在破裂前是可變形的，意指其並不完全屬於脆性材料，甚至是具有延展性的。經研究後，發現在巨觀結構上，陶瓷材料內部具有相當多的缺陷諸如孔洞、晶界、第二相等，這些缺陷點會促使應力的集中，導致陶瓷材料在達到可變形的應力前即已破裂，其中拉伸應力及剪應力會促使缺陷擴張，而壓縮應力則會使缺陷封閉，進而限制破裂的發展。在研磨過程中，有三個因素會影響研磨速率包含研磨球的碰撞機率、顆粒間的碰撞以及每次碰撞會產生多少顆粒。不同的研磨機尺寸以及研磨機旋轉速率都會影響上述的三個因素，甚至乾式研磨或濕式研磨亦會影響研磨尺寸的極限或需研



磨的時間。由於研磨球也會碰撞或摩擦，因此在研磨過程中也要注意研磨球所造成的污染。在此階段，也可運用固態合成來化合簡單的氧化物(反應物諸如碳酸化合物、氫化合物、氮化合物等等)或用混合的粉末形成複雜的氧化物(例如氧化鋅和氧化鋁反應形成鋁酸鋅)，此類化合反應絕大多數都是吸熱反應，也因此需持續性的提供熱源以維持反應。在進到成型階段時，需同時提到進料的一致性，進料的一致性同時包含了進料中的數量、尺寸、尺寸分佈等等，而些微的差異性有可能影響後續進料過程或成型的狀態。進料時，依據溶液含量的不同，可依溶液量多寡由低到高依序分類為粉末(powder)、顆粒(granule)、塑形體(plastic)、糝糊(paste)、漿體(slurry)。依據不同的產品、形塑的製程的不同，會採用不同的進料型態，而不同的添加物也有其相應的添加型態，例如增濕劑就會以塑形體或漿體的型態添加進製程，在成型階段，壓縮特性是最為重要的。通常在 5-10Mpa 的壓力下，半成品的密度上升最為顯著，大約 40Mpa 時會達到接近峰值，超過 50Mpa 時，半成品的密度將不會再有顯著的上升，且會造成模具的損壞。



圖二十、陶瓷成形三階段

上圖顯示，0.01-0.1Mpa 區間，各顆粒間並無互相結合，因此其密度並無提升，至 0.1Mpa-10Mpa 間，各顆粒間開始結合，因此密度有顯著的提升，10Mpa 之後，原生的空隙因壓力而封閉，各顆粒間的晶界亦開始融合、消彌，因此密度會在進一度上升，但不會像第二階段上升的如此顯著。待半成品完成後，此半成品稱為綠產物(green product)，經高溫燒結並冷卻後即為產品。

燒結階段主要作用有三，可消彌晶界、消除化學反應後產生的氣體產物

及高溫熱處理。最後的冷卻則可包括退火程序。在陶瓷燒結過程中，通常只牽涉到固態燒結，其中包括固態與孔洞的狀態。因此固態燒結的目的在於移除空隙、促進成品的收縮並賦予成品一定的機械穩定性。而其為結構的成長亦分成三階段，在第一階段，顆粒間會重新排列並互相產生強鍵結，其相對密度亦會從 0.5 上升至 0.6。第二階段，由於孔洞持續縮小或消失，因此成品的收縮率會開始上升，此現象會使相對密度上升至 0.9。最後階段，剩餘的封閉孔洞會藉由晶界向外擴散而逐漸消失，此時相對密度不再有顯著上升，但晶粒會逐漸增大。透過顯微鏡可以觀察到成品內部微結構以及晶粒形狀，藉由晶粒呈現的多邊形即可判斷該晶粒是會消失亦或會是成長。當晶粒呈現大於六邊形的多邊形時，其晶界會呈現內凹的狀態，同時代表此晶粒會繼續成長。當晶粒是小於六邊形的多邊形時，其晶界會呈現外凸的狀態，此時晶粒會逐漸縮小直至消失。而燒結程序相當重要的因素在於其溫度的高低。高溫時，會促進孔洞的擴散，使密度有效提升，同時晶粒尺寸也會相對較小。低溫時，孔洞不易擴散，會驅使晶粒成長，形成充滿孔洞且晶粒較粗大的結構。

除生產方式之外，本課程亦介紹分析材料特性的三種常用方法，分別為繞射及 X 射線光譜(Diffraction and X-ray Spectroscopy)、電子顯微鏡(Electron Microscopy SEM/TEM)及溫度分析(Thermal Analysis)，分別介紹其運作機構、相關部件名稱及目的，並教導如何判讀圖表，藉由這三種分析方法，能有效探討材料的晶體結構、表面處理結果及判讀材料的玻璃轉化溫度(glass transition temperature)、溫度擴散係數(Thermal diffusive coefficient)及溫度擴張係數(Thermal expansion coefficient)。

### (三)實驗、模擬及數位技能

本課程分為三部分，分別為學術寫作、實驗室操作及有限單元模擬(FEM modeling)，學術寫作的部分為基於實驗室操作的實驗撰寫實驗報告，以期訓練學生學術寫作及文獻搜尋、運用能力。實驗室操作以基礎材料實驗室器材為主，包含拉力試驗(tensile test)、硬度試驗(Vickers hardness test)及材料選擇(Material selection)等相關實驗。在有限單元模擬課程中，訓練學生運用 ANSYS 軟體完成模型架構並針對溫度或作用力進行模擬，並基於模擬結果撰寫報告解釋模擬結果及其所含意義。

### (四)熱與材料應用

此課程分為兩學期教授，第一學期為熱與材料關係(Heat and materials)，第二學期為熱傳導模型(Heat transfer modeling)，目的在於探討在對材料進行熱



處理時，能如何得知金屬內部溫度的分布，進而控制製程，以期得到所希望的晶相或結構。

在第一學期的課程中，主要探討如何透過計算得知不同的材料、不同的形狀其熱的傳導、對流及輻射結果。課程以一維傅立葉方程作為開頭，將熱傳導、對流及輻射與歐姆定律相結合，從而得知熱能通過物體後的溫度變化。並以此為基礎，將實例納入課程中，計算在砂模、水冷模及金屬模中，金屬液體的冷卻結果及相對應的時間關係。

在第二學期，課程中運用 MATLAB 來撰寫程式，來演算在第一學期中所學習的有限單元模型(Finite element model)，由於密度、比熱等計算最終溫度的數值皆會於材料降溫過程中不斷變化，運用軟體能更精確的預測降溫到目標溫度所費時間以及降溫曲線，此降溫曲線有助於預測材料內部的晶相形成與變化。

## (五)先進材料製造

本課程學習的範疇極為廣泛，橫跨電池、燃料電池、焊接、鍍層、超級塑化成型、金屬層積製程以及非破壞檢測，學生從上述課程中選擇有興趣的四門領域進行學習。我選擇的則為超級塑化成型(super plastic forming)、鍍層(surface coating)、非破壞性檢測(Non-Destructive Evaluation)以及焊接(Welding and joining)。

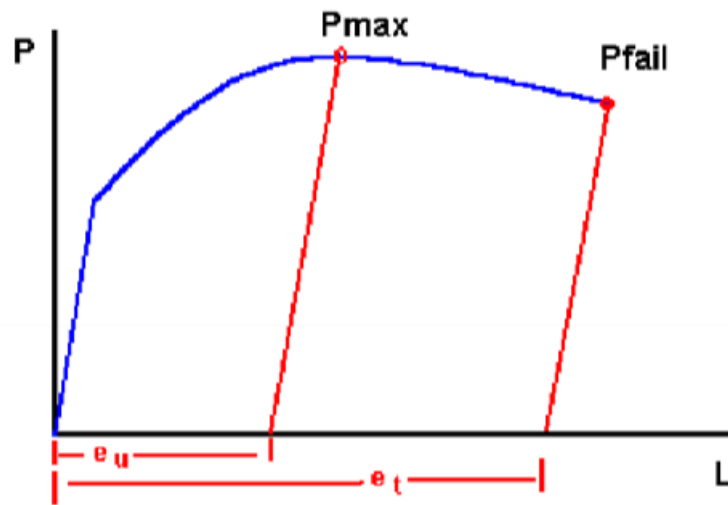
### 1. 超級塑化成型：

超級塑化材料代指那些在特定情況下，能實現超長拉力應變的多晶材料。通常來說，若單一方向伸長量能達到 200%，即足以稱之為超級塑化材料。這類材料多應用於航太、動力車輛以及鐵路運輸用途，其主要優勢在於能大量降低工具、螺帽螺栓的需求，降低部件數以利後續查找故障原因所需時間，以及有效降低成品重量及生產時間。

此類材料最初可追溯於 80 年前，皮爾森於室溫下拉伸鍍鋅共晶相合金，產生 1950%的伸長量。後續科學家開始嘗試在不同合金上實現這項特性，並漸漸收縮嘗試的合金至鈦合金、鋁合金及鎂合金，至 1975 年代，洛克希德-馬丁的前身，洛克威爾展示了超級塑化成型與擴散接合的可行性。至近代，許多新興的合金諸如鋁鎂合金(AA5083)、鋁鋰合金(AA8090)等等亦可應用於超級塑化成型技術。經多年的研究，有幾點是超級塑性成型的必要條件，1.晶粒尺寸需非常的均勻且細小，通常不超過 10 $\mu$ m。2.應變速率介於每秒 10<sup>-5</sup> 至 10<sup>-1</sup>。3.溫度需大於熔點的一半。以上條件皆是為了達成低流動應力。

而超級塑性成型的原理是基於延長材料縮頸的期程，一般材料的應變應

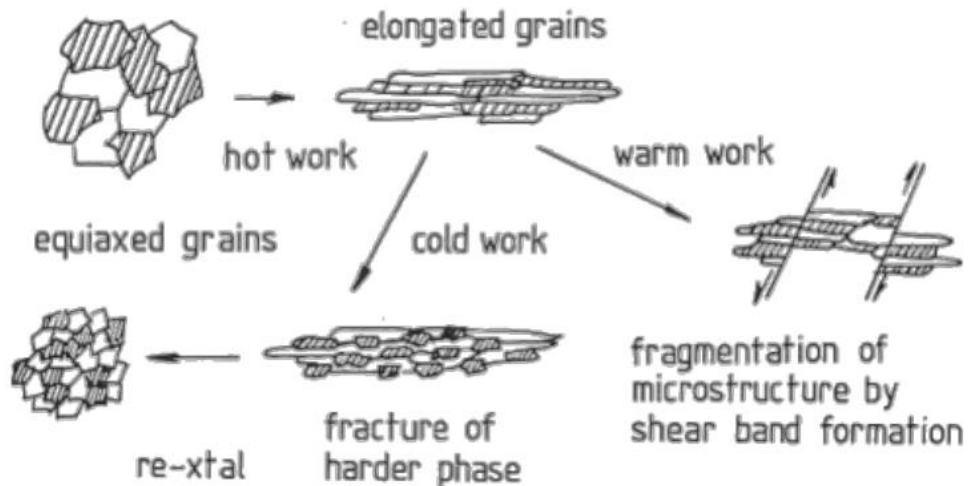
力圖如下圖所示。



圖二十一、一般材料應力應變圖，於  $P_{max}$  產生縮頸現象，並於  $P_{fail}$  斷裂， $e_t$  通常不大於 0.6-0.7

首先由應力應變圖，我們可以假設此材料的應力應變關係為  $\sigma = k \cdot \epsilon^n$ ，其中  $n$  為加工硬化指數約為 0.3-0.4。當進行拉力試驗時，樣品寬度較窄的區域(zone 2)及比較寬的區域( zone 1)都會開始承受應力並產生應變。由於 zone2 較窄，因此其應變的累積量會比 zone1 快，同時導致其承受的應力上升。當 zone2 達到  $P_{max}$  後，其後續應變將無需如此多的應力即可達成。但 zone1 將會因應力的下降而不再產生應變，因此後續的應變僅發生於 zone2 因而產生縮頸現象(necking)。更為嚴謹的應力應變關係式會如此呈現： $\sigma = k_1 \cdot \epsilon^n \cdot \dot{\epsilon}^m$ ，其中  $\dot{\epsilon}$  代表應變率， $m$  代表應變率敏感度，對於傳統合金而言，應變率敏感度約介於-0.005 至 0.015 之間。對於超級塑性成形合金而言，其應變率敏感度將遠大於 0.015，因此當應變率上升時，zone2 同時會增加其流動應力因此可以阻止 zone2 的應變，同時也增加了到破壞為止的應變。為了展現其超級塑性成形的特性，此類材料在加工時其應變率敏感度需大於 0.3。

超級塑性材料可分為兩大類，一類為複合相(duplex)，其包含複合相鈦合金、複合相不鏽鋼、複合相銅合金等等。另一類為偽單相(Pseudo single phase)，包含鋁銅合金、鋁鎂合金等等。

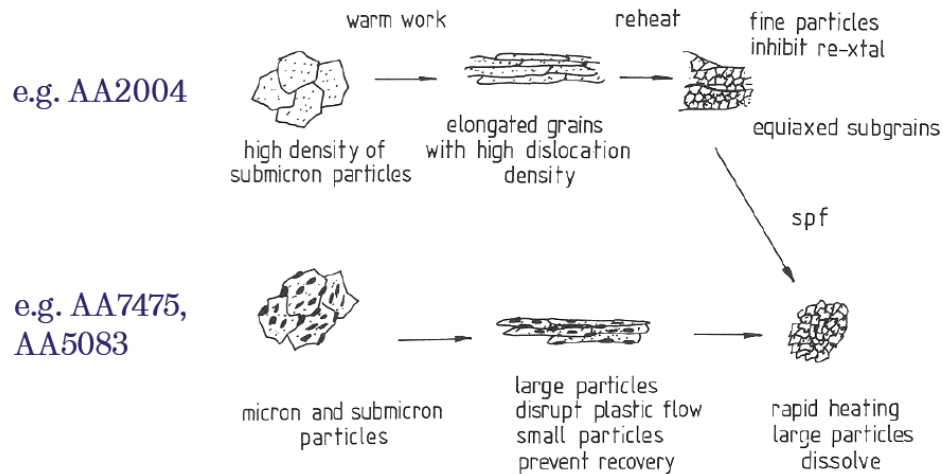


圖二十二、複合相製程

複合相製程首先需將材料熱加工至拉伸晶體(elongated grains)，其後透過溫加工或冷加工將拉伸晶體破壞成較為短小的晶體，後續經過再結晶形成等軸晶體。 $\alpha/\beta$ 相鈦合金即為此類製程的代表。 $\alpha/\beta$ 相鈦合金會先於  $1050^{\circ}\text{C}$  恆溫 30 分鐘，爾後採取熱滾壓，將金屬板厚度由 25mm 壓製成 12mm，避免鈦合金全部轉化為連續 $\alpha$ 相。經過最後加工成型後，成品會於  $900^{\circ}\text{C}$  再結晶 1 至 24 小時以獲得 3 至  $11\mu\text{m}$  的晶粒。目前此技術已運用於歐盟亞利安 5 號運載火箭的推進劑槽，其優點在於降低生產成本且無後續的固溶體處理程序，但其缺點在於高昂的工具成本及半徑的限制。

在超級塑性<sup>成型</sup>技術通常會與擴散接合技術一並運用。擴散接合是一固態接合技術，在 64 鈦合金中，其擴散接合溫度為  $900-950^{\circ}\text{C}$  並於氬氣環境中作業，其對微結構的要求與超級塑性成形為同等級的。此技術有效的接合 2-6 層金屬板在一起，而最有名的應用為 F-15 的機翼、勞斯萊斯航空用引擎等等。其優點在於取代了許多的組裝件，有效的節省成本、減輕重量並增加了尺寸的精細程度，同時減少了可能的破裂起始點。另一方面亦增加了複雜形狀的可塑性。其缺點在於進行檢查時無法拆卸檢查，另外過長的生產時程及高溫環境會導致工具耗損的增加。

偽單相合金其晶粒細化一樣是運用溫度機械處理(諸如熱加工或再結晶)來達成，偽單相合金其組成主要為固溶強化的基材及內含小於 10% 的析出相，此析出相的目的在於微觀結構上阻止晶粒成長。因此此類合金其製程有兩類，一為進行超級塑性成形時同時施以動態再結晶並維持在小於  $0.2\mu\text{m}$  的晶粒尺寸，代表材料為 AA2004 及 AA8090 合金。另一製程為在超級塑性<sup>成型</sup>製程前進行靜態再結晶，代表材料為 AA7475 及 AA5083 兩合金。此兩程序的的目的都在於限制晶粒成長，以維持超級塑性<sup>成型</sup>時的高應變率敏感度。



圖二十三、偽單相合金超級塑性成形製程

AA2004 其組成為 Al-6%Cu-0.5%Zr。其中 0.5%的鋯具有舉足輕重的地位，鋯可與鋁化合為鋯化鋁，透過動態再結晶的控制而形成分佈均勻的奈米等級鋯化鋁，進而細化晶粒。因此需要於升溫階段時使固溶體成為過飽和溶液以求極快速的析出速率，同時其冷卻速率亦需要非常高以避免鋯化鋁顆粒從固溶體中分離。AA2004 合金其加工條件為加工溫度約為 460°C，應變率約為  $10^{-3}\text{s}^{-1}$ 。若採取適當加工條件，則其超級塑性將超越其他商用鋁合金。

AA7475，其化學成分已被認定為適用於航空結構合金，其製程亦與 AA2004 有所不同，其初始微結構包含 0.2 $\mu\text{m}$  的鉻析出相，經過淬火並回溫維持在 400°C/8hr 以生成粗大的(大於 0.5 $\mu\text{m}$ )的鋅化鎂相及鋁鋅鎂相晶粒。後續透過溫滾壓縮減 80%的厚度，這些粗大晶粒會因此遭受局部性的變形及晶格旋轉。最後再快速升溫至 480°C，使其發生顆粒刺激結晶(particle stimulated nucleation)並產生細緻的再結晶晶粒(10-15 $\mu\text{m}$ )。AA7475 的超級塑性表現受再結晶的晶粒尺寸影響，其加工條件為溫度 516°C，應變率約為  $2 \cdot 10^{-4}\text{s}^{-1}$ 。

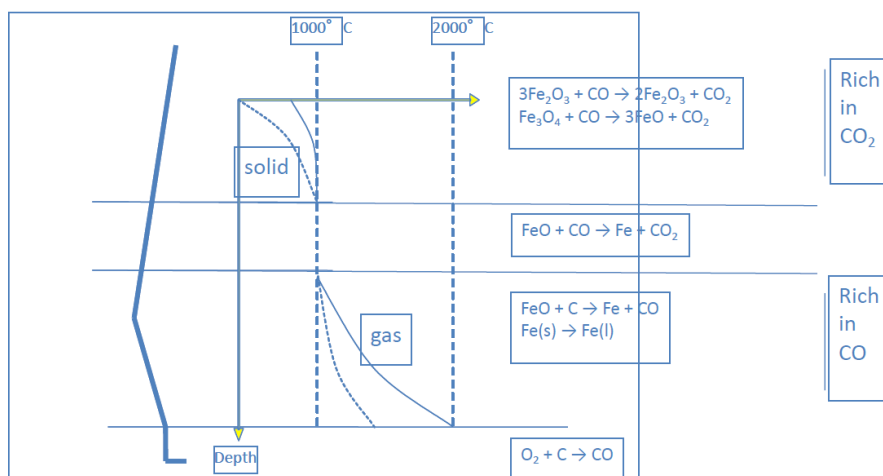
這類合金配方其商業用途早在 30 年前即已開始運用，隨著加工程序的不同，其成本及功用亦較其傳統合金昂貴及多元，近年來這些合金雖不再有顯著的改進，但工程師們亦持續追尋更為快速的成型程序。在用途分類上，AA2004 通常用於複雜的造型，AA7475 則用於高強度用途，AA5083 則用於一般工程用途。

## (六)冶金程序

本課程包含三種領域，金屬製造、金屬塑性變化、以及溫度機械程序，以下重點介紹：

金屬製造已有數千年的歷史，在 1850 年代時，雪菲爾因坩堝鋼製程使得全世界有 50% 的鋼鐵出產自雪菲爾，爾後高爐製鋼法逐漸取代坩堝鋼製程，但也產生了新的問題，即高爐產生的殘餘金屬。最基本的鋼鐵定義為鐵碳合金，而碳的含量界於 0.008%-2.14%，其具有廣泛的性質及用途，透過參雜其他元素即可生產不銹鋼、高強度鋼等等的特殊鋼。現代的鋼鐵製程可分為鐵礦冶煉程序、鋼鐵製造程序、二次鋼鐵製程及連續鑄造。而在金屬製造中需要考量熱力學、動力學、分離的難易度、製程器具材料的選用等等因素。

其中鐵礦冶煉其反應機構主要是依靠氧化還原反應及熱力學以控制反應。鐵礦、焦炭及碳酸鈣會從爐頂加入，而空氣會從爐底加入，此製程能一定程度的還原鐵礦，並降低碳、矽及錳的含量，其製程如下圖所示。



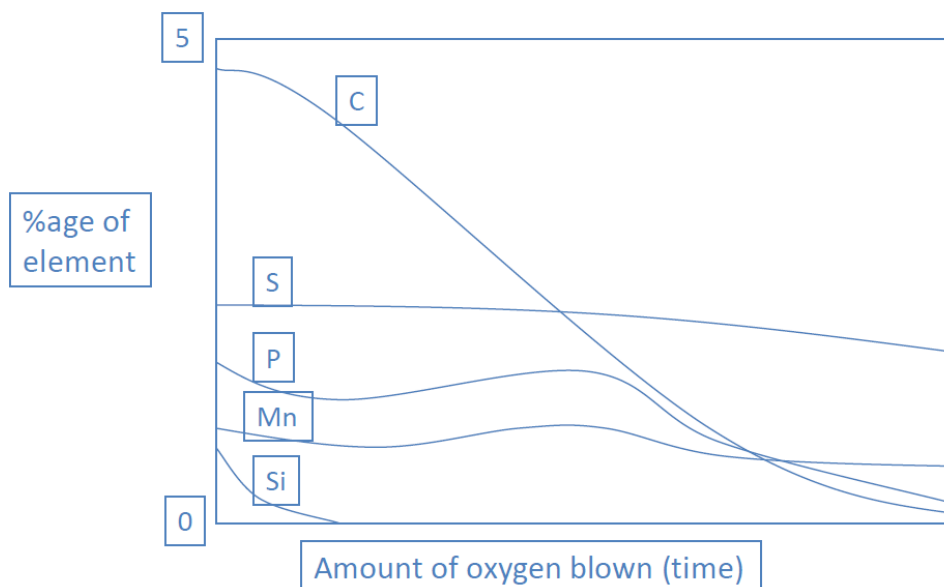
圖二十四、高爐煉鐵法簡易程序圖

由此圖可知高爐的上半部富含二氧化碳而底部則富含一氧化碳，雖然焦炭被視為還原劑，但在整個煉鐵程序中，一氧化碳才是真正的還原劑，也因此主要的鐵還原程序是發生在高爐中部，高爐頂部則將鐵由+3 價還原至+2 價。在高爐底部除了製造還原所需的一氧化碳之外，亦將固態鐵熔融為液態鐵，以利後續程序進行。

經過高爐後的鐵其內部還含有高達 4-5% 的碳，在後續製程中會將所有的碳從鋼鐵中去除，爾後依比例再添加，以維持成品的一致性及作業的簡化。鋼鐵製程則可分為基本氧化鋼鐵製程(BOS)及電弧爐(EAF)，目的在於控制鋼鐵內的碳、矽、錳等成分。基本氧化鋼鐵製程依據氣體管線從上方加入或從底部加入可分為 BOF 或 Q-BOP 等兩類，此程序中氧氣的供給量及速率控制著整體還原的程序，BOF 其爐面會形成一層岩漿態，其組成為高度氧化的碳、矽及錳等等的，其還原的程序則是透過這層岩漿態的東西做交換，因此岩漿態的狀態及組成需要監控，尤其是氧化鈣與氧化矽的占比，其占比決定岩漿態的鹼度，此數值不僅影響著鋼鐵製造的成敗，同時也影響著爐子是否易損壞。由於 Q-BOP 是直接從爐底



加入氧氣，因此其易於控制氧氣注入時間，同時爐面也幾乎沒有岩漿態的生成。但這類製程需要頻繁的更換風嘴，而且其成品將會含有高含量的氫氣，亦導致氫脆現象。其鋼鐵內部的成分隨氧氣注入的時間變化圖如下。



圖二十五、鋼鐵內部成分隨氧氣注入時間變化

此圖顯示矽會優先被完全氧化，接著碳才會開始被氧化，而硫則不易於此程序中排除，需待至二次鋼鐵製程才能有效排除。錳的氧化則主要依循著  $Mn + FeO \rightarrow MnO + Fe$  的路徑，磷的氧化則相對較為複雜，在高鹼度及低岩漿態溫度的情況下有易於磷的移除。若岩漿態的鹼度下降，則原本從鋼鐵移至岩漿態的磷會再次回到鋼鐵內，也因此岩漿態的監控是相當重要的。

電弧爐的優點在於無須控管原料的品質，但缺點在於其耗電量奇高。同時基礎氧化鋼鐵製程的單爐產量亦較電弧爐高，因此基礎氧化鋼鐵製程常用於生產建築用鋼鐵或其他一般工程用途，而電弧爐則較常應用於特殊鋼製程，例如內含鎢、鉻或鉬。由於其原料品質不受限，因此能以低廉成本取得原物料，若電費相對便宜，則此製程相較於基礎氧化鋼鐵製程就具有經濟上的優勢。

二次鋼鐵製程又稱為拌漿鋼鐵製程，其目的在於更加純化鋼鐵的成分，如去除硫，以製造高單價、高機械強度的鋼鐵。於此同時控制溫度及分析內部成分以實現再現性。最基本的二次製程可分為去氧化、去碳化、去硫化、去磷化及除去氫與氮。其中包含數個程序，最初步的為攪拌法，通常會使用氫氣當作介質，在使鋼鐵內部均質化的同時進行脫去雜質的作用。第二步，也是最有效率的方法為真空法，此法能促進氣體分子脫離鋼鐵，需額外添加的元素也能於此時加入，第三步為注入法，此程序

目的在注入矽化鈣或鋁化鈣以移除硫，而去氧化程序中，會考慮的添加物為鋁、錳及矽，其中鋁的去氧化作用最強，使用鋁作為去氧劑的情況下，爐壁的材料選用則要避免採用富含矽的爐壁以避免爐子的損壞。同時對於後續鋼鐵不同的用途，例如軸承等需要抗疲勞的情況，就無法選擇鋁作為去氧劑。連續鑄造則為整個流程能否實現自動化及鋼鐵最後是否能販售的關鍵步驟。經過二次鋼鐵製造的金屬液會先流入中間漏槽。此為最後的機會調整金屬液化學成分，同時也可藉由此步驟來沉澱雜質以分離雜質。緊接著中間漏槽內的金屬流會流入模具內進行連續鑄造，其中會添加結晶器保護渣(mould flux)以避免金屬流殘留在模具上及金屬流的氧化，其對於熱傳導的控制亦相當重要，避免金屬流提前固化，降低缺陷的產生。在金屬流的流動過程中亦需要避免紊流，其可能會使金屬流包覆進氣體或結晶器保護渣。

### (七)複合材料製造與設計

本課程可分為製造及設計兩門分野，前者介紹現在流行的數種製造方式、可能造成的缺陷形式、非破壞檢測方式、在不同方向受力下可能的破壞形式以及目前的研究方向。後者則介紹不同層數疊合的複合材料其方向對物理性質的影響以及如何計算出各方向的楊氏係數(Elastic modulus)、剪力係數(Shear Modulus)及波松比(Poisson's rate)，後續更導入軟體的操作使學生了解如何在客戶提出的需求下，提出最佳解決方案，並同時考慮是否能降低完成品的重量及其價格。

### (八)形變、斷裂及疲勞

形變、斷裂與疲勞一直是材料學中重要的一環，而這三點皆牽涉到不同的產生機構與不同的結果。但其對於經濟、生命安全上的傷害卻是不變的。形變牽涉到的是差排的生成、移動及其相互之間牽涉的狀況。因此除了介紹插排種類外，也介紹了疊差與疊差能。在變形的過程中，會牽涉到加工硬化，而加工硬化的機制牽涉到差排的可移動性，其牽涉到保守移動中的滑移系統，或非保守移動中的爬升，其牽涉到差排的分裂與聚合。其次介紹了在不同晶體中的滑移系統，及六面體晶型中寬與高的比例對插排移動的影響。另外更介紹了插排與固溶體的相互影響，晶界與差排的關係，插排與第二相的影響及插排所儲存的能量的影響。

破壞則是從歷史上曾發生過的案例，介紹其發生的原因，以及後續材料學家們是如何利用量測出來的相關機械性質來預測並判斷部件的壽命。其中需考量的因素包括部件的真實強度(需考量時間、形狀、尺寸等因素)、裂縫的尺寸及其所能承受的應力、部件在使用時所能接受的最大裂紋尺寸、此

裂紋需多長時間才會成長到會瞬間斷裂的長度及我需要多常去檢查此部件是否還堪用。以上這些皆構成了斷裂模型的建立，其包括了線性彈性模型及彈性-塑性模型。其中有幾個名詞需要定義清楚，降伏(yield)代表塑性變形，通常形容降伏的缺陷皆屬於微米等級或奈米等級的缺陷，包括晶界、析出物或差排網路。而斷裂(fracture)代表高度局部的塑性變形，其顯著的缺陷皆屬於巨觀等級的缺陷，包括焊接缺陷、孔洞、疲勞或應力腐蝕。強度(strength)代表材料對塑性流動的抵抗力，最常見到即為降伏強度(yield strength)。韌度(toughness)則代表材料對抗裂縫擴大的能力，一個具韌性的材料在經歷拉力測試時，會產生降伏點並產生加工硬化及變形以吸收應力，並最後斷裂。但不具韌性的材料則不會產生降伏點，因其斷裂應力遠低於其降伏應力，所以脆性材料會直接斷裂。

其中線性彈性模型包含了英格利斯(Igls)模型，其模型是基於材料為玻璃的狀況下提出，其模型僅考慮到缺陷長與寬的比例，卻未考慮實際長寬尺寸所造成的差異，後續格利菲斯(Griffith)基於能量平衡提出他的模型，其中考慮到內部應力、彈性動能、表面能及潛能與所施加的工之間的平衡，式子表示如下： $\sigma_c = \sqrt{\frac{2E'\gamma_s}{\pi a}}$ ，其中  $E'$  為平面應力， $\gamma_s$  則是表面能雖然格力菲斯的式子能描述快速斷裂的條件，但其幾乎無法運用於分析實際情況。其原因有二，一為此模型建立於理想彈性狀況下，然而現實情況下再脆的材料都具有一定程度的降伏點，此時所需的能量會超過當初所設想的表面能。二為此模型所直接運用的能量釋放與消耗的狀況無法於實際工程問題中運用。因此後續歐洛文(Orowan)和艾爾文(Irwin)針對格力菲斯的式子提出更改，並修正為 $\sigma_c = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}}$ ，此式將塑性能納入考量，因此能有效應對於脆性材料或延性材料。而此式中的 $2(\gamma_s + \gamma_p)$ 為抗裂紋係數。於此同時艾爾文更提出了應力集中因數(K)，其式子為 $K = \sigma\sqrt{\pi \cdot a} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right)$ ，其中  $f(a/W)$  為描述裂紋形狀的式子，後續更直接將此式簡化為  $Y$ ，代表修正係數，而後續根據樣品的寬度不同，亦應證了不同寬度其斷裂應力亦不相同，當樣品寬度較細時，其斷裂形式趨向延性斷裂，斷裂應力也較高，當樣品寬度增加時，其斷裂形式會轉為脆性斷裂，而斷裂應力也降到最低值。針對不同的測試中施力的方向， $K$  值亦有所不同，爾後將拉力測試中求得的  $K$  值皆定義為  $K_{Ic}$ 。為使預測更加精確，於 1960 年，道格戴爾(Dugdale)提出塑性條降伏模型，此模型的好處在於能將裂紋所受的應力分別疊加起來。因此只要分別計算兩種裂紋下的情形，並將其疊加即可得到完整的情況。

## (九)專題報告



英國的專題研究與台灣有許多不同之處，首先，指導教授並非於入學前指定，而是於入學後第 8 周前完成指導老師的挑選。為避免學生集中指名同一名教授擔任指導老師，學校會請學生於網路上登記自己感興趣的五位教授及其排序。後續於 11 月底會得知自己的指導老師，爾後才開始與老師探討研究方向等等相關事宜。相關的文獻閱讀與實驗操作皆集中於第二學期(2 月初至 5 月底)及第三學期(6 月初至 9 月中)。第二學期期間除需應付課業外亦需思考專題報告的實作及整體架構，相當辛苦。課程的計分方式亦有所不同，在台灣，論文撰寫後即進行口試，而口試的結果決定該名學生能否畢業，後續亦需持續修改論文，直至系主任或院長簽名才算完成學業。然英國採計分制，論文佔比重 70%、口試佔比重 10%、研究成果展示佔比重 10%，指導教授評分佔比重 10%，且論文繳交後即無法再次修改，評分亦依據該次繳交的版本評分，若整體超過 50 分，則此專題研究方可算是通過標準。

## 參、心得

### 一、生活狀況

雪菲爾大學位於英國南約克郡(South Yorkshire)的雪菲爾市(Sheffield)，是倫敦以外英格蘭地區最大的八座城市之一，該市的都會區向南延伸至打比郡(Derby)北部的切斯特菲爾德(Chesterfield)，並向北延伸至唐卡士達(Doncaster)，都會區總人口高達 1,569,000 人，在英格蘭內僅次於伯明翰(Birmingham)和里茲(Leeds)。雪菲爾是一個地理環境多變的城市，建立在奔寧山脈東面山腳下，並被群山環繞，同時也是 5 條河流的匯聚之處。雪菲爾的建築大多都建築在山坡上，從外圍山坡向內可看到市中心，向外可看到山脈和鄉村。最低點的海拔高度只有 29 公尺，而某些地區的海拔則超過了 500 米，由於此獨天得厚的地理環境，雪菲爾城市被譽為英格蘭最綠化的城市，其人均擁有的樹木獨冠全歐，擁有超過 170 處林地、78 個公共公園和 10 個公共花園。加上面積 134.66km<sup>2</sup> 的國家公園和 10.87km<sup>2</sup> 的水面，使此城市有 61% 的面積均為綠地。本人亦於留英期間多次前往峰區國家公園(peak district)健行，舒緩學業壓力。這些數據表示雪菲爾市議會長期對當地生態保育以及城市綠化的重視及其成效，亦希望台灣各城市能以綠化城市為目標邁進。

在雪菲爾大學就學期間，不僅增強了專業課目上的知識，更是加強了研究能力、語文能力以及思辨能力，除此之外，對於英國人文、歷史、文化等方面亦有初步的理解。在課餘期間，學校亦會安排各式活動包括體育活動、英國城市旅遊、體驗活動，亦或者是雪菲爾大學台灣社所安排的新春圍爐等等，實為非常難得之經驗。由於雪菲爾大學是一座國際化的大學，因此常常可以接觸到各國學生，藉此

可以了解各國之間文化上的差異，於此同時亦可以接觸到一些地區有著與台灣同樣的國際處境，例如加泰隆尼亞之於西班牙或者是亞塞拜然之於俄羅斯。其處境可能比中華民國的處境更嚴重，亦提醒職對於現在國家安全的認知，全體國人亦須建立此等認知，以達成全民國防之宗旨。

## 二、醫療保健

在台灣辦理赴英留學簽證時，會同時辦理英國的醫療保險(NHS)，留學生皆須繳交約 300-400 美金，且在英就醫是一件相當麻煩的事情，首先抵達英國後要跟學校的 NHS 機構註冊 GP(類似家庭醫生)，之後每次看病都要先跟 GP 預約，通常都要預約到 2-3 周後，雖然因為已經繳付醫療保險而不必再付藥錢和診療費，但當輪到自己看病時通常病也好了。順帶一提的是醫療保險並不包含牙醫，因此洗一次牙通常就要 50 鎊，而任何的牙齒治療所費通常會超過 100 鎊，因此英國在台協會都會建議學生在出國前先檢查牙齒。急診部分，曾經有同學因為切菜切到手指而赴急診，結果護士僅給他紗布讓他在急診間外面等待了多達 4-5 個小時，雖然本人在英期間極其幸運地不用去醫院報到，但聞及這些就醫經驗，依舊會對我國的健保及醫療品質感到驕傲，並期許這立意良好的制度能永續經營。

## 三、學術與工業

在產品的研發過程中，有一著名且亦為本廠運用的分級制度稱為 TRL 分級，其將產品的生命週期從研發到量產分成了十個階段。其中 TRL1-TRL4 可被視為學術研究階段，其包含了基礎概念的成形、驗證以及其可於實驗室環境下作動。而企業界通常只對 TRL8-10 的階段感興趣，其包含系統驗證及展示、全系統運作和最終量產。在這之間，TRL5 到 TRL7 的空窗被稱為死亡之谷，其肇因於此階段需要大量資金以及實際的環境測試。在雪菲爾大學，為了彌補這之間的需求而設立了先進製造研究中心(AMRC, Advanced Manufacturing Research Center)。其設立目的即在於與當地或國際企業合作，由公司及學校共同投注部分資金及學校提供的高端研究人員，共同克服 TRL5-TRL7 的死亡之谷。在這方面，本廠與國防大學理工學院之間的相關研究案足以代表本國在這方面的前瞻思想，惟本廠亦須建立足夠的科研與前置生產能量，以滿足本廠在產品研改上的即時需求。

## 四、實驗室管理

每一位材料碩士學生在進行專題之前都須接受實驗、模擬與數位技能課程，此為必修課程且未修過此課目將不得進行專題實驗。在實驗室管理部分，學校將會教導學生如何填寫危害評估表、COSHH 表格，並且指導如何選擇適當的個人防護裝具。在學生進行專題實驗前，學生須自行填寫實驗中所需的危害評估表以及

COSHH 表格並由指導教授簽署後方得以開始實驗。在進入各實驗室之後，實驗室負責人亦會安排各儀器的教育課程，包含機具操作方式、危害防護作為以及使用後清潔方式。針對核子放射類儀器，包含 XRD、XRF、Raman 繞射儀器等具放射源的儀器，亦會提供額外的教程，例如如何使用蓋格計數器、計算個人暴露劑量等等。職認為這類教育對於在實驗室的作業人員而言是相當重要的，正如在產線上會進行教育訓練，張貼標準作業流程等作為，在實驗室內亦須正視這些相關危害以及實施相關防處及預防作為，以維人員安全。

## 肆、建議事項

- 一、本廠目前正在經歷生產基地重建的過程，在新式廠房興建中，各式機具或整條產線亦考量了以往生產經驗與未來人力精簡等方面的考量，此過程中陸續面臨火炸藥廠房興建與產線上各系統整合的人才缺乏。故建議在經費允許前提下，持續性地派遣軍(士)官赴先進國家進修，或與國外廠商進行工業合作以及技術轉移，以提升人員素質，並吸收國外先進做法，以提升本廠生產能量。
- 二、未來在新式機工具納入生產任務時，相關機儀具的使用說明或儀表板可能皆以英文呈現，且需要作業人員具備程式編譯能力，為使廠內同仁能妥善運用使機具實現最大效能並於機儀具故障時有能力做先行處置，應鼓勵軍(士)官利用公餘時間進修，不論針對專業課程、語文課程、程式設計、及機電相關證照皆可有效提高人員素質，使本廠朝向高品質、高自動化、國際化的兵工廠進步。
- 三、本廠地處亞熱帶地區，氣溫變化約介於 5-40°C 之間，濕度時常高達 60-70%，對於精密機儀具或者是化學藥品而言都是相當嚴酷的環境。因此後續新建廠房完工後，若有未考量到空調的空間應一併納入考量，理想狀態下，廠房內的環境控制應與現時小口徑彈藥所的廠房同規格甚至更高規格以降低環境變化對產品的影響。此類環境控制手段亦應於本廠各實驗室落實，以確保各式實驗藥品存儲於適當的環境，同時更是為了確保檢驗結果的精確性及可信度。
- 四、考量廠房經興建後，各式新籌購之機儀具須運作生產長達 20 年或更久，基於保障其機械性能及減少維修時的產能損失，生產機具的防蝕技術、防蝕材料、表面處理等等皆應納入考量，同時考量國外機儀具其零件籌購不易且籌購期長，應於購買機儀具時一併籌購往後數年份耗材，期建立廠內完善維保系統、後勤系統，俗話說「兵馬未到，糧草先至」，唯有本廠能先期建立足夠的後勤、維保能量，方能於生產階段掌握機儀具的狀況，當未預期的故障發生時，才足以即時修復產線並投入生產。