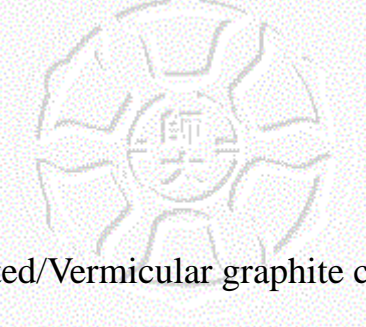


## 第二章 文獻探討

### 2-1 縮墨鑄鐵的發展



縮墨鑄鐵(Compacted/Vermicular graphite cast iron)是近幾十年來逐漸受工業重視且採用的一種新材料，其歷史淵源於 1948 年，當英國鑄鐵研究所(British Cast Iron Research Association, BCIRA)<sup>[3]</sup> 和美國國際鎳業公司(International Nickel Company, INCO)<sup>[4]</sup> 發現球墨鑄鐵時即已觀察到此種縮狀石墨組織的存在。然而當時專家學者都全心全力在研究球墨鑄鐵，無形中把縮墨鑄鐵忽略，甚至在生產過程中把縮狀石墨當成一種有害組織，且試著各種方法去消除它。

直到 1955 年，J.W. Estes and R. Schneidewind<sup>[5]</sup> 發表了一篇有關縮墨鑄鐵製造方法的論文，提到以碳化鈣/氧化鎂/稀土元素的混合物注入鑄鐵熔液中能得到縮墨鑄鐵，同時對其機械性質和鑄造特性都有詳細描述。此情況延續到 1966 年，當 R.D. Schelleng<sup>[6]</sup> 在探討微量元素對鎂鈾球墨鑄鐵的影響時，發現以鎂、鈾、鈦處理亦可產生縮狀石墨，並對縮墨鑄鐵的機械性質也做了詳細記載。此時因球墨鑄鐵已發展了近二十年，在工業上的應用以趨完備，所以人們的注意力逐漸轉向縮墨鑄鐵。1975 年英國鑄鐵研究所發展出以鎂鈦及少量鈾的鐵合金(加入鈣做改良)<sup>[7]</sup>，而推出穩定製造縮墨鑄鐵的方法。

1977 年以後陸續由 C.R. Loper, Jr 教授和潘永寧等人發表了縮墨鑄鐵的方法、品質控制、凝固形成理論、性能及應用發展<sup>[8-14]</sup> 使得縮墨鑄鐵在學理和應用上，更深為人了解。1979 年美國通用汽車公司 (General Motor Corp) 也研究出一種僅含鎂、鈾的鐵矽合金，此合金可適用於高硫熔液的處理<sup>[15]</sup>。1985 年 E.D. Pan<sup>[16]</sup> 也針對了縮墨鑄鐵的高過冷特性，生產薄件縮墨鑄鐵的方法，至此更擴充了縮狀石墨鑄鐵生產的彈性。現今各國仍積極的為此鑄鐵的發展而努力。

## 2-2 縮墨鑄鐵的組織

根據台大機械系潘教授<sup>[13,14]</sup> 之研究結果顯示縮狀石墨鑄鐵具有特殊的性質。縮狀石墨呈現了短、粗且端部圓滑類似蠕蟲的形狀，此與灰口鑄鐵中的片狀石墨不同<sup>[17~22]</sup> 而在掃描式電子顯微鏡觀察下，縮狀石墨在一共晶細胞內是相互連接的<sup>[1,23,24]</sup>，此特點與片狀石墨組織相似，卻不同於片狀石墨與球狀石墨，其中每一顆球墨是屬於一個共晶核，且個別獨立<sup>[25]</sup> 存在。

然而，在掃描式電子顯微鏡觀察下，縮狀石墨的生長模式與球狀石墨很類似，以石墨基面(Graphite basal plane)依螺旋方式生長(spiral growth mode)，其主要生長是沿著晶粒垂直於石墨基面方向進行。另一方面，縮狀石墨又具有與片狀石墨相似的層狀生長模式，其生長沿

晶粒垂直於柱面方向前進，有別於片墨鑄鐵。然而，縮墨鑄鐵的組織具有高度分叉交錯，石墨片亦較短厚且表面粗糙，端部卻較圓滑，這種具有短粗且端部圓滑的特徵，使得縮墨鑄鐵的強度高於灰口鑄鐵，雖比不上球墨鑄鐵，但卻比球墨鑄鐵有更優良的熱傳導性和鑄造性能，加上經常可發現縮狀石墨與球狀石墨共存的事實，意味二者之間在生長機構上有相互關聯的地方。

### 2-3 縮墨鑄鐵的機械性質與應用<sup>[26]</sup>

縮墨鑄鐵的機械性質是介於片墨鑄鐵和球墨鑄鐵之間，而縮墨鑄鐵所擁有的機械性質具有以下幾個特徵：

1. 熱傳導性優於球墨，低於片墨，主要是因縮墨的共晶細胞內具有相互連接的特性。
2. 耐疲勞強度，接近球墨遠大於片墨，主要是因縮墨共晶細胞呈現短、粗、末端圓滑的特性，類似球墨，因此與細、長尖銳的片墨不同。
3. 凝固收縮程度較球墨為低，因此可改善鑄件成品率，亦可澆鑄較複雜形狀的鑄件。
4. 抗拉強度介於片墨與球墨之間。
5. 切削性優於球墨劣於片墨。

縮墨鑄鐵的抗拉強度雖高於片墨鑄鐵但仍比不上球墨鑄鐵，但卻具有比球墨鑄鐵更優良的熱傳導性和鑄造性能，這種兼具片墨與球墨特性的縮墨鑄鐵主要可應用在以下這兩種場合：

1. 可以節省昂貴合金的使用，減少熱處理加工時能源和人力的消耗，而取代高強度的片墨鑄鐵。
2. 可降低高熱應力所引起之破裂，適用於鑄件熱傳導性佳，承受較大溫度變化的場合。

目前在工業上之應用有 Waupaca Foundry Co.所生產的齒輪泵浦外殼；R.H.Sheppard Co.生產的卡車、客車、搬運車等之油壓轉向器外殼。而在歐洲 Audi Mercedes、Volkswagen 等都以縮墨鑄鐵代替灰口鑄鐵來製造排氣管(exhaust manifolds)，美國 Ford、Chrysler 也已用縮墨鑄鐵來製造排氣管，其中 Ford 公司尚有剎車鼓(brake drums)及轉子也都採用縮墨鑄鐵來製造。近年來英國也將高速火車之圓盤剎車轉子(disk brake rotors)改由縮墨鑄鐵來製造<sup>[2]</sup>。

大致來說，縮墨鑄鐵在工業上之應用主要有引擎排氣管，偏心齒輪、傳動器外殼、飛輪、油壓缸個體、汽缸體、馬達殼、馬達架、活塞環、鋼珠軸承座、幫浦殼、輪殼、離心鑄鐵管件、離合器片、剎車鼓、柴油引擎本體及變速器外殼等機件都可用縮墨鑄鐵來製造<sup>[2]</sup>。

## 2-4 縮墨鑄鐵之製造方法

目前縮墨鑄鐵的生產方法大致可分為三大類。

1. 加入不足量的球化劑使球化不完全，而達到縮墨的效果。
2. 同時加入球化劑及反球化劑。
3. 利用特殊方法。

以不足量球化劑處理方法，是加入少量的鎂時，將會降低熔液中硫的含量而促使石墨變細，但鎂量增加時，石墨片則會慢慢變厚、變短最後形成縮狀石墨<sup>[27]</sup>。所以單獨添加鎂來生產縮墨鑄鐵時，其適當添加量僅能在狹窄的範圍內為之，鎂過多時會產生球狀石墨，過少時又會生成片狀石墨，所以在操作管理上有相當困難度。

以球化劑元素與反球化劑元素混合處理的方法首先是由 R.D Schelleng 所提出的<sup>[28]</sup>，一般促進球狀石墨的球化劑，鎂和稀土元素長久以來一直被業界廣為所用，而反球化的球化劑大多以鈦為主，加入這些反球化劑元素可以有效的控制球狀石墨的出現，因這種處理方式複雜且不穩定，但優點是鎂/鈦的比率可以依鑄件厚度調整。為了改善這種不穩定，在鎂、鈦中加入少量的銻及鐵矽合金，再經適度的改良之後(加入鈣)得到效果較優的 C.G 合金<sup>[29]</sup>。

以特殊方法來生產縮墨鑄鐵，大致是氮氣法和吹氣法等。首先以氮氣法來說，把氮氣注入熔液中可得到縮狀石墨組織<sup>[30]</sup>，工業上採用

氮氣作為處理劑的場合很少，主要是氮氣量控制困難和氮氣溫度太高會造成氣泡的缺陷。吹氣法，是把不同的氣體吹入經鎂處理過的熔液中亦可得到縮墨鑄鐵<sup>[31]</sup>，主要是藉著吹氣產生的攪伴作用而促使鎂在短時間內退化而得到縮墨鑄鐵，一般較佳的氣體有  $\text{CH}_2$  和  $\text{CH}_4$  可促進鎂退化和石墨成核作用。

## 2-5 縮墨鑄鐵在生產品質上的控制

縮墨鑄鐵的生產過程中，有許多因素會影響熔液處理的成敗以及凝固的狀況、也直接影響到石墨結晶的形狀及基地的組織，其中包括熔液的化學成份、球化劑種類以及加入量、處理溫度、接種劑處理方法、溫度及保溫澆鑄時間和凝固冷卻速度等，要達預期的縮墨鑄鐵，上述因素必須加以嚴密控制。

縮墨鑄鐵的生產方法與球墨鑄鐵原則上相同，然而由於縮墨鑄鐵是介於球墨鑄鐵和灰口鑄鐵之間，其在生產控制上的要求較前二者為嚴格，在目前工業上製造縮墨鑄鐵所使用的球化劑主要是以鎂或稀土元素為主。而鈦、鋁和鋇具有破壞球狀石墨的特性<sup>[30]</sup>，因此被視為反球化劑，其中又以鈦為主。

碳、矽和錳是石墨鑄鐵中主要合金元素、其含量不僅影響到石墨結晶和生長過程、且對於鑄鐵的基地組織亦具有決定作用。碳和矽能

促進石墨的結晶是屬於石墨化元素(Graphitization Element), 然而矽的作用僅是碳的三分之一, 因此碳當量的計算方式一般皆以 $\%C.E = \%C + 1/3\%Si$  來表示。熔液中的碳當量不僅影響鑄件的顯微組織, 也影響鑄造性能, 通常碳當量控制在共晶點附近最適宜。碳當量太高, 則縮墨鑄鐵中的球墨率將偏高, 雖強度、延長性較佳, 但導熱性降低, 且凝固初期結晶的石墨皆傾向於球狀, 並易生長大顆粒球墨或爆炸石墨(Exploded Graphite), 碳當量太低時, 熔液在凝固時會有縮孔(Shrinkage Porosity)<sup>[12]</sup>現象。碳當量中矽的含量對縮墨鑄鐵的顯微組織也深具影響, 矽含量如果低於 1.5% 則碳化物將晶出, 一般最好能維持在 2.0% 以上<sup>[32]</sup>。

對錳而言, 一般的加入範圍內, 其變化量對石墨組織無顯著的影響, 但對基地組織的影響很大(當考慮錳對基地組織影響的同時也必須考慮矽的作用。矽是屬於石墨化元素, 而促進肥粒鐵的析出, 相反的錳是屬於碳化物穩定元素, 而促使波來鐵的析出, 二者可說是相互抵制, 因此對於基地組織的影響以矽/錳比值來測量比單獨以錳來得準確)。含錳量增加時會造成波來鐵增加, 降伏、抗拉強度及硬度均都增加, 但伸長率降低、加工性也會變差<sup>[33]</sup>等影響。

## 2-6 接種處理<sup>[34]</sup>

利用接種效果來獲得所需機械性質已是鑄鐵製程人員的一般常識。熔融狀態的鑄鐵液僅在澆鑄前添加少量的接種劑，卻能在凝固後得到更優異的機械性質，接種的目的大略可歸納為下述三種。

- (1) 促進石墨化或白口化
- (2) 鑄造性改善
- (3) 改良石墨形狀促進共晶包生成

對於上述三點研究，目前為止，具體的結果不外乎是在片狀石墨鑄鐵製造時獲得更多的球狀石墨顆粒<sup>[35]</sup>。

接種處理亦可以適當調整鑄鐵的材質，例如改善鑄鐵的被切削性，通常必須促進石墨化，相反的為了提高鑄鐵的耐磨耗性或硬度則必須強化鑄鐵的基地組織。接種劑在製造時，必須考慮使用目的來設計。接種效果存在與否，由白口化程度及機械性質來決定之。由於鑄鐵於接種後必須迅速完成澆鑄作業，否則較晚澆鑄之鑄鐵液，會因接種效果衰退而失效，當然也就直接影響其抗拉強度。可是鑄造工程中由於作業上需要，卻往往不得不要有更長的澆鑄時間，因此選擇適切的接種劑就格外重要。



## 2-7 鑄件退火處理

許多鑄品鑄成狀態(As Cast Condition)使用，鑄件仍應作退火處理以減少鑄件的殘餘應力，並減少鑄件在應力腐蝕及破裂(Cracking)方面的感度。退火處理當可改善鑄件在高溫環境中之穩定性。

灰鑄鐵、縮墨鑄鐵及球墨鑄鐵之軟化退火，事實上是一種針對碳化物分解的熱處理。對非合金性及低合金鑄鐵而言，鐵碳形成的碳化物並非一種穩定相，在高溫中經過一段足夠時間，碳化物分解成為石墨(肥粒鐵或沃斯田鐵)，此類分解過程一般所謂的軟化熱處理。

退火(Annealing)是為了改善機械切削性或使冷激硬面部軟化，將鑄件加熱到沃斯田鐵變態溫度範圍的上方或稍下方，使波來鐵或游離碳化物分解。依其溫度範，可分為(1)低溫退火(肥粒鐵化退火)；(2)中溫退火(完全退火)；(3)高溫退火(石墨化退火)<sup>[36]</sup>。

### 1. 低溫退火(肥粒鐵化退火)

低溫退火之目的係將不含游離雪明碳鐵的普通鑄鐵或低合金鑄鐵，將其組織變為肥粒鐵+石墨的組織，以改善切削性。把鑄件加熱到稍低於變態溫度範圍的溫度，最具效率。一般低溫退火溫度 700~760 加熱時間約為 145 分/mm。

### 2. 中溫退火(完全退火)

低溫退火不能充分軟化的鑄鐵等，可行中溫退火或完全退火。在

790 ~900 加熱，保持時間可比照低溫退火，此時有通過變態點，所以 790 ~675 的範圍要徐冷。

一般而言，普通鑄鐵或低合金鑄鐵的波來鐵分解用低溫退火即足夠，盡量避免具有相變態的中溫退火。

### 3. 高溫退火(石墨化退火)

含有塊狀游離雪明碳鐵的斑鑄鐵或具有白鑄鐵的部分在鑄件冷激硬面部分分解時，可利用高溫退火。其目的即是將大量的碳化物變成波來鐵和石墨。塊狀雪明碳鐵的分解至少要加熱到 855 。高溫退火溫度通常用 900 ~955 ，保持時間因成份是從數分鐘~數小時。不過高溫氧化很嚴重，宜盡量減少保持時間。冷卻速率視用途而定，若目的為需要強度或耐磨耗性的鑄物件，可從高溫退火溫度空冷到 540 左右形成波來鐵組織；若目的在得到最佳機械加工性，則採爐冷降到 540 ，且在變態區要緩慢降溫。

鑄件在鑄成狀態時，由於各部份冷卻速率不同，極易產生鑄造應變或殘留應力而降低鑄件強度，造成變形，甚至龜裂。鑄造應力的大小取決鑄件的形狀、大小及鑄造方案材質等因素。應力消除是鑄鐵熱處理中最常用的一種。

工業常用的鑄鐵應力消除退火通常在 510 ~550 之間。在此溫度無法消除的應力，則需加熱至 600 以上才可消除之應力，但此溫

度會大大減低機械性質，通常不採用。

應力消除時，加熱速度和冷卻速度過大時，鑄件內部的溫度差增大而發生新的內部應力。雖然加熱過程的內部應力，可在後來的高溫保持中消去，但冷卻過程發生的內部應力會殘留於鑄件中，因此須特別注意應力消除的冷卻速度。另外若加熱速度太快時，變形增大有時會造成龜裂。

一般而言，加熱速度為 100 ~150 /hr，冷卻速度宜 50 /hr 以下。因此保持於應力消除溫度後，通常爐冷到 150 ~250 ，而形狀複雜的鑄件則需以爐冷到 100 ~150 為宜。