


第四章 實驗結果與討論

4-1 縮墨鑄鐵製程所需之添加量



在生產過程中，許多因素會影響熔液處理的成敗，如基地中石墨數的多寡和結晶的形狀等。鑄件凝固後的石墨組織大都取決球化劑的含量及碳矽值。在生產縮墨鑄鐵時，熔液中必須加入球化劑及接種劑，但由於市面上能生產縮墨鑄鐵的球化劑有數種，而本實驗乃針對 KC 合金、CG 合金和稀土元素這三種球化劑進行實驗。欲得到典型的縮狀石墨鑄鐵，各種球化劑所添加的含量均不同，而縮墨數的多寡更直接影響到整個鑄件的機械性質。本次實驗碳矽值儘可能在共晶點附近保持一個定值，以提高鑄造性能^[45]。本實驗利用三種球化劑之各種含量的比例來進行測試，實驗結果大致可歸納為以下情形 CG 合金 0.6%、0.8%、1.0%，KC 合金 0.15%、0.3%、0.45%，稀土元素 0.3%、0.45%、0.6%。結果彼此之間差異甚大。金相顯微組織如圖 4-1 所示。整體來說可分為以下三點來說明：

(一)CG 合金：

- (1)添加 0.6%CG 合金金相組織可產生 50%球狀石墨和 50%縮狀石墨。
- (2)添加 0.8%CG 合金縮墨率最高，可得 25%球狀石墨和 75%縮狀

石墨。

(3)添加 1.0%CG 合金可得 65%球狀石墨和 35%縮狀石墨，由此實驗結果可知球狀石墨佔多數，且石墨數增多，結晶形狀較為細小。

(二) KC 合金

(1)添加 0.2 % KC 合金可得金相組織 98%片狀石墨和 2%的縮狀石墨。

(2)添加 0.3%KC 合金縮墨率最高，可得 90%縮狀石墨組織和 10%球狀石墨組織。

(3)添加 0.4%KC 合金中可得 65%球狀石墨，35%縮狀石墨。

(三) 稀土元素

(1)添加 0.3%稀土元素可得 95%片狀石墨和 5%縮狀石墨，其中所得片狀石墨組織之結晶形狀和添加 0.2%KC 合金所得片狀石墨組織其結晶形狀均較細小。

(2)添加 0.45%稀土元素縮墨率最高，其中 70%都為縮狀石墨只有少數 30%為球狀石墨。

(3)添加 0.6%稀土元素可得 70%球狀石墨和 30%縮狀石墨。

因此針對以上三種球化劑所生產之縮墨鑄鐵來探討，縮墨率的多寡則是以添加各種球化劑的比例影響最為大，而要獲得較高之縮墨

率，在 CG 合金應添加 0.8% 含量，KC 合金應添加 0.3% 含量，稀土元素應添加 0.45% 含量來生產縮墨鑄鐵即可獲得縮墨率較高之縮狀石墨組織。

4-2 縮墨鑄鐵的機械性質

一般縮墨鑄鐵的縮墨數百分比應在 80% 以上。本實驗針對 CG 合金、KC 合金、稀土元素這三種球化劑所生產之縮墨鑄鐵，每一種球化劑分別以相同含量及其它參數儘量控制在相同的條件下生產八個爐次如表 4-1 所示(各組排列順序則以縮墨率高低來依序編排)。實驗結果所得之縮墨鑄鐵，經機械加工成標準試片，再進行拉伸試驗、衝擊試驗、硬度試驗及顯微組織之觀察。這三種不同球化劑所生產的縮墨鑄鐵顯微組織及機械性質如表 4-2 所示。

(一)CG 合金

- (1) 勃氏硬度平均值為 144.1，標準差為 5.28。
- (2) 抗拉強度平均值為 43.7 kg/mm^2 ，標準差為 1.14。
- (3) 衝擊值平均值為 4.6 kg-m/cm^2 ，標準差為 0.28。
- (4) 伸長率平均值為 8.05%，標準差為 1.89。

(二)KC 合金

- (1) 勃氏硬度平均值為 139.6，標準差為 4.53。

(2) 抗拉強度平均值為 37.2 kg/mm^2 ，標準差為 0.75。

(3) 衝擊值平均值為 6.2 kg-m/cm^2 ，標準差為 0.17。

(4) 伸長率平均值為 4.8%，標準差為 1.64。

(三) 稀土元素

(1) 勃氏硬度平均值為 140.3，標準差為 4.5。

(2) 抗拉強度平均值為 39.3 kg/mm^2 ，標準差為 0.82。

(3) 衝擊值平均值為 5.7 kg-m/cm^2 ，標準差為 0.19。

(4) 伸長率平均值為 3.7%，標準差為 1.74。

整體來說，由表 4-3 所示，勃氏硬度值、抗拉強度值和伸長率都是以 CG 合金所生產之縮墨鑄鐵平均值最高，另外衝擊值則以 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵平均值為最高。

4-3 鑄態縮墨率穩定性分析

本實驗以三組不同球化劑含量來分析研究，各組找出縮墨率最高一組參數，以 CG 合金 0.8% 的含量，KC 合金 0.3% 的含量，稀土元素 0.45% 的含量，儘可能以同樣參數反覆實驗八個爐次，經實驗結果三種不同球化劑所生產之縮墨鑄鐵，經腐蝕後金相顯微組織如圖 4-2 ~ 4-25 所示。

本研究是針對不同種類之球化劑(CG 合金，KC 合金，稀土元素)

來生產縮墨鑄鐵。因實驗資料屬性為類別(組別)與等距(縮墨率)資料，故選擇一方分類之變異數分析(ANOVA)來做為結果的評定工具，統計結果如表 4-4 所示，F 值為 2.8，經查表 $F_{0.05}(2, 21) = 3.49$ 。因為 F 值 $2.8 < 3.49$ ，故 $P > 0.05$ 。表示接受 H_0 (虛無假設)，即以統計上資料來看，此三組縮墨率間沒有差異。每組在八個爐次中縮墨率之平均值，CG 合金縮墨率為 75.38；KC 合金縮墨率 83.13，稀土元素縮墨率為 69.75，明顯以 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵平均值最為高，另以這八個爐次所得縮墨率之變異數和標準差來分析，CG 合金變異數為 134.84 標準差為 11.61；KC 合金變異數為 44.98，標準差為 6.71；稀土元素變異數為 206.21，標準差為 14.36，如表 4-5 所示。其中以 KC 合金所得變異數和標準差最小，其次為 CG 合金，最大值為稀土元素。針對上述縮墨率之平均值、變異數和標準差，可知以 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵縮墨率最高且最穩定，其次為 CG 合金，最低為稀土元素。這三種球化劑所生產之縮墨鑄鐵縮墨率比較圖如圖 4-26 所示。

4-4 鑄態基地組織穩定性分析

本研究利用三組球化劑來生產縮墨鑄鐵，在鑄態下經機械加工成小試片，經 5% Nital 濃度的腐蝕，時間 10 秒，所得基地組織經統計結果如表 4-6 所示，CG 合金基地組織肥粒鐵平均值為 59.38%，波來鐵平均值為 40.62%，標準差為 4.17。KC 合金基地組織肥粒鐵平均值

為 59.38%，波來鐵平均值為 40.62%，標準差為 9.03。稀土元素基地組織肥粒鐵平均值為 38.75%，波來鐵平均值為 61.25%，標準差為 5.83。其中以 CG 合金所得之基地組織標準差 4.17 最小，故以 CG 合金所得之基地組織穩定性最高。由圖 4-27 可發現 CG 合金所生產之縮墨鑄鐵縮墨率愈低，肥粒鐵所佔之比例則有上升之趨勢，另外 KC 合金和稀土元素所生產之縮墨鑄鐵隨著縮墨率愈低則肥粒鐵所佔之比例有向下之趨勢，尤其以 KC 合金最為明顯。另外稀土元素所生產之縮墨鑄鐵基地組織中所佔之肥粒鐵約 40%，波來鐵約 60%，相對於 CG 合金和 KC 合金，肥粒鐵基地組織則較低，波來鐵基地組織則較高，可能原因為添加 0.45% 稀土元素來生產縮墨鑄鐵可能稍多一些，若以添加 0.4% 來生產縮墨鑄鐵，肥粒鐵則可提升。

4-5 鑄態縮墨鑄鐵的硬度值穩定性分析

利用三組球化劑所生產之縮墨鑄鐵來分析，其中鑄件的硬度值是採用勃氏硬度試驗機 $\phi 10$ mm 的鋼珠，1500 kg 荷重，持續 30 秒後，來進行量測。CG 合金所生產之縮墨鑄鐵勃氏硬度值如圖 4-28 所示。由圖可知縮墨率愈低時則硬度值有向上提升的趨勢。而在 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵勃氏硬度值變化如圖 4-29 所示。由圖可知 KC 合金的縮墨率約維持在 70% ~ 90% 之間，因 KC 合金縮墨率較為集中，但縮

墨率愈低時硬度值仍有愈高的趨勢。在稀土元素方面所生產之縮墨鑄鐵勃氏硬度值如圖 4-30 所示。由圖可發現縮墨率和勃氏硬度值的變化，縮墨率愈低，硬度有愈高的情形。上述三種球化劑縮墨率愈低勃氏硬度值有愈高的傾向，其原因為在縮墨鑄鐵基地組織中肥粒鐵愈多，勃氏硬度值則會愈低如圖 4-31 所示，且縮墨率愈低，球狀石墨愈多的情況下，因球狀石墨的共晶細胞具有一顆顆球狀的晶粒，是屬於較不易被破壞之結構，因此縮墨率愈低時勃氏硬度值愈高。但整體來說，以 KC 合金所得之勃氏硬度值趨勢線斜率最小，因此 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵勃氏硬度值最穩定。

4-6 鑄態縮墨鑄鐵的抗拉強度和伸長率穩定性分析

鑄件經萬能試驗機測試結果，使用 CG 合金所生產之縮墨鑄鐵，拉伸試驗結果如圖 4-32 所示。抗拉強度值大部份都維持在 $41 \text{ kg/mm}^2 \sim 45 \text{ kg/mm}^2$ 之間，隨著縮墨率愈低，強度有愈高之趨勢。伸長率則隨著縮墨率愈低伸長量愈大，如圖 4-33 所示。而 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵，抗拉強度值由圖 4-34 所示可發現隨著縮墨鑄鐵之縮墨率愈低其抗拉強度有愈小的趨勢，但大都介於 $36 \text{ kg/mm}^2 \sim 39 \text{ kg/mm}^2$ 之間而伸長率的變化，則差不多都維持在 $3.3\% \sim 6.6\%$ 之間如圖 4-35 所示。在稀土元素所生產的縮墨鑄鐵，可知抗拉強度值隨著縮墨率愈

低，其抗拉強度值有愈高的趨勢，大多介於 $38 \text{ kg/mm}^2 \sim 41 \text{ kg/mm}^2$ 之間，如圖 4-36 所示，而伸長率的變化則大都介於 $1.6\% \sim 6.6\%$ 之間如圖 4-37 所示。整體來說，CG 合金和稀土元素的縮墨率愈低，其抗拉強度值都有向上提升的趨勢，主要是縮墨率愈低，球狀石墨愈多，其晶粒組織的結構愈不易被破壞，但在 KC 合金中因縮墨率較為集中，大多維持在 $70\% \sim 90\%$ 間，抗拉強度反而隨著縮墨率的減少而有著愈低的傾向，另一方面由圖 4-38 所示在基地組織中縮墨率愈低波來鐵有愈多之趨勢，CG 合金和稀土元素在基地組織中肥粒鐵愈多情況下，抗拉強度則明顯向下，而 KC 合金肥粒鐵的百分比愈多時抗拉強度反而有向上情形。此外由圖 4-39 所示 CG 合金、KC 合金和稀土元素三種球化劑在基地組織中肥粒鐵愈多伸長率也隨之變化，且有愈下之趨勢，其中以稀土元素最為明顯，其次為 KC 合金最後為 CG 合金。針對以上描述 KC 合金縮墨率和抗拉強度之特性，主要可能性有兩種 (一)可能 KC 合金本身獨具的特性，在縮墨率相當高時抗拉強度不減反增。(二)可能在實驗過程中人為測量上誤差所引起。

4-7 鑄態縮墨鑄鐵的衝擊值穩定性分析

本實驗採用 Charpy 試驗法，無缺口的衝擊試片，經測試結果使用 CG 合金所生產之縮墨鑄鐵，其衝擊試驗結果如圖 4-40 所示。其

衝擊值大部份都維持在 $4.2 \text{ kg-m/cm}^2 \sim 5.2 \text{ kg-m/cm}^2$ 之間，縮墨率愈低衝擊值有向下之趨勢。而 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵，衝擊值則隨著縮墨率愈低，而衝擊值有愈高的現象，如圖 4-41 所示，大都是介於 $5.8 \text{ kg-m/cm}^2 \sim 6.4 \text{ kg-m/cm}^2$ 之間。在稀土元素所生產的縮墨鑄鐵，衝擊值與縮墨率成正比，縮墨率愈低衝擊值就愈低，如圖 4-42 所示，大都介於 $5.3 \text{ kg-m/cm}^2 \sim 6.0 \text{ kg-m/cm}^2$ 之間。整體來說縮墨率愈低，愈接近球墨鑄鐵其衝擊值應要有向上之趨勢，而 CG 合金和稀土元素則是相反的情形。主要因為 CG 合金和稀土元素基地組織中肥粒鐵和波來鐵所影響，由圖 4-43 所示 CG 合金和 KC 合金在基地組織中肥粒鐵所佔之百分比愈多則衝擊值有愈高之趨勢，而 KC 合金則隨著肥粒鐵所佔百分比增多，衝擊值有稍向下趨勢。

4-8 三種球化劑所生產之縮墨鑄機械性質的穩定性分析比較

CG 合金、KC 合金、稀土元素三種不同的球化劑所生產之縮墨鑄鐵，機械性質有許多的差異。以下則探討這三種球化劑所生產的縮墨鑄鐵機械性質之穩定性如表 4-3 所示。

在抗拉強度方面如圖 4-44 所示，由圖可發現以 CG 合金所生產之縮墨鑄鐵的抗拉強度平均值 43.7 kg/mm^2 最高，其中又以稀土元素所生產之縮墨鑄鐵標準差 0.82 變異數 0.68 值最小，因此穩定性最佳。

在勃氏硬度值方面如圖 4-45 所示，以 CG 合金平均勃氏硬度值 144.1 為最高，以 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵平均硬度值 139.6 最低。穩定性方面，以稀土元素所生產的縮墨鑄鐵勃氏硬度值之變異數為 20.21，標準差為 4.5 值最小，所以勃氏硬度值穩定性最佳。

在衝擊值方面如圖 4-46 所示，由圖可了解，以 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵其衝擊值平均值 6.2 kg-m/cm^2 為最高。在穩定性方面，以 KC 合金所生產之縮墨鑄鐵變異數為 0.03，標準差為 0.17，值最小，所以衝擊值最為穩定。

在伸長率方面如圖 4-47 所示，則以 CG 合金所生產之縮墨鑄鐵伸長率平均值 8.05% 為最高，但整體來說縮墨鑄鐵伸長率普遍都在 10% 以下。

4-9 縮墨鑄鐵退火處理之顯微組織

縮墨鑄鐵的退火處理是採用兩階段式，分為 A 與 B 兩組進行實驗。本次退火處理主要目的為欲了解在兩組不同的冷卻速度下，所得基地組織的穩定性。在鑄造狀態下經 5% 濃度的 Nital 腐蝕，時間 10 秒，所呈現的基地組織為 70% 肥粒鐵 30% 為波來鐵如圖 4-48 和圖 4-49 所示，之後用相同試片以 A 和 B 兩組不同退火冷卻速度來試驗，所得的顯微組織再以同樣 5% 濃度的 Nital 腐蝕，時間 10 秒鐘，所得結

果基地組織 A 和 B 兩組，均為 100% 的肥粒鐵。A 組退火處理後所得基地組織如圖 4-50 所示，B 組退火處理後所得基地組織如圖 4-51 所示。

經以上兩組實驗，在不同退火冷卻速度下均可獲得完全肥粒鐵，因此由實驗得知縮墨鑄鐵在退火冷卻狀態下，不管是爐冷至 260 再移至室溫空冷或直接移至室溫空冷都能獲得完全肥粒鐵基地組織。