

中華民國第 63 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 工程學(二)科

052405

變化球-球化時間對球墨鑄鐵球化率及機械性質
探討

學校名稱：國立彰化師範大學附屬高級工業職業學校

作者： 職二 王子恩 職二 江全宥 職二 梁宏宇	指導老師： 楊湘豐 莊嫻任
---	-----------------------------

關鍵詞：球墨鑄鐵、球化率、機械性質

摘要

本實驗以碳當量約 4.3%的鑄鐵液，經球化處理，於不同等待時間下進行澆鑄，探討球化後等待時間對球墨鑄鐵球化率、石墨分佈及強硬度等機械性質之影響。

實驗過程以固定成份材質於球化桶進行球化處理後，分別等待 5、10、15 分鐘澆鑄至預先完成的鑄模中，待凝固冷卻後取出鑄件，並於切割及加工處理後進行各項實驗探討。

從實驗結果得知，球化反應 10 分鐘內澆鑄試片其球化率、強度硬度可達最佳值。極限強度達 55.18 kg/mm^2 ，為未球化試片之極限強度 12.97 kg/mm^2 的 4 倍以上，等待時間超過 10 分鐘後強度與硬度隨著球化率有下降趨勢。但伸長率及降伏值都有倍數成長，而對硬度僅有少量提升。

壹、前言

一、研究動機：

二年級時我們職業參訪了永進機械（YCM），在參訪鑄造工廠時，看到他們在進行球墨鑄鐵的澆鑄，在熔煉過程中他們除了掌控鑄鐵液的成分之外，也進行了球化處理，當時不知道球化處理主要是做什麼的，聽完講解後對於球化有了初步的認識，也讓我們想更進一步的熟悉。在參訪時也了解到鑄鐵球化後石墨由片狀轉變為球狀，機械性質也會大大的提升，但澆鑄過程受時間影響，否則就會球化失敗。當時我們對於鑄鐵還不太了解，想說一塊鐵在液態時加入一些材料而已，怎麼能會有這麼多的變化，也不知道鑄鐵透過一些處理後可以對機械性質形成那麼重大的影響。

在學校的實習階段中，鑄鐵的熔解和澆鑄危險性高，所以平常實習課都是澆鑄鋁合金，對鑄鐵的瞭解僅限於機械材料課中，聽老師講解和看課本的圖片而已。幸運的是每年會有一次科裡為了鑄造的學生，實施鑄鐵熔煉課程，在此課程前我們與老師聊到了參訪的心得，好奇的我們向老師爭取到可以共同參與這次課程的機會，並在高三學長姐的協助下，實施球化處理，並以科展探討的方式深入探討球墨鑄鐵的相關知識。

二、研究目的：

由此上述研究動機我們定出了以下目標：

- (一) 瞭解鑄鐵液中石墨的成長過程及特性。
- (二) 探討澆鑄時間對鑄鐵石墨球化組織之影響。
- (三) 探討在不同澆鑄時間下的石墨組織對機械性質之影響。

三、文獻探討：

(一) 石墨簡介

自然界存在的結晶碳形式有兩種，一種是石墨，另一種是石墨經過900°C以上轉化的金剛石。石墨具有碳原子排列成蜂窩狀晶格的石墨烯片層狀結構如圖1(D.D. Double [1])，從各樣的石墨凝固形態，衍生出結晶過程多面生長的複雜性。證實了石墨團聚體的基本結構是通過石墨烯層的生長產生六邊形多面石墨的晶核。隨著凝固的進行，晶核通過二維或螺旋位錯成核使層生長變厚。石墨層內為強共價鍵，而層之間弱凡得瓦爾鍵，層產生多面形態和各向相異性石墨的成長行為。似乎至少有兩種機制可導致石墨的形成：(1)二維(2-D)石墨烯的生長片材，隨後發生聚集和重結晶石墨片(D.D. Double [1])；(2)石墨片晶化來自沉積在矽基生長表面上的無定形碳石墨(G.R. Purdy [2])。通常，石墨沿緊密結合的a軸方向增長更快，而不是沿緊密結合的c軸方向增長更快方向。這解釋了天然石墨片灰鑄鐵中的石墨和石墨薄片。

鑄造 Fe-C 合金中的室溫石墨形態是從液體中結晶出來，然後進行固態碳擴散生長的結果(K. He [3])。鐵熔體的化學複雜性以及熔體處理產生的成核和局部偏析的暫時性是主要的複雜因素。這些變量之間的相互作用會產生各種各樣的石墨形狀包括片狀(LG)、蠕蟲狀(CG)、球狀(SG)和回火石墨以及一些“退化”的形態，例如尖銳的爆炸狀或塊狀的石墨(John Wiley [4])。

(二) 球狀石墨形成過程

鑄造並冷卻至室溫的 Mg 或 Ce 處理過的熔體經金相試樣通常表現出多層結構，其形成過程多達三個階段。(1)液體中的成核和生長(2)通過碳擴散的共晶轉變過程中的生長通過沃斯田鐵(3)隨著碳在沃斯田鐵中的溶解度降低，冷卻至室溫期間會生長。這導致一些研究人員假設如圖 2(G.R. Purdy [2])中的階段對應於以上三個事件。然而，TEM 圖像中的第二階段與在第二階段看到圓錐形的其他兩個圖看起來非常不同。分離出的石墨圓錐形截面表明簡併石墨的形成開始。由於圖 2 中的(b)石墨是從大尺寸鑄件中的石墨浮選區獲得的，因此可以合理地假定它已經生長在液體中。發生第二階段的錐形部分是生長界面不穩定增加的結果。這個假設得到了柱狀支持在快速凝固的 Ni-C 合金中獲得的球體上發現了石墨結構，因此，第二階段可能是通過沃斯田鐵生長的結果，但也可能是與液體接觸生長的結果。

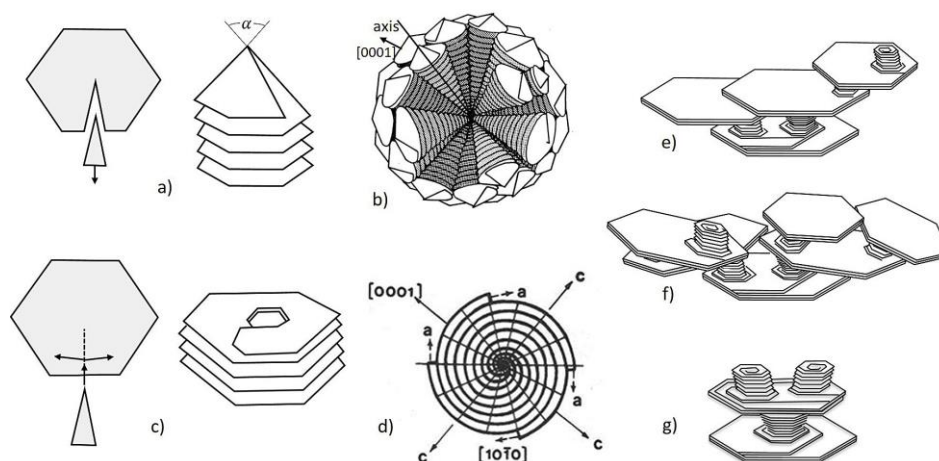


圖 1 大多數公認的石墨聚集體生長模型的示意圖

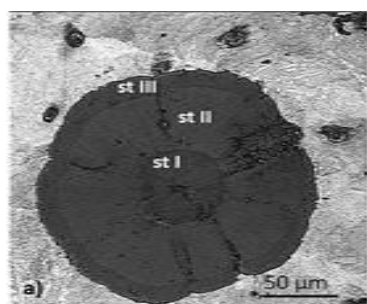
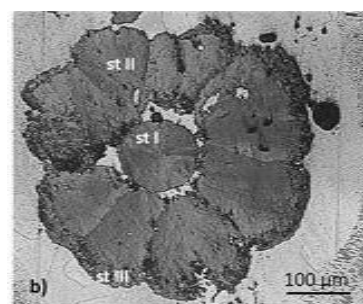


圖 2 (a) 良好形成的石墨球體的光學圖像



(b) 退化(爆炸)石墨球體的光學顯微照

(三) 球化處理<三明治法>

球化劑為大小 3~5mm 之顆粒狀，可安置在澆桶、放於流路系統或模穴中做球化處理，在澆桶中處理時，應在球化劑上加鐵屑等覆蓋劑，如下圖 3 所示，且應避免將鐵水直沖球化劑，以利鐵水充滿澆桶時，覆蓋劑恰好熔完，開始與球化劑接觸而做球化處理，此時，由於鎂、矽等的激烈氧化作用，會產生很多白煙，可用桶蓋罩住以免汙染環境，約一兩分鐘後，白煙減少，液面靜止，即可進行澆鑄工作，值得注意的是：鎂在鐵水中會逐漸燒失減少，其減少率為每分鐘約 0.001%，而欲得到良好的球化效果，鑄件中的含鎂量需占 0.04% 左右，因此，球化劑的添加量及澆鑄時間應控制得當。例如，採用含 Mg10% 之 Fe-Si-Mg 球化劑，若添加量為 0.6%，鐵水中最高含鎂量為 0.06%，故欲得到含鎂 0.04% 左右的球墨鑄鐵，應在球化開始後 20 分鐘內澆鑄完成，並讓鑄件完全凝固定形，才可獲得成功的球墨鑄件(張晉昌[5])。

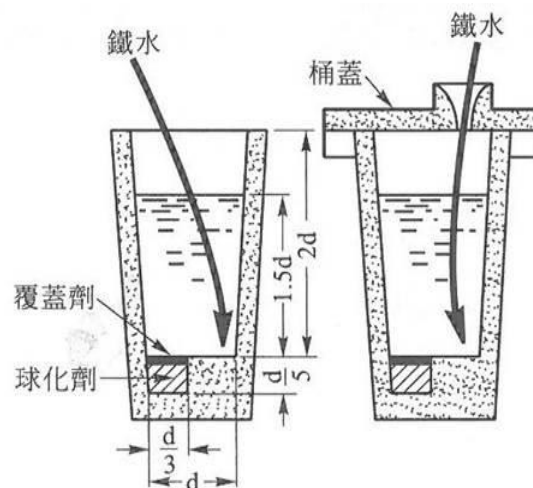


圖 3 球墨鑄鐵之球化處理—三明治處理用澆桶

(四)、常見鑄鐵介紹

1.灰鑄鐵

- (1)含碳量高(2.7~4.0%)，冷卻速率慢。
 - (2)片狀石墨，斷口呈灰色，熔點低。
 - (3)耐磨性、鑄造性、加工能力好，凝固時收縮小
- 用途:製造工具機床身

2.白鑄鐵

- (1)碳、矽含量低，冷卻速度快，以雪明碳鐵組織存在，斷口呈白色。
 - (2)硬度高、脆性大，不能承受衝擊負荷。
 - (3)凝固時收縮量大(縮孔、裂紋)。
- 用途:可鍛鑄鐵的胚件

3.球墨鑄鐵

將灰鑄鐵經球化處理後獲得，析出的石墨成球狀斷口呈銀灰色，比普通灰口鑄鐵有較高強度、韌性、塑性。

貳、設備與材料介紹

設備

件號	名稱	備註
1	高週波爐	圖 4
2	球化桶	圖 5
3	碳當量測定儀	圖 6
4	砂帶機	圖 7
5	洛式硬度機	圖 8
6	金相顯微鏡	圖 9
7	拉伸試驗機	圖 10
8	光譜分析儀	圖 11



圖 4 高週波爐



圖 5 球化桶



圖 6 碳當量測定儀



圖 7 砂帶機



圖 8 洛式硬度機



圖 9 金相顯微鏡



圖 10 拉伸試驗機

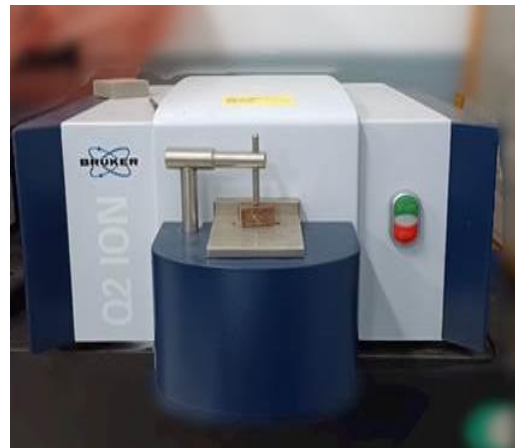


圖 11 光譜分析儀

重要設備介紹：

光譜分析儀：

火花放電分光儀 (Spark OES)，又稱為火花直讀光譜儀，是用來分析金屬合金成分的設備，它能夠分析出鐵系金屬合金和非鐵金屬合金中，金屬基質與其他元素的百分比。金屬分光儀利用火花放電的能量，將金屬表面的合金成分融熔激發為離子化的電漿，然後將電漿中的原子與離子，通過光譜儀的測試並分析光譜。由於每種元素在特定的幾個波長位置，都有其特徵峰值。透過分析這些特徵峰值的波長位置與強度，便能分析出合金成分元素的百分比。分光儀使用氬氣的理由：

在火花放電的過程中，一般會使用氬氣做為保護氣體，來噴刷 (flush) 包圍火花所及範圍的金屬表面，這樣才能讓光譜儀讀到各個元素正確的成分與比例。使用氬氣主要的原因是其惰性氣體的特性。在高能量火花激發金屬表面，產生電漿的過程中，惰性氣體本身不會與電漿中的元素反應，並同時隔離周遭的空氣中的元素，這樣才得以精準偵測那些特徵峰值在波長 200 nm 以下的元素，如：碳、氮、硫、磷(汪建民[6])。

金屬分光儀需採用高純度氬氣做為保護氣體的主要理由：

1. 氬氣屬於惰性氣體，在分光儀放電過程中，不會與合金成分產生反應。
2. 在火花放電過程，噴刷金屬表面以隔離周遭空氣，避免偵測到空氣中的元素。
3. 光譜儀能夠正確分析特徵峰值在波長 200 nm 以下的元素，如：碳、磷、硫、氮。
4. 金屬合金元素成分中，不需要知道氬元素(其含量不會影響測量結果)。
5. 氬氣的價格相對便宜，基本上，氬氣 < 氦氣 < 氖氣 < 氪氣或氙氣。

熔煉材料

件號	名稱
1	鑄鐵錠
2	球化劑
3	接種劑
4	矽鋼片
5	增碳劑
6	廢鋼
7	矽鐵

表 1 巴西球墨用低矽生鐵錠(B-D) D25 成份表

Chemical composition (wt.%)		
	Full chemical analysis	Actual average analysis
Fe	95.925%	95.826%
Si	0.50 % max.	0.001 %
C	3.50-4.50 %	4.135 %
Mn	0.035 % max.	0.007 %
P	0.025 % max	0.020 %
S	0.015 % max	0.011 %

表 2 矽鐵成份表

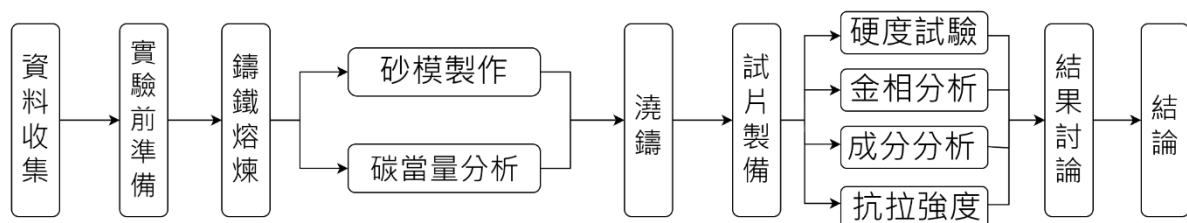
Chemical composition (wt.%)					
Si%	Fe%	C%	P%	S%	Al%
73%	25%	<0.2%	<0.03%	0.02%	<1.5%

參、研究過程與方法

一、構想設計：

這個研究主要是探討球墨鑄鐵球化過程時間對其球狀石墨形成的影響，本實驗組織設定用肥粒鐵當作基地組織，球墨鑄鐵其 C.E.值及含砂量分別為 4.3 及 2.0，在球化之前，須熟練高週波操作及溫度控制以掌控鑄鐵液的成分，然後將調配好的接種劑、球化劑放置於球化桶的球化室內，上方覆蓋矽鋼片(覆蓋劑)，將鑄鐵液加熱至 1500 度倒入球化桶內進行球化，分別於間隔於 5 分鐘、10 分鐘、15 分鐘後澆鑄於預先做好的試片鑄模中，待冷卻後取出分別進行硬度分析、金相球化率和組織、抗拉強度及光譜分析，探討球化過程等待時間與組織及機械性質的影響。

二、流程圖：



三、鑄鐵熔煉：

本研究採用的生鐵錠為巴西低矽生鐵錠加入含碳量 0.25%的廢鋼，並以含矽量 70%的矽鐵及含碳量 92%的增碳劑進行成份調配。生鐵錠成份如表 1、矽鐵成份如表 2。

熔煉初期分別在爐內加入 50 公斤生錠及 50 公斤回爐料，加熱至 1500 度後將週波爐的功率歸零使鑄鐵液冷卻至 1400 度，溫度超過 1500 度時鑄鐵雜質氧化形成爐渣，將爐渣去除後仍會有參雜在鑄鐵液中的雜質，將高週波爐功率歸零後等待 1 至 2 分鐘，使較輕的爐渣浮出鑄鐵液後再去除，鑄液冷卻到 1400 度後，將鑄鐵液倒入熱電偶澆口杯(如圖 13)，經過 C.E.分析儀第一次的鑄鐵液成分(如圖 14)，球化前將碳量增加接近共晶成份(初晶平台與共晶平台接近重合)後，進行球化處理。



圖 13 將鑄鐵液倒入熱電偶澆口杯

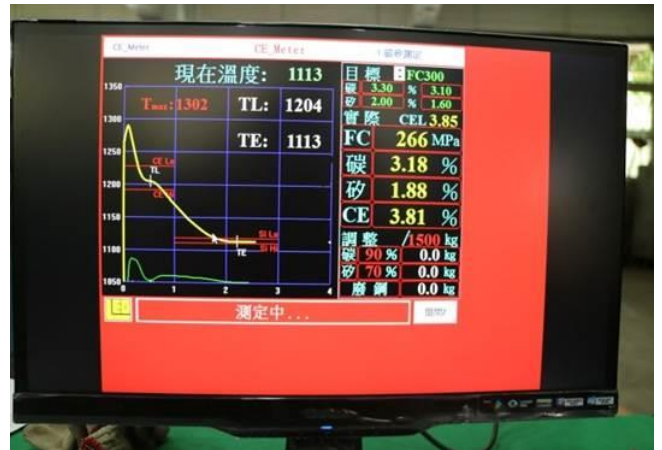


圖 14 碳當量分析儀

四、爐前準備：

將目標成分的鑄鐵液調配好後，計算澆桶的體積需倒出鑄鐵液 70 公斤，使用三明治法依序在澆桶內加入接種劑 1%、球化劑 1%、矽鋼片 1.5%，最後在倒入鑄鐵液進行球化，為了讓材料能完全熔入鐵液中，在倒入前先將高週波爐的功率提高，讓鑄鐵液溫度提升至 1500 度，鑄鐵液倒入時，避免直衝矽鋼片，要從澆桶邊緣倒入。



圖 15 爐前球化的狀況

五、砂模製作：

這實驗所利用之模型為拉伸試驗棒(圖 16)，模型包含四隻試驗棒，且皆具有緩衝功能以及預留加工裕度。模型製作考慮的緩流設計使模穴澆鑄時能均勻的流入各個試驗棒中。利用分割模型造模，利用上下兩模穴，之後於模內噴塗福是科 5CML 2000-25 鋯基塗模劑，並烘乾至 100°C 三個小時，合模澆鑄，得到所需的工件。

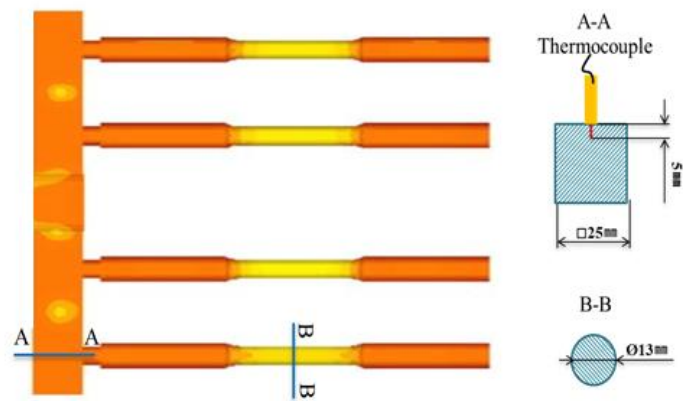


圖 16 流路系統與鑄件模型圖

六、澆鑄：

在砂模上壓鑄鐵錠(斜對角各一個)，將球化劑接種劑依序放入澆桶後，將金屬液掉倒入澆桶(圖 17)，分別為未經球化處理、等待 5 分鐘、10 分鐘和 15 分鐘依序澆鑄，等金屬液冷卻後拆箱清砂。



圖 17 澆鑄



圖 18 鑄件-試驗棒

七、試片準備：

取出鑄件後，利用鋼刷清理鑄件表面(圖 18)，採鋸切的方式鋸出試片，並用銼刀粗磨表面，最後再依砂紙號數大小使它表面平整細緻、紋路方向一致無複斜面。

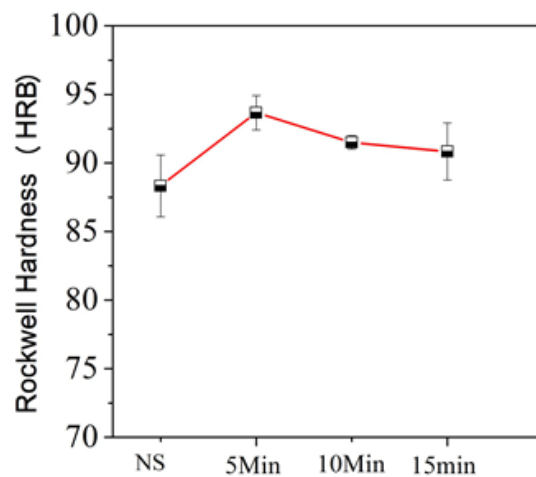
肆、研究結果與討論

一、硬度試驗

洛氏硬度試驗是用途最廣的力學性能試驗方法之一，而硬度值也是材料最常用的力學性能指標。硬度值是用來表示材料表面局部面積內抵抗變形的能力。本研究以 HRB(洛氏硬度計尺度)於試片進行多點測試。

(一)硬度試驗值

	1	2	3	4	5	平均
未球化	86	90.5	88.5	86	87	87.6
5 分鐘	92.5	93.5	95	93.5	94	93.7
10 分鐘	92	91	91.5	91.5	92	91.6
15 分鐘	88.5	91.5	87.5	92.5	90.5	90.1



(三) 實驗結果討論

球化與未球化的鑄鐵試片其硬度值差異不大，均介於 86~95HRB 之間，其中等待時間越短，硬度值有稍高的趨勢。

球化反應時金屬液內鎂抑制石墨成長的壓力比較大，石墨密度比較高但對基地組織影響不大，等待 10 分鐘的鑄鐵因為等待時間比較久，鎂的壓力較低，因此硬度稍有提高。在等待 15 分鐘的鑄鐵因為鎂的反應壓力小，抑制石墨成長的壓力已經退化，球狀石墨退回成片狀石墨，硬度也漸漸下降。

二、金相試驗

金相組織觀察：

將試片使用鋸切的方式鋸下，且使用冷鑲埋。並從#100→#200(粗磨)→#320

→#400→#600(加水細磨)→#800→#1000→#1200→#1500→#1800→#2000(精

磨)拋光後使用腐蝕液(硝酸 5c.c.加酒精 100c.c.)，再使用顯微鏡觀察(楊玉清 [7])。

(一)不同等待時間下的金相組織，（如圖 19~圖 22）。

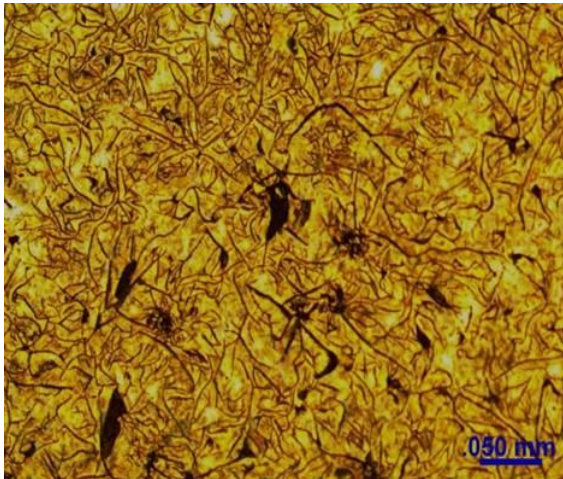


圖 19 未球化之鑄鐵組織圖

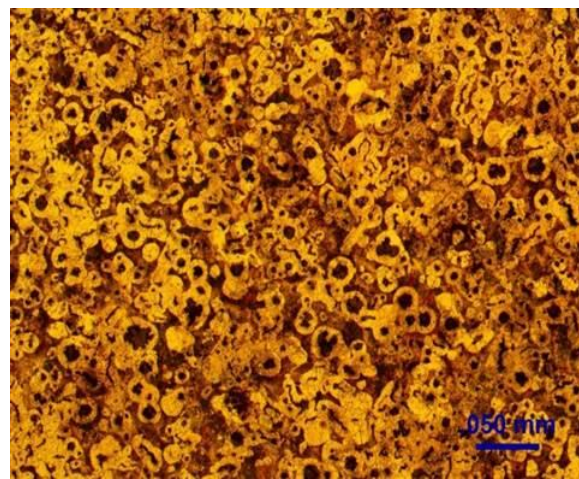


圖 20 球化後等待 5 分鐘之鑄鐵組織



圖 21 球化後等待 10 分鐘之鑄鐵組織圖



圖 22 球化後等待 15 分鐘之鑄鐵組織圖

(二) 石墨球化率觀察

將材料進行研磨至#1500 後拋光，進行石墨組織觀察，以 image-Pro Plus 進行球化率計算。依 ASTM 規範，石墨粒徑取 0.0015mm 以上，圓率達 70%以進行選取。測試過程於試片中央部位截取三處，並計算各項目的平均球化率。

1. 拋光金相圖

(1) 未球化

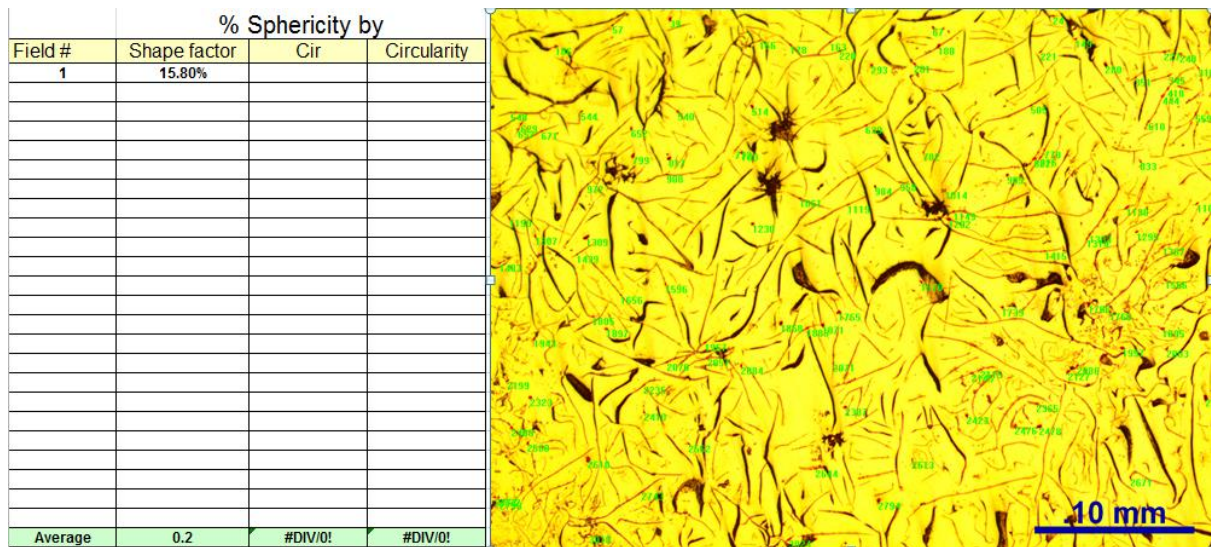


圖 23 未球化之鑄鐵拋光圖

(2) 等待 5 分鐘

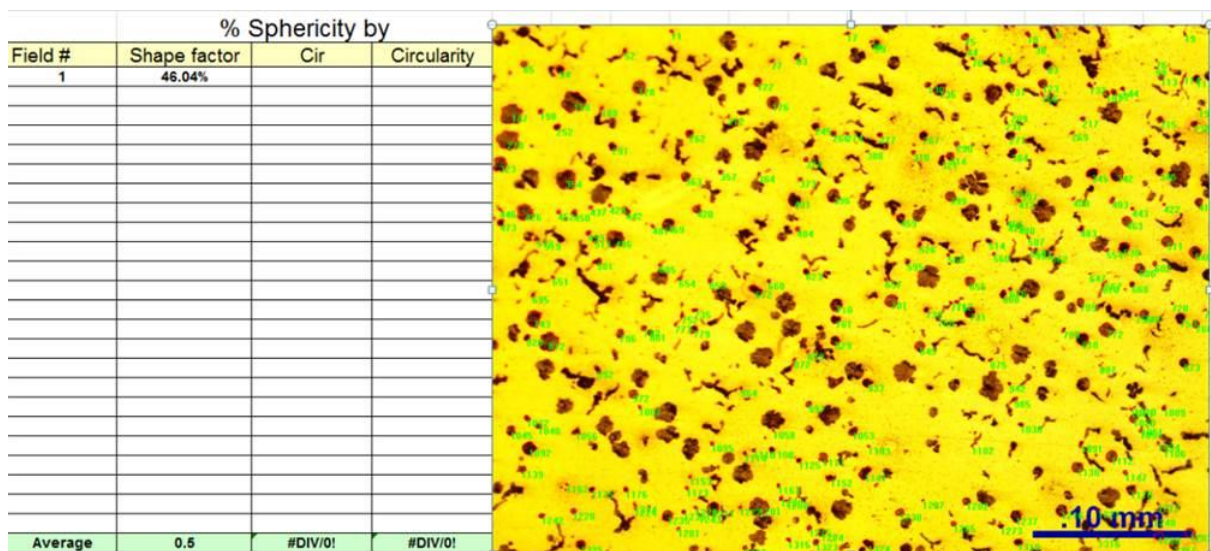


圖 24 球化後等待 5 分鐘之鑄鐵拋光圖

(3) 等待 10 分鐘

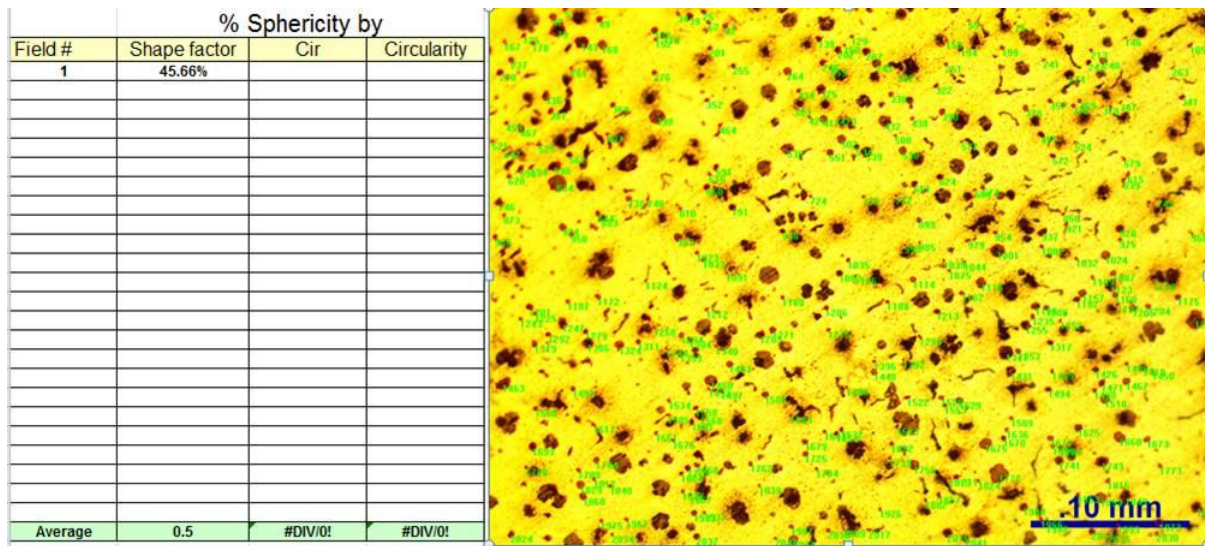


圖 25 球化後等待 10 分鐘之鑄鐵拋光

(4) 等待 15 分鐘

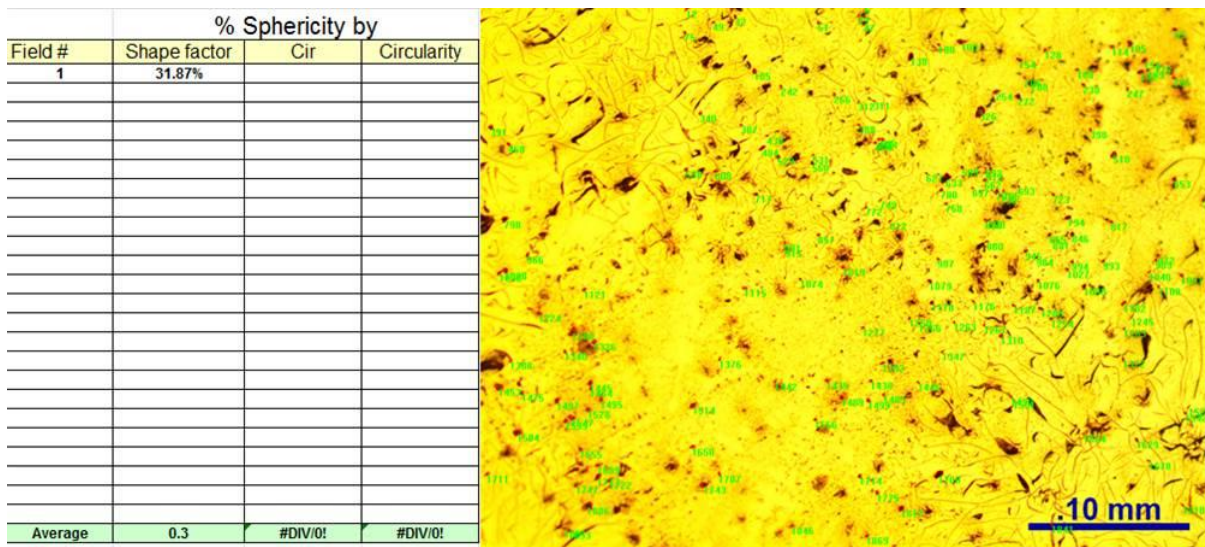
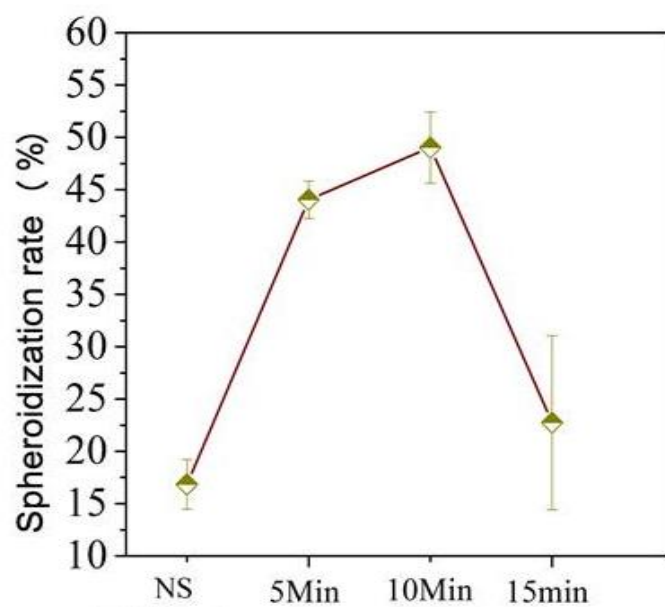


圖 26 球化後等待 15 分鐘之鑄鐵拋光

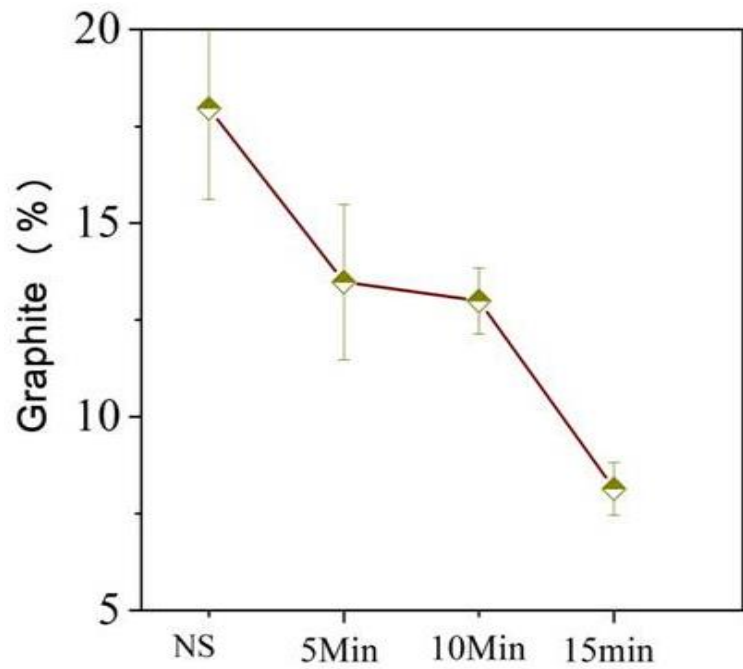
2.不同等待時間之球化率

	1	2	3	平均
未球化	15.8	19.56	15.18	16.84667
5分鐘	46.04	42.9	43.5	44.14667
10分鐘	45.66	52.46	48.98	49.03333
15分鐘	31.87	15.6	20.76	22.74333



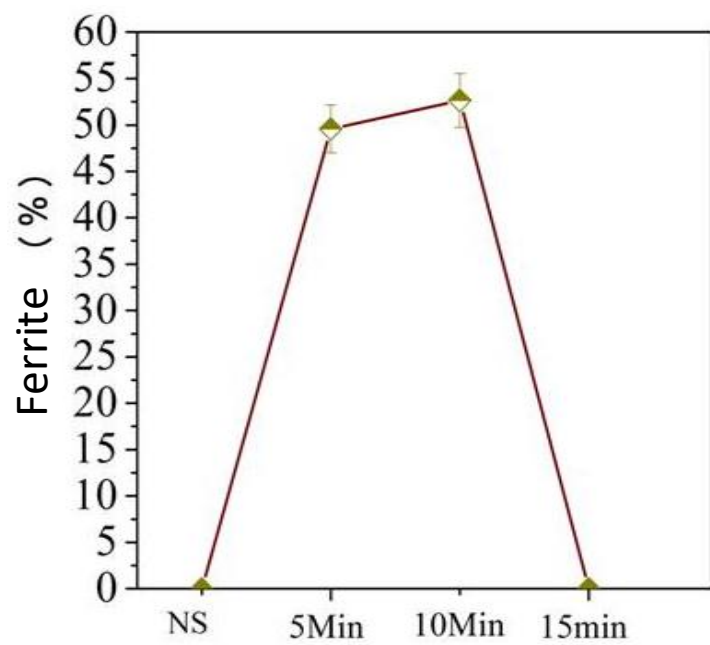
3.不同等待時間之石墨面積百分比。

	1	2	3	平均
未球化	17.0421	20.6289	16.2164	17.96247
5分鐘	15.0792	14.1226	11.2263	13.47603
10分鐘	12.1525	12.9752	13.8539	12.99387
15分鐘	7.9567	8.9033	7.5708	8.1436



4.不同等待時間之肥粒鐵含量

	1	2	3	平均
未球化	0	0	0	均為波來鐵
5分鐘	52.5173	48.4364	47.7373	49.56367
10分鐘	51.2895	55.971	50.6791	52.64653
15分鐘	0	0	0	均為波來鐵



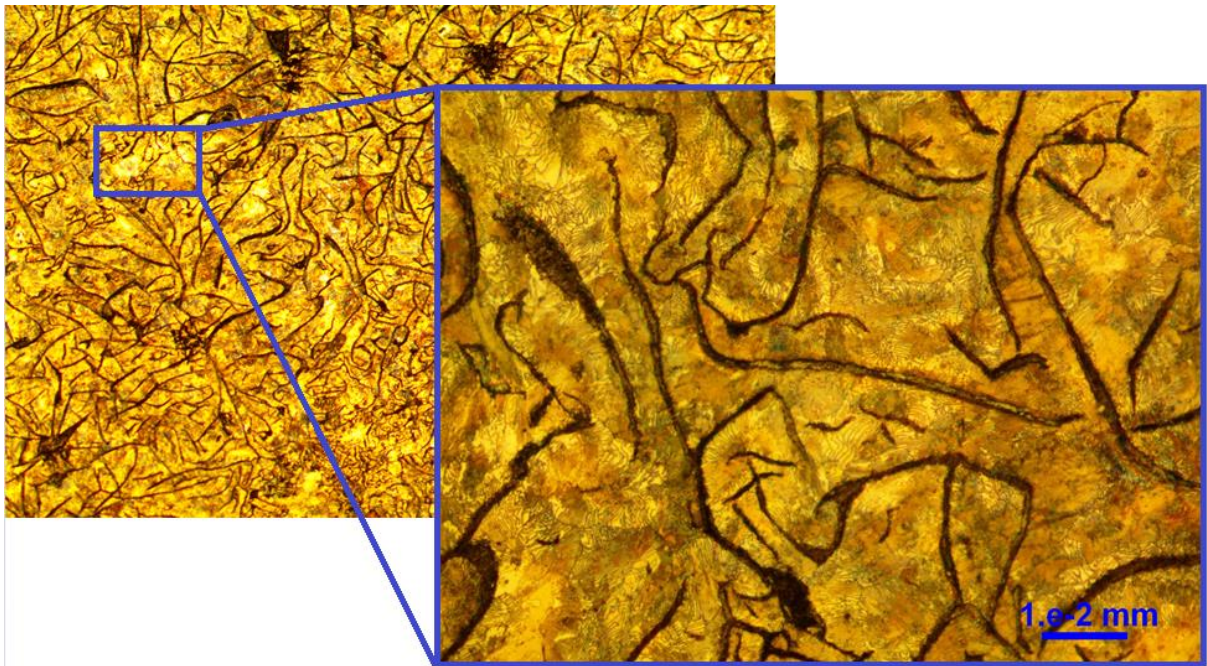


圖 27 未球化皆為波來鐵

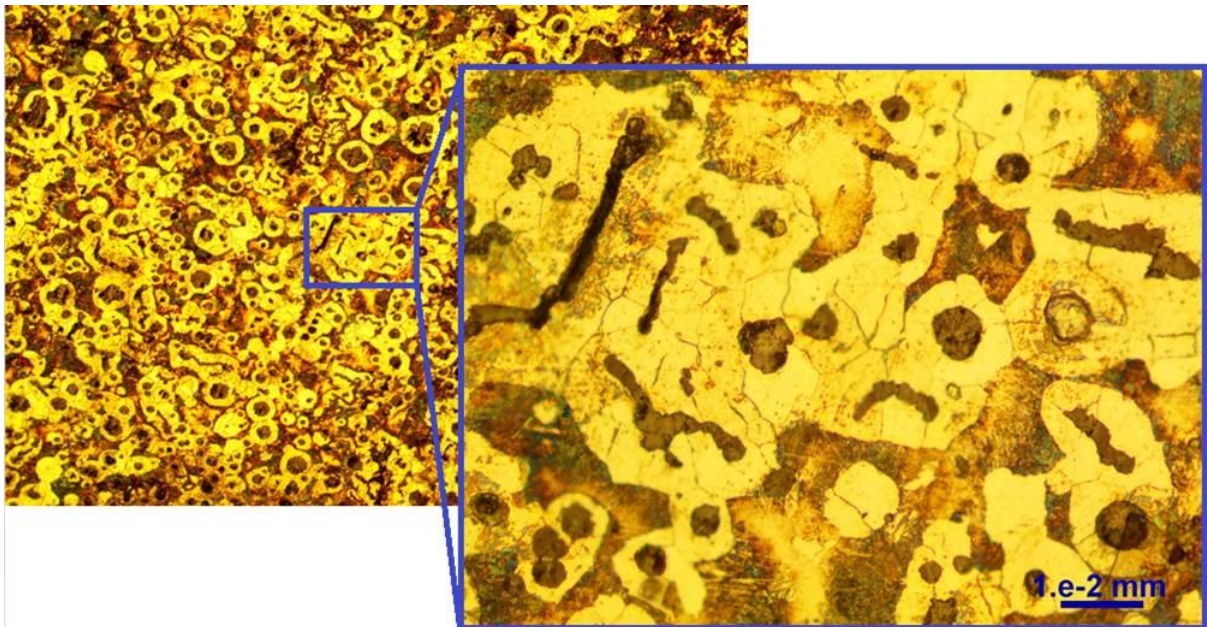
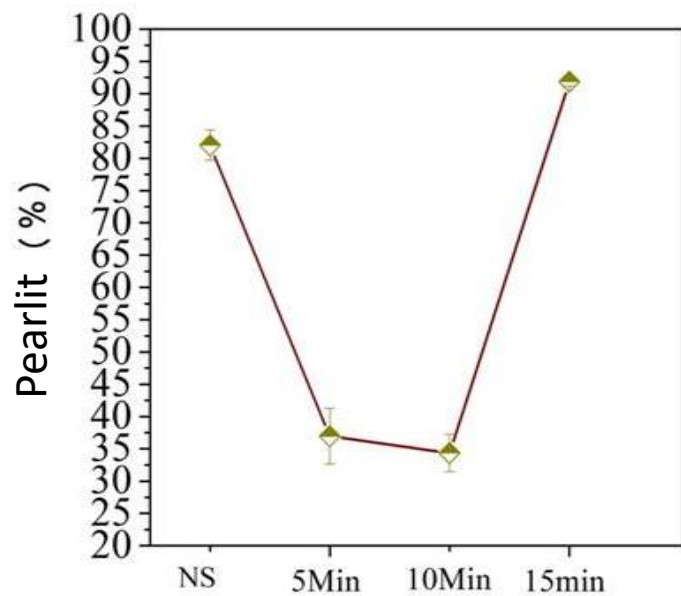


圖 28 5 分鐘都為肥粒鐵

5.不同等待時間之波來鐵含量

	1	2	3	平均
未球化	82.9579	79.3771	83.7836	82.03753
5 分鐘	32.4035	37.441	41.0364	36.9603
10 分鐘	36.558	31.0538	35.467	34.3596
15 分鐘	92.0433	91.0967	92.4292	91.8564



(三) 實驗結果討論

未球化的金相組織呈現的是片狀石墨，球化五分鐘和十分鐘中已出現大量的球狀石墨，但到了十五分鐘後，球狀石墨已明顯地變少甚到沒有了。經過球化處理的試片，在球化後 5 分鐘 10 分鐘時球化率均介於 42.9%~52.46%，達 15 鐘時球化率急劇下降至 22%左右，接近未球化處理之試片。由未球化的拋光圖觀察，可發現其球化率取決片狀石墨旁之黑點，可能為片狀石墨的支節末端或雜質，並非實際之球狀石墨。

在不同等待時間下，未球化的試片石墨含量最多，球化後 5 分鐘、10 分鐘的石墨含量介於 12.15%~15.08%之間，球化後 15 分鐘的石墨含量只有 7.57%~8.90%未球化和球化後 15 分鐘試片的肥粒鐵含量最少均為零，球化後 5 分鐘、10 分鐘的肥粒鐵含量介於 11.23%~15.08%之間。未球化試片的波來鐵含量介於 79.37%~83.78%之間，球化後 5

分鐘介於 32.40%~41.04%，球化後 10 分鐘介於 31.05%~36.56%，球化後 15 分鐘介於 91.10%-92.43%。

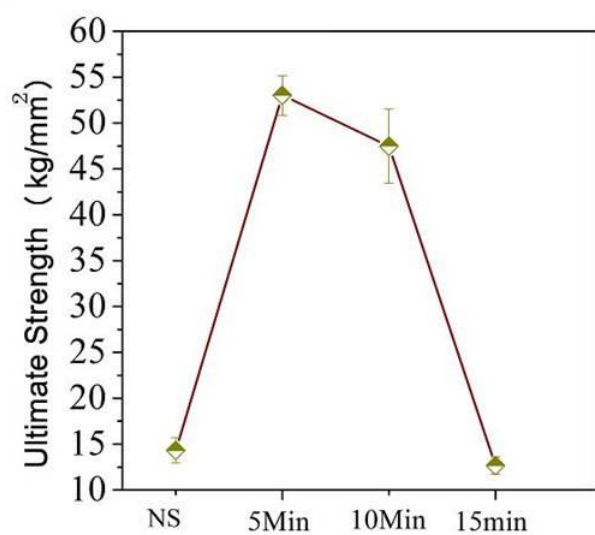
商用鑄件中，球墨鑄鐵的球化率一般要求在 70%以上,而本實驗的球化率僅 40%到 50%之間，我們找出球化率這麼低的原因，可能是球化劑反應的時機不對，業界在球化時，球化劑的反應時間在澆桶盛滿達 2/3 時效果較佳，鎂不致於過早反應，可以完全進行球化。由於球化盆設計的限制，製程無法像業界那麼精細,所以推測是金屬液倒入後，鎂直接燃燒揮發掉了，使得鎂的比例減少，而鎂減少抑制石墨延長的壓力就會不夠，所以實驗得到的球化率才會這麼低。

三、拉伸試驗

(一)實驗數據及分析圖

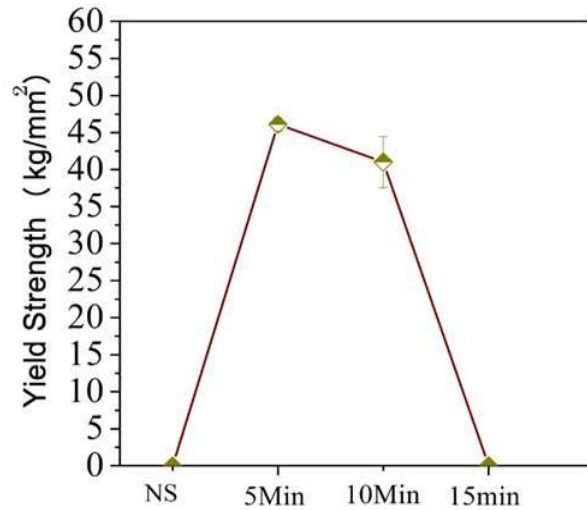
1.最大抗拉強度(kg/mm²)

	試棒 1	試棒 2	試棒 3	平均
未球化	12.97	15.69	14.30	14.32
5 分鐘	55.18	50.58	53.02	53.01
10 分鐘	44.07	46.40	51.99	47.49
15 分鐘	11.73	13.60	12.72	12.68



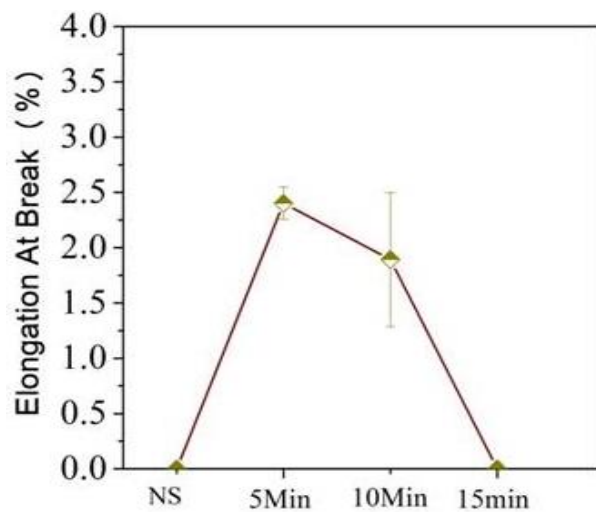
2.降伏強度(kg/mm²)

	試棒 1	試棒 2	試棒 3	平均
未球化	~	~	~	~
5 分鐘	47.01	45.22	46.11	46.12
10 分鐘	37.97	40.31	44.76	41.01
15 分鐘	~	~	~	~



3.斷裂伸長(%)

	試棒 1	試棒 2	試棒 3	平均
未球化	0	0	0	0
5 分鐘	2.403	2.551	2.254	2.402
10 分鐘	1.894	1.288	2.499	1.893
15 分鐘	0	0	0	0



(二) 實驗結果討論

材料的最大應力值未經球化時為 14.32(kg/mm²)球化後 5 分鐘時為 53.01(kg/mm²)，10 分鐘後強度稍為下降至 47.49(kg/mm²)，15 分鐘後強度已接近未球化前之應力值。在未球化及球化 15 分鐘後均未顯示出降伏值，球化在 10 分鐘內降伏 41.01~46.12(kg/mm²)間，伸長率未球化前為 0%，球化後增加至 2.402%~1.893%。

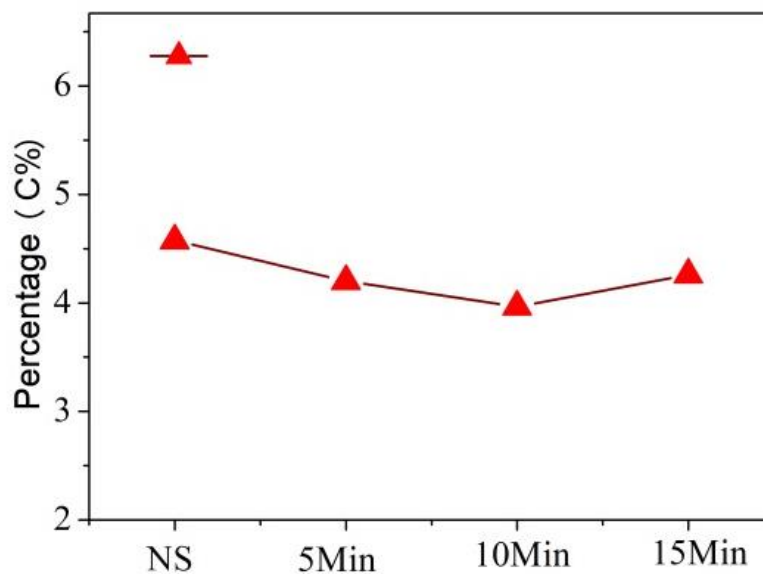
四、光譜分析

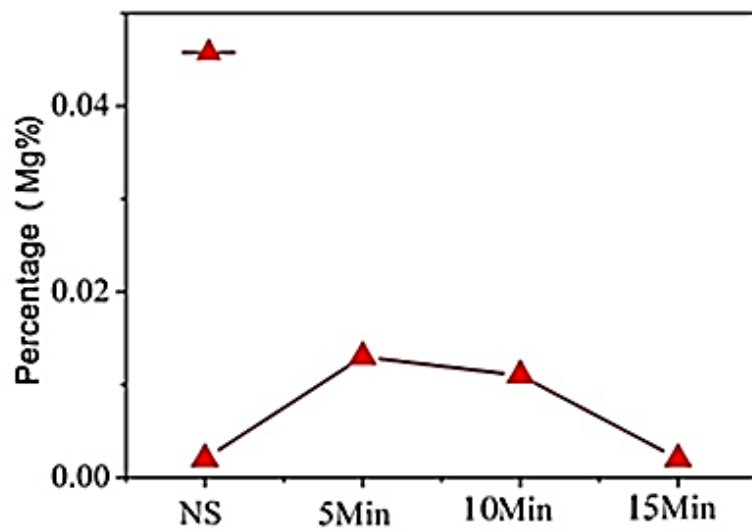
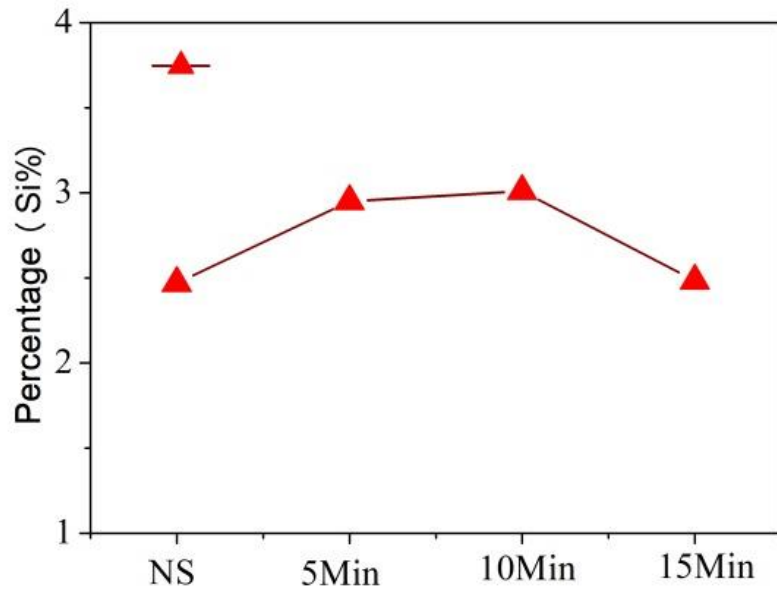
將試片以#80 砂紙研磨後,進行分光儀成分測試。

(一)光譜分析儀數據表(如下表)

成分	C%	Si%	Mg%
未球化	4.58	2.47	0.002
5 分鐘	4.20	2.95	0.013
10 分鐘	3.97	3.00	0.01
15 分鐘	4.26	2.48	0.002

(二)不同澆鑄時間參數下 C%、Si%、Mg%的變化情形。





(三) 實驗結果討論

經分光儀成份測試後發現球化前後碳量有下降，含矽量因添加接種劑及矽鋼片而由 2.47%而提高至 3.0%含鎂量等待 5、10 分鐘都低於 0.4%等待 15 分鐘低於 0.002% (背景值)表示球化後鎂已接近完全揮發。

伍、結論

本實驗運用硬度試驗、拉伸試驗、金相及光譜分析研究過後可得知球墨鑄鐵中石墨分布會影響其抗拉強度、硬度和機械性質，未球化的鑄鐵，石墨皆為片狀，其基地組織為肥粒鐵或波來鐵，質地較脆，具硬度，且抗拉強度較低，加入球化劑後石墨的成長受鎂燃燒形成的壓力影響而形成球狀，隨著等待時間的增加，壓力的減少，石墨也跟著成長。

綜合以上各項實驗可知：

- 一. 等待 5 分鐘及 10 分鐘之試片其球化率、強度、硬度達最佳值，超過 10 分鐘後強度與硬度隨著球化率急劇下降。
- 二. 鑄鐵經過球化後，強度由 12.97 kg/mm^2 增加至最高的 55.18 kg/mm^2 ，達 5 倍之多，硬度由 87.6 HRB 增加至 93.7 HRB，由此可知球化可大大提高抗拉強度、降伏強度及伸長率，但對硬度影響不大。
- 三. 球化後，石墨形式從片狀石墨變成球狀石墨，基地組織由波來鐵轉變成肥粒鐵與波來鐵混合組織，等待 15 分鐘後基地組織變回波來鐵組織，大部分石墨退化成片狀石墨，但還有少許細小的球狀石墨。
- 四. 隨著等待時間變長，鑄鐵液內的矽、鎂有氧化的趨勢，隨著鎂氧化趨近於零時球化率也趨近於未球化狀態。

陸、參考資料及其他

- [1] D.D. Double, A. Hellawell, The nucleation and growth of graphite - the modification of cast iron, *Acta Metall. Mater.* 43 (6) (1995) 2435 e 2442 .
- [2] G.R. Purdy, M. Audier, Electron microscopical observations of graphite in cast irons, in: H. Fredriksson, M. Hillert (Eds.), *The Physical Metallurgy of Cast Iron*, Stockholm, Mat. Res. Soc. Symposia Proc, North-Holland, NY, 1985, pp. 13e23.
- [3] K. He, A. Brown, R. Brydson, D. Edmonds, Analytical electron microscope study of the dissolution of the Fe₃C iron carbide phase (cementite) during a graphitization anneal of carbon steel, *J. Mater. Sci.* 41 (16) (2006) 5235e5241.
- [4] I. Minkoff, *The Physical Metallurgy of Cast Iron*, John Wiley & Sons, 1983.
- [5] 張晉昌(2010), 《鑄造學》, 全華圖書。
- [6] 汪建民(2014) 《材料分析》, 中國材料科學學會。
- [7] 楊玉清(2019), 《機械材料》, 全華圖書。

【評語】 052405

此作品提出球墨鑄鐵再經球化處理與不同時間條件下，其樣品之金相微結構與機械性質之影響，透過澆鑄實作實驗體驗鋼鐵材料製備之過程，在高熱環境下進行研究實屬不易，唯研究成果在學理探討上稍嫌不足，以球化率僅 40%到 50%之間尚未達商業標準來看，應可多方探討其學理機制，尤其金相組織中之相成分與機械性質之關聯性，亦或是晶粒尺寸、晶界影像等。此外拉伸試驗之材料性質數據呈現需謹慎確認，降伏強度與斷裂伸長數值不應有數值 0 的呈現。值得一提的是在口頭報告內提及球墨鑄鐵之相對應用，後續建議研究可以多方持續進行，舉例來說，磨耗行為、磨潤行為等，此為使用材料在實際應用之性能測試研究。

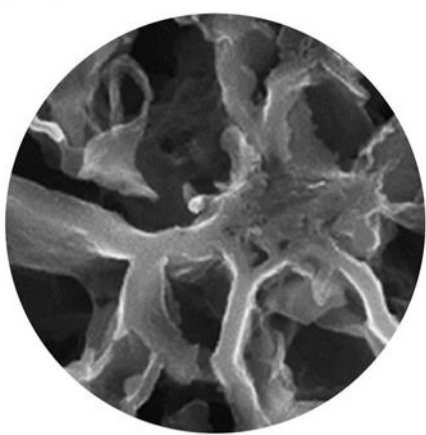
作品海報

變化球

球化時間對球墨鑄鐵球化率及機械性質探討

前言

一、緣由：



▲ 片狀石墨組織(SEM)

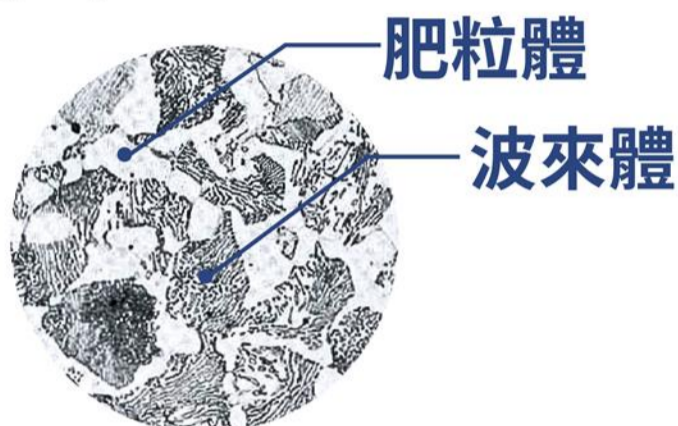
鬆散粗大

枝節雜亂

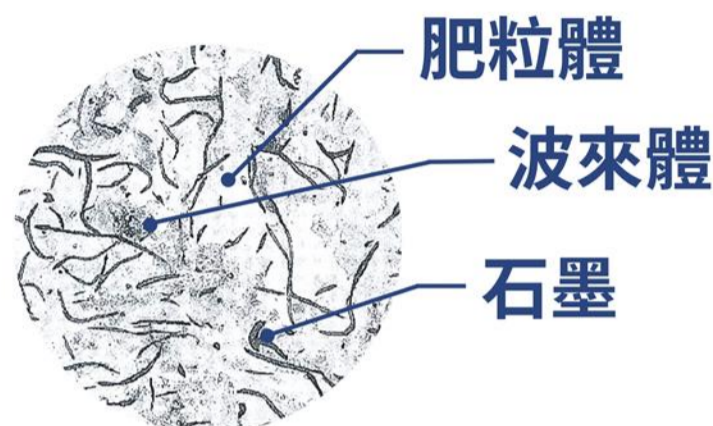
尖角應力

強度低

二、鋼與鑄鐵：

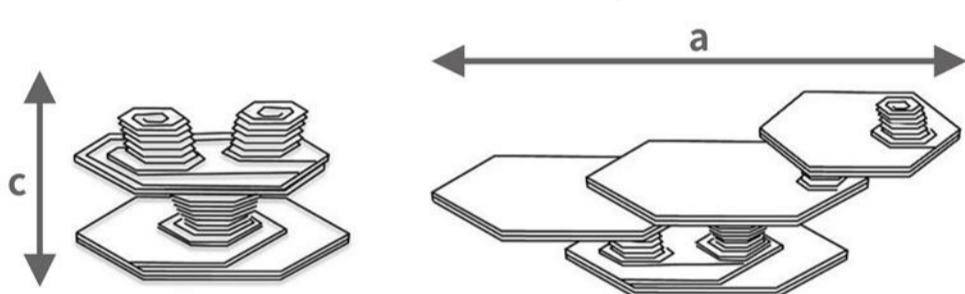


▲ 鋼之金相圖(OM)

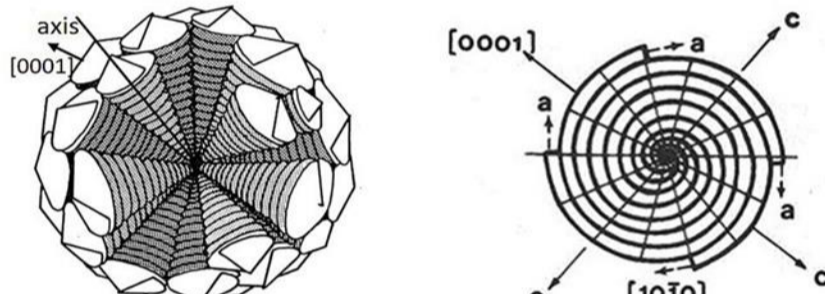


▲ 灰鑄鐵金相圖(OM)

三、石墨成長理論：



▲ 片狀成長概念圖

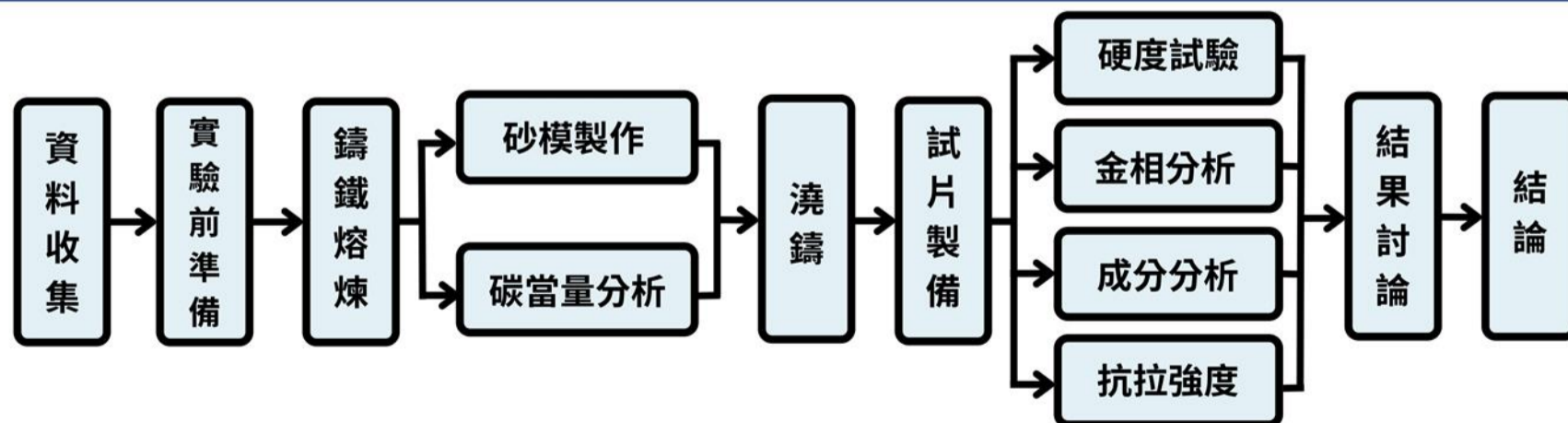


▲ 球狀成長概念圖

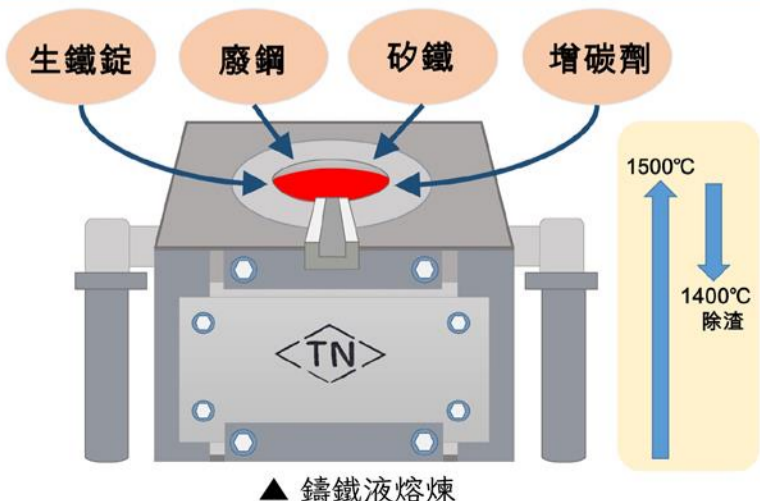
四、石墨的種類：



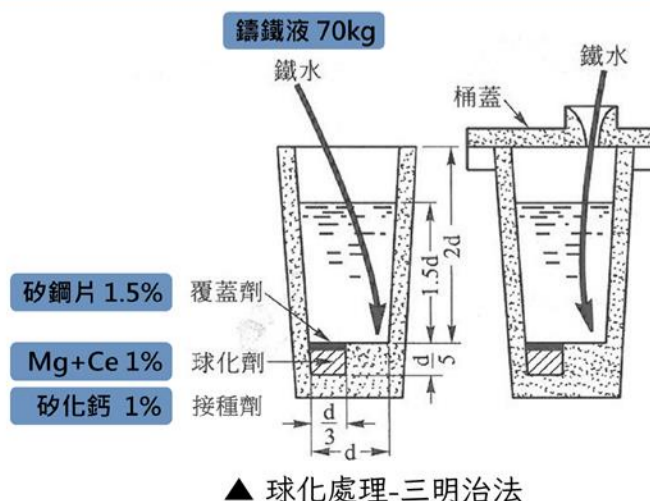
研究流程



鑄鐵熔煉與球化接種



▲ 鑄鐵液熔煉



▲ 球化處理-三明治法

摘要

本實驗以鑄鐵液經球化處理，於不同等待時間下進行澆鑄，探討球化後等待5、10、15分鐘對球墨鑄鐵球化率、石墨分佈及機械性質之影響。從實驗結果得知，球化反應10分鐘內澆鑄試片其球化率、強硬度可達較佳值，球化後伸長率及降伏值都有倍數成長，等待時間超過10分鐘後強硬度隨著球化率有下降趨勢。

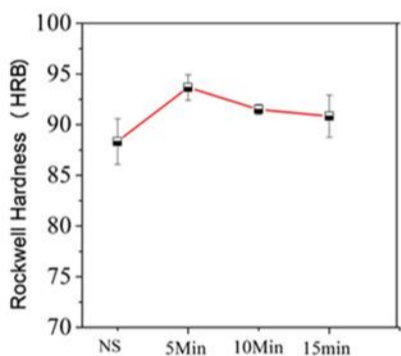
研究目的

本實驗的研究目的如下：

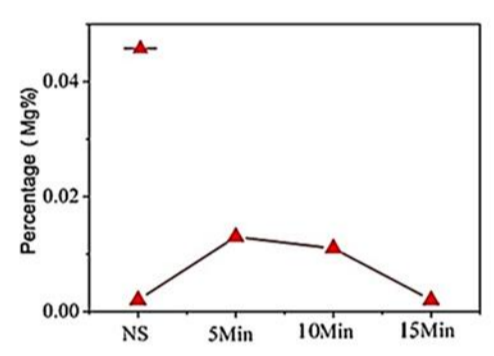
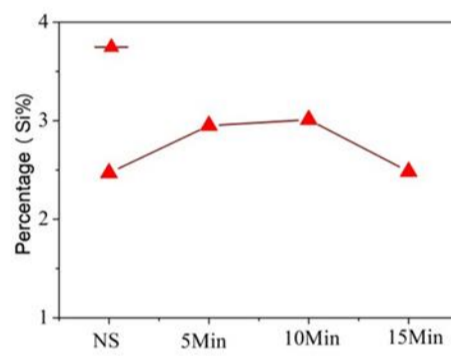
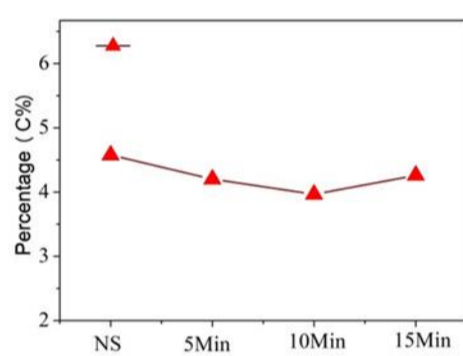
- (一) 瞭解鑄鐵液中石墨的成長過程及特性。
- (二) 探討澆鑄時間對鑄鐵石墨球化組織之影響。
- (三) 探討在不同澆鑄時間下的石墨組織對機械性質之影響。

試驗結果與討論

一、硬度試驗

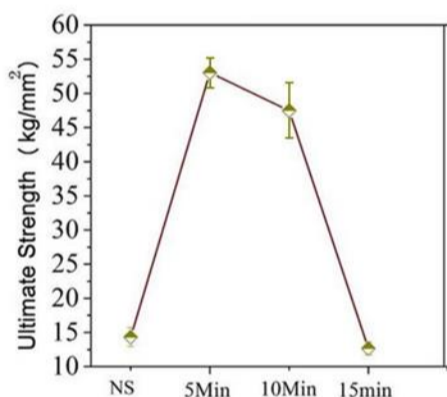


二、光譜分析

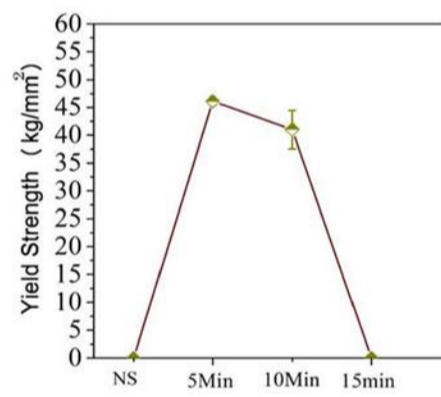


三、拉伸試驗

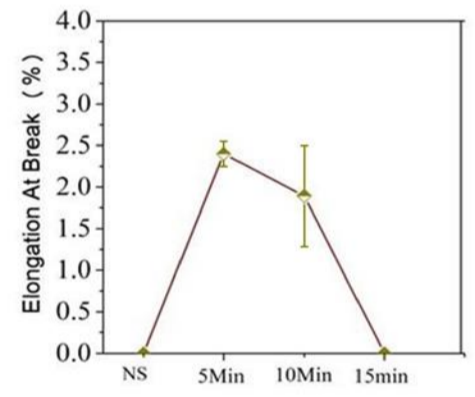
(一) 最大抗拉強度(kg/mm²)



(二) 降伏強度(kg/mm²)

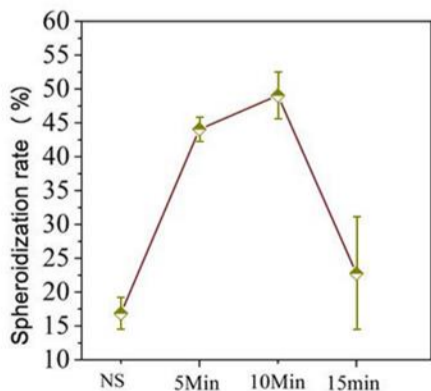


(三) 斷裂伸長率(%)

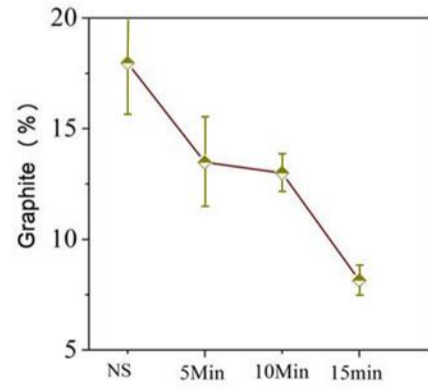


四、金相試驗

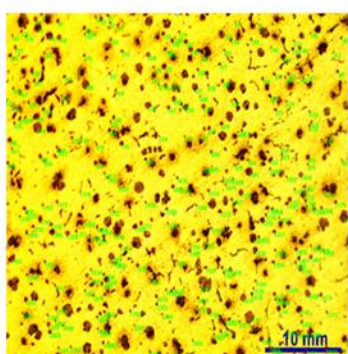
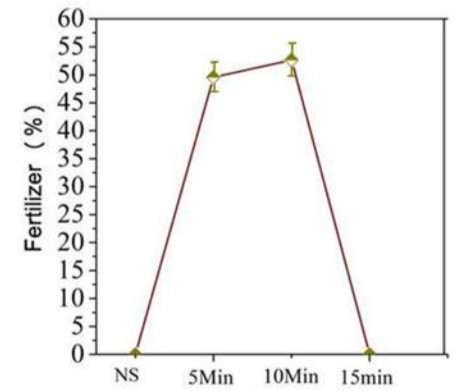
(一) 不同等待時間之球化率



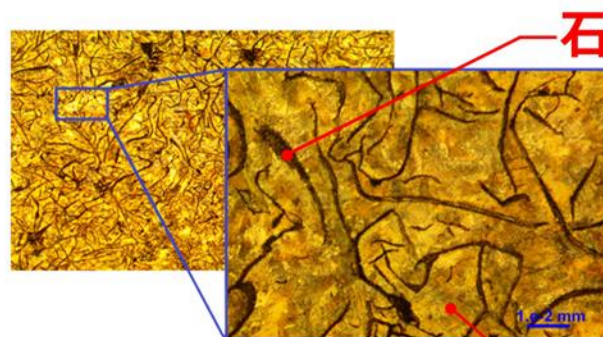
(二) 不同等待時間之石墨面積百分比



(三) 不同等待時間之肥粒鐵含量



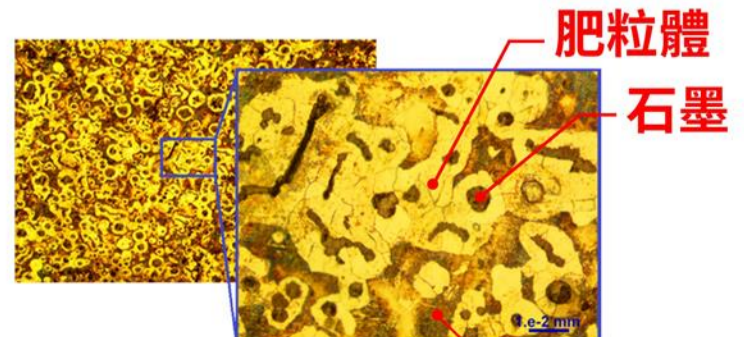
▲ image-Pro Plus 球化率計算



▲ 未球化

石墨

波來體



▲ 球化10分鐘

肥粒體

石墨

波來體

試驗結果統整



成分分析

C% 未球化最高 (4.58%)
Si% 10分鐘最高 (3.0%)
Mg% 5分鐘尚存 (0.013%)
15分鐘達背景值 (0.002%)



金相試驗

球化率 10分鐘最高 (49.0%)
石墨面積% 未球化最高 (18.0%)
肥粒體含量 10分鐘最高 (52.6%)
波來體含量 15分鐘最高 (92.0%)



硬度試驗

測試後數值皆在HRB 85 ~ 95

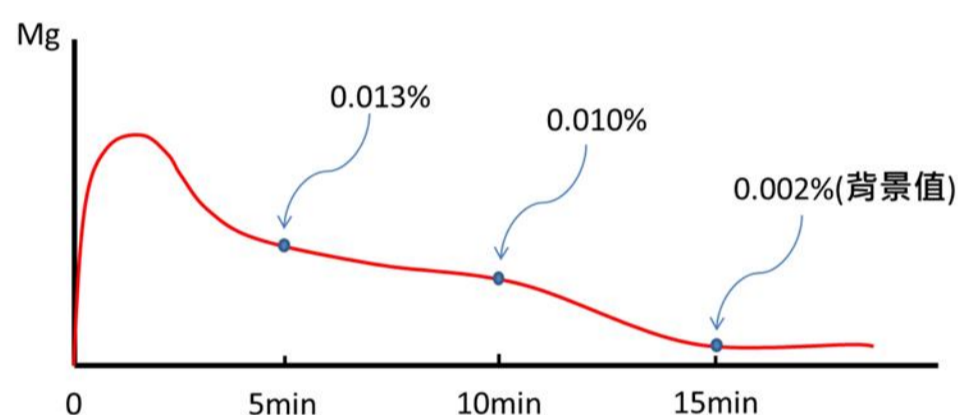


拉伸試驗

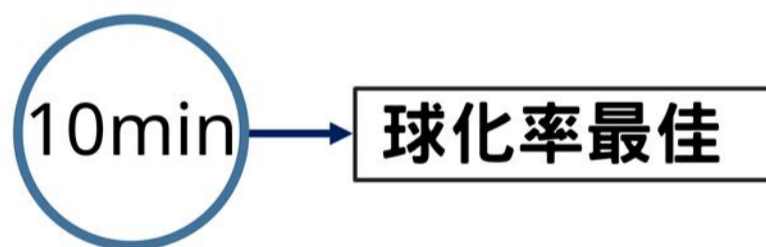
最大抗拉強度 5分鐘最佳 (53.0 kg/mm²)
降伏強度 5分鐘最佳 (46.1 kg/mm²)
斷裂伸長 5分鐘最佳 (2.4%)

結論

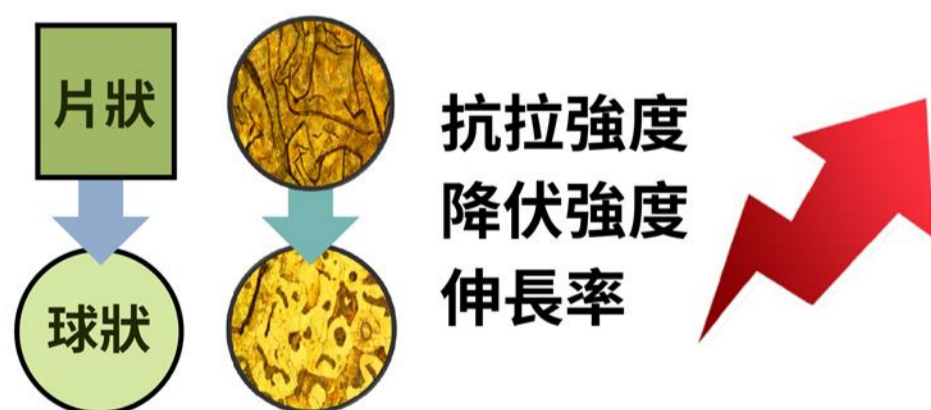
1. 球化處理後5~10分鐘，Mg含量在 0.013 ~ 0.010% 之間，變化不大，15分鐘後含量回到背景值(0.002%)。



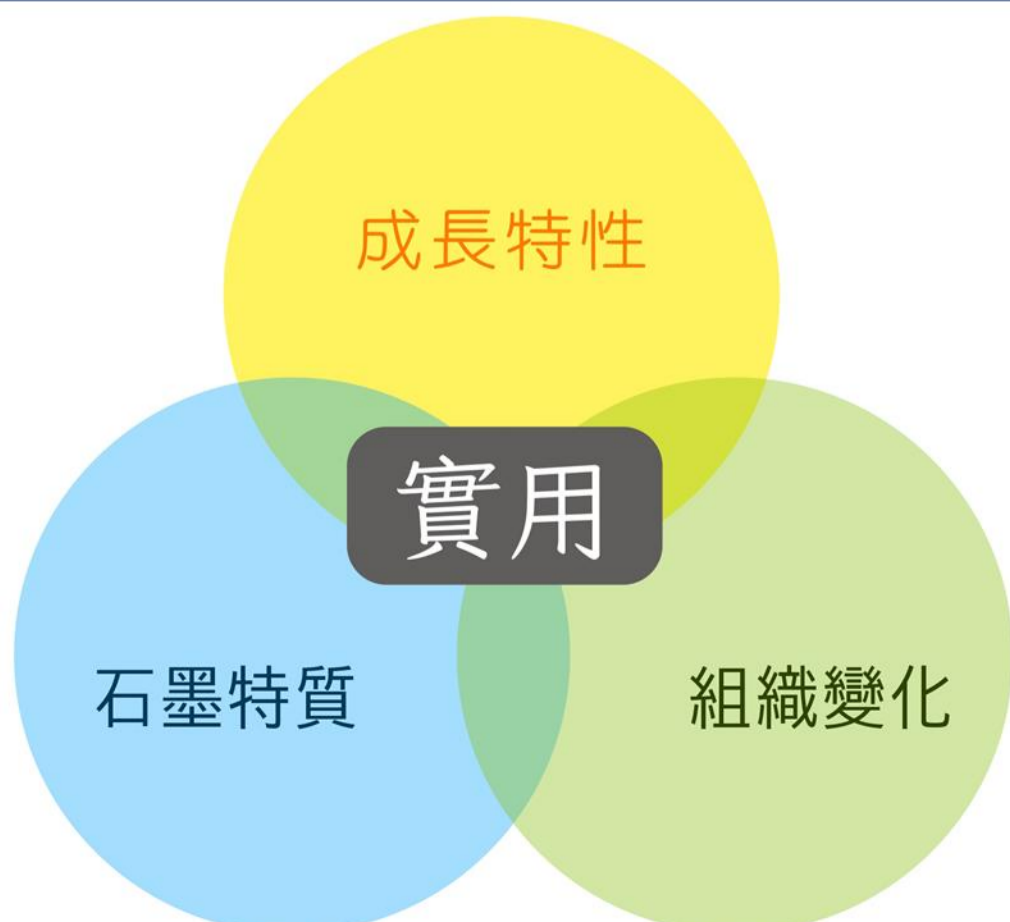
2. 石墨球化率於10分鐘達高峰，15分鐘後組織回復為片狀石墨。



3. 抗拉強度、硬度、伸長率，均於球化後5分鐘時達最高值。



未來發展



耐磨佳
吸震佳
高潤滑

塊狀
組織



吸震佳
高潤滑
耐磨佳

片狀
組織



熱疲勞佳
潤滑佳
耐磨佳

蠕狀
組織



高強度
高塑性
高韌性

球狀
組織