

# FC25 灰鑄鐵應力鬆弛測試

## Stress Relaxation of FC25 Gray Cast Iron

廖冠爵<sup>1</sup> 蘇洋右<sup>1</sup> 邱六合<sup>1</sup> 莊道良<sup>2</sup> 黃建龍<sup>2</sup> 吳政諺<sup>2</sup>

Kuan-Chueh Liao<sup>1</sup> Yang-Yu Su<sup>1</sup> Liu-Ho Chiu<sup>1</sup> Tao-Liang Chuang<sup>2</sup>  
Chien-Lung Huang<sup>2</sup> Cheng-Yen Wu<sup>2</sup>

1 大同大學 材料工程學系 2 金屬工業研究發展中心

### 摘要

FC25 灰鑄鐵為最常用鑄鐵之一，抗拉強度大於 250MPa。鑄造應力包含熱應力、相變化應力及收縮應力。強大應力易導致鑄件變形甚至破裂，可利用弛力方式來尋找快速消應力且強度維持大於 250MPa。本研究將 FC25 灰鑄鐵以 510~620°C 度進行應力鬆弛測試，且對其微觀結構及硬度進行觀察，探討不同溫度下灰鑄鐵之應力變化，尋找快速且強度維持 250MPa 之退火方式，並對微觀結構進行討論。以 570°C 進行退火處理為最快速應力釋放的選擇，退火 10 小時後應力降低 70%，其餘皆僅能降低 30-50%。

關鍵字：應力鬆弛、硬度、灰鑄鐵

### Abstract

FC25 cast iron, the most commonly used cast iron, has the tensile strength greater than 250MPa. Residual stresses of the FC25 casting include thermal stress, phase transformation stress and shrinkage stress. Stress relief annealing is used to eliminate stress quickly and maintain the strength greater than 250MPa. In this study, stress relaxation tests of FC25 cast iron specimen have been conducted at temperature range of 510 ~ 620°C. Microstructure observation and hardness measurement were

performed to study the stress changes of gray cast iron at different temperature and to find the suitable annealing method. From the specimen tested at 570 °C, the stress has effectively released 70% after held for 10 hours. .

Keyword: Gray cast iron, Stress relaxation, Hardness

### 1. 前言

工作母機基座等零組件因鑄鐵之抗震性，所以使用鑄造件，而灰鑄鐵佔鑄鐵使用量之大多數，鑄造時多數以砂模鑄造完成，鑄鐵在澆鑄與冷卻過程中會誘發應力，鑄造應力可分為熱應力、相變應力和收縮應力等，殘留應力容易於鑄件使用時造成變形或破裂。鑄鐵於鑄造冷卻產生之鑄造應力，可利用自然時效做應力消除，然而此方法需要長時間靜置，導致大量庫存壓力，同時缺乏效率。所以鑄造應力需要以退火處理的方式消除。此外，焊接時也常利用退火方式消除應力[1]。

弛力退火之目的在於消除因鍛造、鑄造、機械加工或焊接所產生的殘留應力，弛力退火屬於低溫退火，緩慢加熱至再結晶溫度(約 450°C)以上，A<sub>1</sub> 變態點(約 727°C)以下，通常為 500-650°C，以爐冷方式冷卻。

Webster 利用 AISI 316H 在 550°C 來進行拉伸試

Table 1 試片材料成分(wt%)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
Bal	3.36	2.97	4.93	0.038	0.037	0.087

驗，試片會先產生一變形來緩衝拉伸試驗，造成拉伸試驗結果會有變化[2]。Kocatepe 利用延性鑄鐵經過淬火及回火後產生麻田散體之基地後，發現回火後產生之肥粒體相比比例會影響拉伸強度及破裂形態，較高比例麻田散體則會呈現脆性破裂，其破裂形態不會造成石墨破裂，而沿著石墨外表破裂[3]。

本研究選用最常用鑄鐵之 FC25 為材料進行高溫應力鬆弛(stress relaxation)實驗，再進行微觀組織變化、機械強度及殘留應力變化情形。

## 2. 實驗方法

本研究所用之材料為 FC25 灰鑄鐵，經高溫鑄造後，將材料加工成為中間段厚度為 5mm，寬度為 6mm 之拉伸試片，先將試片進行 510~620°C 之高溫拉伸實驗，獲得 FC25 灰鑄鐵於硬力消除退火溫度時之降伏強度。

避免試片因拉伸產生塑性變形，取高溫拉伸試驗所得之 70%降伏強度為上限，使試片測試於彈性範圍區間下於不同溫度下進行應力釋放實驗，將試片加熱至退火溫度 510 至 620°C，拉伸速率為 1.0 mm/min，到達上限值後停止作動，利用高溫使拉伸產生之應力消除，以電腦記錄試片隨時間變化所受之應力，而應力釋放實驗前後之試片進行微觀結構之觀察及硬度試驗。

## 3. 結果與討論

### 3.1 原材之微觀組織

利用 Table 1 成分之 FC25 灰鑄鐵製做成拉伸試

Table 2 拉伸試驗結果

test temperature	510°C	530°C	550°C	570°C	620°C
tensile stress, MPa	173	151	126	126	82
yield stress, MPa	166	145	117	119	79
elongation, %	7.2	7.5	6.7	7.2	6.7
hardness, HRB	91.5	92	92	92.5	91

片，試片於應力鬆弛實驗前之微觀組織如 Fig.1 所示，其基底組織為樹枝狀肥粒鐵，石墨呈現片狀分布在樹枝狀肥粒鐵之間隙，片狀石墨之長度約為

10  $\mu$ m。

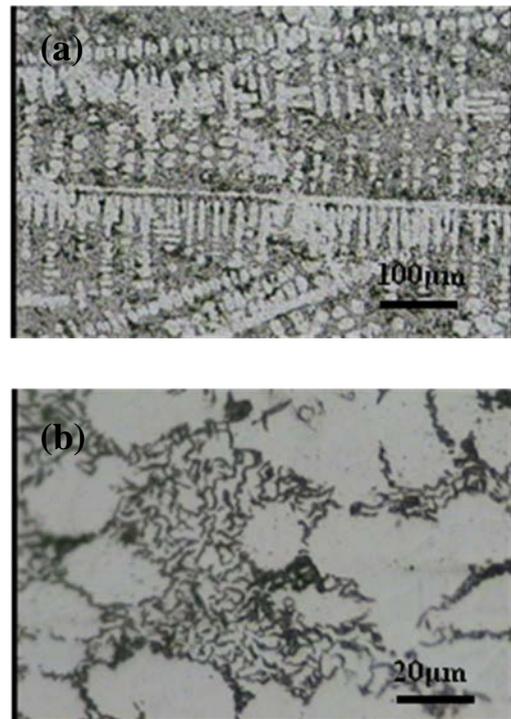


Fig.1 FC25 灰鑄鐵原材之微觀組織

(a) 樹枝狀肥粒鐵-100X、(b) 片狀石墨-500X

石墨型態為 D 型石墨，呈枝狀晶間分佈的點狀和細小片狀，無方向性，也稱過冷石墨。這是亞共晶成分的鐵水在強烈過冷度下形成的，鐵水結晶時，先析出樹枝狀沃斯田體，由於過冷度強烈，分佈於樹枝狀沃斯田體接的鐵水，幾乎在瞬間就生成大量石墨核心，這些石墨核心成長很小，變成為細小而紛之繁多的過冷石墨。

由 X 光繞射分析 FC25 灰鑄鐵之繞射圖形與 JCPDS card 比較可確認試片之基底組織確實為肥

粒鐵，比較應力釋放試驗前後之繞射圖形，可發現除  $\alpha$  (211)平面之繞射峰稍高外，其繞射圖形並無其它組織之繞射峰出現，如 Fig. 2 所示，由此可知

退火過程對 FC25 灰鑄鐵之微觀組織影響不明顯。

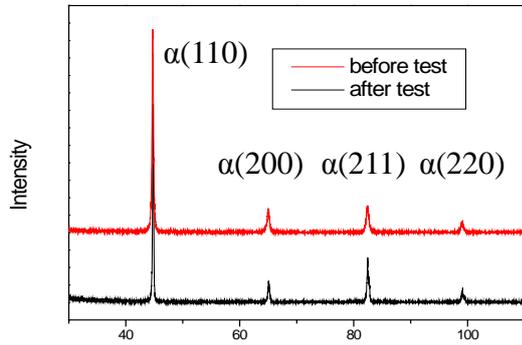


Fig. 2 應力釋放實驗前後之繞射圖形

### 3.2 拉伸試驗

將灰鑄鐵之試片於 510、530、550、570 及 620 °C 下進行拉伸實驗，結果如 Table 2 所示，灰鑄鐵進行 510°C 高溫拉伸之抗拉強度為 173MPa，延伸率為 7.2%，其抗拉強度隨溫度上升有所下降，當高溫拉伸實驗之溫度來到 620°C 時，抗拉強度為 82MPa，其延伸率為 6.7%，比較 510、530、550、570 及 620°C 之強度及延伸率，可發現當拉伸溫度較高時，其強度降低但對延伸率無影響，但試片於 550 與 570°C 時抗拉強度與延伸率值接近沒有差異。

依據 Table 2 所得不同溫度之降伏強度取其 70% 的應力之伸長量，將試片加到高溫並拉伸到此固定伸長量後進行持溫，紀錄應力隨時間釋放變化關係，此目的為利用拉伸試驗機先施加應力，模擬鑄造時收縮產生之應力，然後利用高溫退火來釋放應力。

Fig. 3 為應力釋放試驗結果，發現 510、530、550 及 570°C 於應力釋放試驗開始後一小時之應力皆降低約 40% 左右，但 620°C 之試片所降低之應力只有 21%，於應力釋放試驗開始後十小時後，510、530 及 550°C 之試片所降低之應力約為 50% 左右，570°C 之試片所降低之應力達 80%，而 620°C 之試片所降低之應力僅為 45%，然而 620°C 之試片於實驗開始後約 16 小時其應力可消除 90% 以上，而 510、530、550、570°C 之試片卻依然維持 50% 左右

之應力。

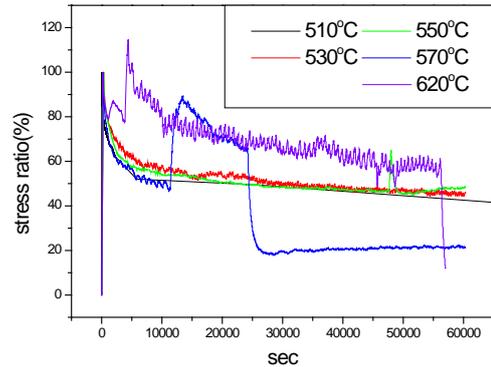


Fig. 3 應力釋放實驗時間與消除比例關係圖

應力鬆弛試驗起始時，溫度高低對應力釋放速度並無明顯影響，然而過一段時間後試片此尺寸會有所收縮，因伸長量被固定，反映在數據中的結果就是應力上升，隨試驗溫度上升，試片收縮的時間越早，510、530、550、570 及 620°C 試片之收縮時間分別為 75、30、13、3 及 1.5 小時左右，而試片的收縮是一個持續的行為，開始收縮後試片所受之應力會受到應力鬆弛與試片收縮之雙重影響，從 550 與 570°C 試片之應力與時間曲線比較中可發現，試驗溫度越高，試片收縮速度越高，甚至超過應力鬆弛之速度，然而收縮到一定程度後試片停止收縮，然後應力鬆弛速度急速上升，如 620°C 試片之應力與時間曲線。

觀察拉伸後之試片可發現試片之破裂形態為脆斷件，並無明顯的頸縮現象，如 Fig. 4 之破裂後之實物照所示。Jeong 表示鑄鐵產生裂縫時會從石墨開始傳遞[4]。Fig. 1 之微觀組織中可發現石墨為片狀，因此發現裂痕會從片狀石墨尖端基底開始產生，開始產生破裂時會直接傳遞至下一條片狀石墨尖端，試片延著石墨斷裂，如 Fig. 6 所示，雖基底之組織為肥粒鐵，受共晶組織的基底影響，拉伸試驗之結果呈現為脆性破壞。

Fig. 5 為斷裂面之金相，無論試驗溫度高低，斷裂面之微觀組織形貌皆相差不大，FC25 灰鑄鐵對於不同溫度下被施加應力時的反應皆為相似，因此應力釋放試驗之時間與消除比例關係圖中之曲

線無論試驗溫度高低皆極為相似。



Fig. 4 鑄鐵經拉伸試驗之破斷面

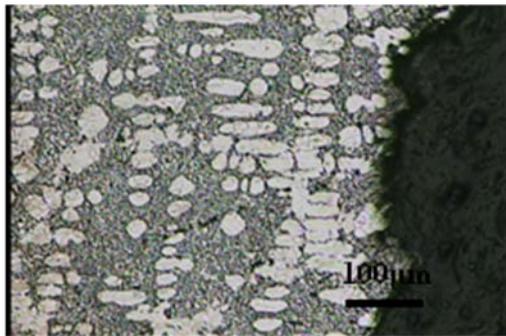


Fig. 5 拉伸試片之斷裂面-100X

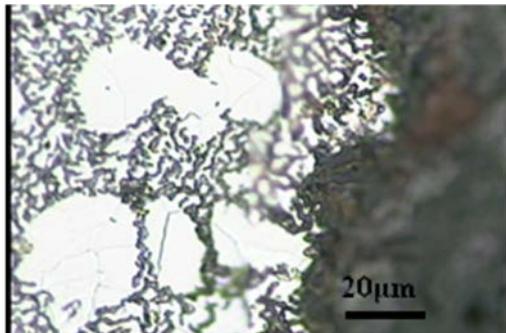


Fig. 6 拉伸試片之斷裂面-500X

### 3.3 應力釋放實驗對硬度變化

將 FC25 灰鑄鐵於 510、530、550、570 及 620 °C 進行應力釋放試驗，再為量測應力釋放實驗後之硬度，與鑄造後硬度之差異。其結果如 Table 2 所示。收料組織灰鑄鐵之硬度為 91HRB，經過應力釋放實驗後，金相組織與硬度皆與收料組織無明顯差異，應力釋放實驗對 FC25 灰鑄鐵之硬度無明顯影響。

## 4. 結論

FC25 灰鑄鐵進行應力鬆弛實驗之結果如下：

1. 其基底組織為樹枝狀肥粒鐵，石墨呈現片狀分布在樹枝狀肥粒鐵之間隙，片狀石墨之長度約為  $10\mu\text{m}$ ，石墨型態為 D 型石墨
2. FC25 灰鑄鐵經 510°C 拉伸之最高抗拉強度為 173MPa，抗拉強度隨測試溫度提高而下降，到 620 °C 為 82MPa，但延伸率隨溫度變化不大，約在 7%。由破斷面結果發現 FC25 灰鑄鐵呈現脆性破斷，雖基底之組織為肥粒鐵，受共晶組織的基地影響，拉伸試驗之結果呈現為脆性破壞。
3. 應力鬆弛試驗起始時，溫度高低對應力釋放速度並無明顯影響，然而過一段時間後試片此尺寸會有所收縮，隨試驗溫度上升，試片收縮的時間越早，510、530、550、570 及 620°C 試片之收縮時間分別為 75、30、13、3 及 1.5 小時左右。
4. 開始收縮後試片所受之應力會受到應力鬆弛與試片收縮之雙重影響，然而收縮到一定程度後試片停止收縮，然後應力鬆弛速度急速上升，如 620 °C 試片之應力與時間曲線。
5. 以 570°C 進行退火處理為最快速應力釋放的選擇，退火 10 小時後應力降低 70%，其餘皆僅能降低 30-50%。

## 參考文獻

1. X Tong, H Zhou, W Jiang, W-W Chen, X-Z Li, L-q Ren, Z-h Zhang. Study on preheating and annealing treatments to biomimetic non-smooth cast iron sample with high thermal fatigue resistance. *Materials Science and Engineering: A* 2009 **513-514**:294-301.
2. G A Webster, C M Davies, K M Nikbin. Assessment of creep crack growth due to stress relief. *International Journal of Solids and Structures* 2010 **47**:881-886.
3. K Kocatepe, M Cerah, M Erdogan. The tensile fracture behaviour of intercritically annealed and quenched+tempered ferritic ductile iron with dual matrix structure. *Materials & Design* 2007 **28**:172-181.
4. B-Y Jeong, J-H Chang, M-H Kim. Thermal fatigue characteristics of plasma duplex treated nodular cast irons. *Surface and Coatings Technology* 2010 **205**:896-901.