

鑄鐵之高溫應力鬆弛行為差異之研究

High temperature stress relaxation behavior of cast irons

吳泰緯¹ 廖冠爵¹ 蘇洋右¹ 邱六合¹ 莊道良² 黃建龍² 吳政諺²

T.W. Wu¹ K.C. Liao¹ Y.Y. Su¹ L.H. Chiu¹ T.L. Chuang² C.L. Huang² C.Y. Wu²

1 大同大學 材料工程學系 2 金屬工業研究發展中心

摘要：

本研究比較幾種鑄鐵高溫應力鬆弛行為的變化，探討鑄鐵種類及石墨型態對高溫應力鬆弛行為的影響。並進行 510~620°C 之高溫拉伸及鬆弛應力釋放試驗。因鑄鐵等級不同，片狀石墨高鎳低膨脹係數鑄鐵之 630°C 抗拉強度為 182MPa 大於片狀石墨 FC300 灰鑄鐵之 570°C 抗拉強度為 85MPa。在同樣石墨型態而不同強度等級下，570°C 的抗拉強度在 D 型石墨 FC300 鑄鐵為 142MPa 高於 D 型石墨 FC250 鑄鐵的 119MPa。因石墨型態不同，570°C 的抗拉強度 D 型石墨 FC300 鑄鐵為 142MPa 高於片狀石墨 FC300 鑄鐵的 85MPa。鬆弛應力釋放結果說明高鎳鑄鐵之片狀石墨鑄鐵較不受到退火溫度改變，但球墨鑄鐵則會。球狀石墨鑄鐵溫度越高時可縮短其應力消除時間，而 FC300 片墨灰鑄鐵做高溫鬆弛應力釋放時，其消除比例也會隨溫度升高而降上升。無論強度等級，D 型石墨型態灰鑄鐵在高溫鬆弛應力測試中，消除比例會有些微隨溫度升高而降低。

關鍵字：灰口鑄鐵、片狀石墨、球狀石墨、高溫拉伸

1. 前言

鑄鐵具有良好的鑄造處理特性可以提供複雜形狀產品的一次成形使用，同時鑄鐵因為具有石墨相的析出，不同型態石墨可以滿足不同應用的需

求。其中需要吸震特性的工作母機基座等零組件，可以活用片狀石墨之灰鑄鐵，所以灰鑄鐵為耐震需求品使用之大宗。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。所以鑄造應力的消除就需要以高溫處理來加速處理時效[1]。

應力消除(弛力)退火即是用於消除因鍛造、鑄造、機械加工或焊接所產生的殘留應力使用。常見弛力退火屬於低溫退火，緩慢加熱高溫 A₁ 變態點(約 727°C)以下，通常為 500-650°C，再以爐冷方式冷卻。Webster 利用 AISI 316H 在 550°C 來進行拉伸試驗，試片會先產生一變形來探討其對材料拉伸特性變化[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，而回火後產生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]。

本文旨在比較幾種鑄鐵高溫應力鬆弛行為的變化，探討鑄鐵種類及石墨型態對高溫應力鬆弛行為的影響，以供應力消除熱處理的參數選擇參考。

2. 實驗步驟

本實驗使用片狀及球狀石墨型態高鎳低膨脹係數鑄鐵、D 型石墨型態 FC250 灰鑄鐵、片狀及 D 型石墨型態之 FC300 灰鑄鐵。將鑄鐵加工為標距

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，獲得高溫拉伸特性，再據以決定於高溫鬆弛應力之決定。

於不同溫度下取得高溫拉伸試驗所得降伏強度，避免試片因拉伸產生塑性變形，取各自溫度之降伏強度 70% 為上限，即確保試片於彈性範圍區間下進行鬆弛試驗(stress relaxation)之應力釋放測試。將試片加熱至退火溫度 510 至 620°C，拉伸速率為 1.0 mm/min，到達各溫度之上限值後停止作動，在該溫度持續以電腦記錄試片所受應力隨時間變化關係。

並對應力釋放實驗前後試片進行微觀結構觀察及硬度試驗。經處理完成的試片以砂輪切割機截取一部分鑲埋作為金相觀察之用，試片依次以碳化矽水砂紙逐步研磨至 1200 號後，再以 1 μ m 氧化鋁粉在 300 rpm 的轉速下進行拋光，以 Nital (95ml 酒精 + 5ml 硝酸) 作為化學腐蝕液，並以 Nikon OPTIHOT-100 光學顯微鏡觀察其金相組織。使用 X' Pert PRO MPD X 光繞射儀配合銅靶 ($\lambda = 0.15418\text{nm}$) 進行處理試片結構分析，繞射角度由 40° 到 120°，掃描速率為每分鐘 1.0 度。並利用 XRD 分析尋找沃斯田體之、肥粒體及石墨繞射峰，並計算各組織含量。

硬度試驗用 Matsuzawa Seiki MARK-M2 型洛氏(Rockwell)硬度試驗機，測試不同石墨型態與退火處理之試片硬度值變化。每一試片均打三點洛氏硬度值(HRB)求其平均值，了解其硬度差異。

3. 結果與討論

3.1 高鎳低膨脹係數鑄鐵 [5]

鑄鐵成分中含有高量的鎳含量，由於鎳是沃斯田體穩定元素，所以此鑄鐵於室溫時為沃斯田體。高鎳鑄鐵內含之石墨型態可經過調控為不同形狀，如 Fig.1 所示，其有片狀及球狀兩種石墨，石墨大小，片狀石墨長度約為 50~250 μ m，球狀石墨大小約為 30-60 μ m。經過 650°C 之 1-5 小時退火後之金相組織皆與收料組織並無明顯變化。

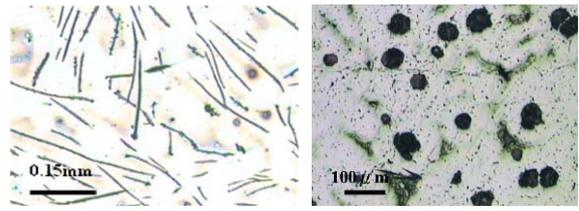


Fig.1 高鎳鑄鐵之微觀組織 (左)片狀石墨、(右)球狀石墨

由高鎳鑄鐵試片之 X 光繞射圖樣分析發現主要為沃斯田體之繞射峰及少量肥粒體繞射峰，未發現明顯石墨繞射峰，判定兩者基地皆為沃斯田體為主，以 XRD 繞射圖樣計算沃斯田體含量，發現片狀石墨鑄鐵沃斯田體含量為 92.2%，球狀石墨鑄鐵含量為 90.1%。

收料組織片狀石墨鑄鐵硬度較低為 61.5HRB，球狀石墨鑄鐵為 83HRB。再進行 650°C 1-5 小時之退火實驗，可得退火 5 小時試片硬度，分別降為 46 及 76HRB，表示片末的硬度下降較為明顯，但球墨的降低則與原鑄造件硬度差異不大。

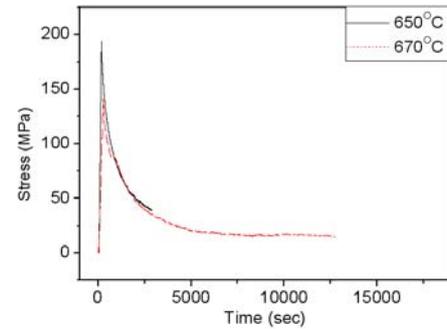
將片狀石墨鑄鐵及球狀石墨鑄鐵進行 630、650 及 670°C 高溫拉伸實驗，其結果如 Table 1 所示，說明片狀及球狀石墨高鎳鑄鐵進行 650°C 高溫拉伸之抗拉強度分別為 179 及 176MPa，兩者強度接近，但延伸率則有明顯差異，片狀石墨延伸率為 18%，球狀石墨延伸率則高達 28%。比較 630、650 及 670°C 之強度及延伸率，可發現當拉伸溫度較高時，其強度降低但延伸率較佳。

Table 1 高鎳鑄鐵在 630°C-670°C 時之拉伸特性

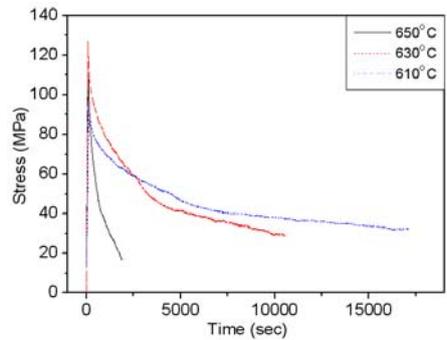
石墨	溫度	降伏強度 (MPa)	延伸率 (%)	抗拉強度 (MPa)
片狀 (Flake)	630°C	140	16	182
	650°C	134	18	179
	670°C	124	23	172
球狀 (nodular)	630°C	139	24	170
	650°C	138	28	176
	670°C	125	30	172

Fig.2 為高鎳鑄鐵鬆弛試驗時應力隨時間變化關係，由 Fig.2 (a) 可發現片狀石墨鑄鐵在 650 及 670°C 的鬆弛試驗時應力均迅速下降，但由 Fig.2 (b)

可發現 650 及 670°C 也可有效縮短應力釋放時間，不過當溫度在 610 及 630°C 應力釋放時間就需要比較長的時間。由 Fig.2 可觀察到，若將高錳鑄鐵工件於 650°C 退火時，可於 1 小時(3600 秒)內消除該鑄鐵之應力。



(a)



(b)

Fig.2 高錳鑄鐵在鬆弛試驗之應力隨時間變化關係

(a)片狀及(b)球狀[5]

觀察破裂後之實物照，片狀石墨鑄鐵呈現脆性破裂而球狀石墨鑄鐵則呈現頸縮現象(necking)之延性破裂，可發現不同石墨狀態會導致試片經拉伸時會呈現不同的破裂形態。

3.2 FC250 灰鑄鐵(D 型石墨型態) [6]

FC250 灰鑄鐵試片於應力鬆弛實驗前之微觀組織如 Fig.3 所示，由圖可以但出明顯的樹枝狀組織，白色區域為肥粒鐵，石灰色區域為共晶組織，其組織與常見灰鑄鐵的片末型態並不相同，共晶區內的片狀石墨之長度約為 10 μ m。此石墨型態為 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。

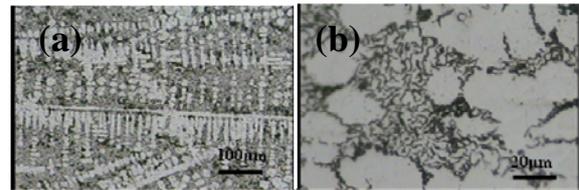


Fig.3 FC25 灰鑄鐵原材之微觀組織 樹枝狀肥粒鐵 -100X、(b) 片狀石墨-500X

由 X 光繞射分析 FC250 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如 Fig.4，可發現除 $\alpha(211)$ 平面之繞射峰稍高外，其繞射圖形無其它組織之繞射峰出現，由此可知退火過程對 FC250 灰鑄鐵之微觀組織影響不明顯。

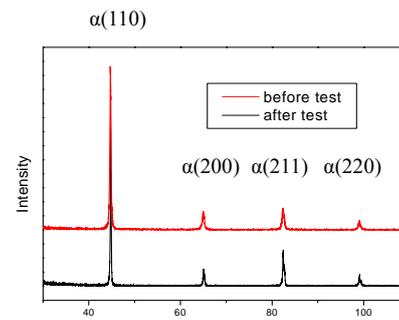


Fig.4 FC250 灰鑄鐵應力釋放實驗前後之繞射圖形

將 FC250 灰鑄鐵進行 510~620°C 高溫拉伸實驗，其結果如 Table 2 所示，FC250 鑄鐵進行 510~620°C 高溫拉伸之抗拉強度分別為 173、151、126、126 及 82MPa，可發現當拉伸溫度較高時，其強度降低。但延伸率則無明顯差異，皆為延伸率為 7%。硬度之變化也不大，都落在 92HRB。應力鬆弛實驗所需使用降伏強度亦如 Table 2，分別落在 166 到 79MPa 之間。

Table 2 FC250 D 型石墨灰鑄鐵高溫拉伸硬度結果 [6]

項目\溫度	510°C	530°C	550°C	570°C	620°C
抗拉強度, MPa	173	151	126	119	82
0.2%降伏強度, MPa	166	145	117	107	79
延伸率, %	7.2	7.5	6.7	7.2	6.7
硬度, HRB	91.5	92	92	92.5	91

Table 3 為 FC250 灰鑄鐵高溫應力釋放試驗結果，發現 510、530、550 及 570°C 於應力釋放試驗開始後 1 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 10 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。

Table 3 FC250 D 型石墨灰鑄鐵高溫應力釋放結果

應力釋放	510°C	530°C	550°C	570°C	620°C
起始應力, MPa	129	103	100	75	53
應力 1hr 後, MPa	75	67	60	43	41
消除比例	41%	35%	40%	42%	21%
應力 10hr 後, MPa	61	50	48	15	35
消除比例	53%	52%	52%	80%	45%

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，反應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。

拉伸試片之破裂形態為脆斷件，並無明顯的頸縮現象。Jeong 表示鑄鐵產生裂縫時會從石墨開始傳遞[4]。近斷裂面之金相，無論試驗溫度高低，斷裂面之微觀組織形貌皆相差不大，Fig. 3 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. 5 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。

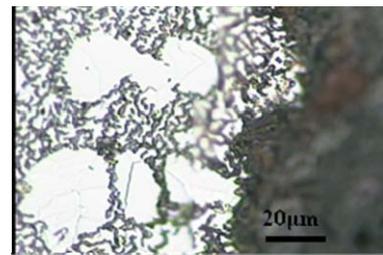


Fig. 5 FC250 D 型石墨灰鑄鐵典型拉伸斷裂面[6]

3.3 FC300 片墨灰鑄鐵

FC300 片墨灰鑄鐵製試片於應力鬆弛實驗前之微觀組織如 Fig. 6(a)所示，其基底組織為肥粒鐵，石墨呈現片狀分布在肥粒鐵基底上，片狀石墨之長度約為 150 μ m。

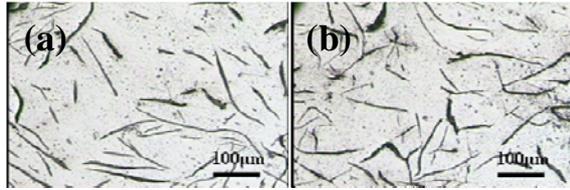


Fig. 6 FC300 片墨灰鑄鐵(a)原材及(b)應力鬆弛實驗後之微觀組織

Fig. 6(b)為FC300片墨灰鑄鐵試片於應力鬆弛實驗後之微觀組織如所示，其基底組織依然為肥粒鐵，石墨呈現片狀分布在肥粒鐵基底上，片狀石墨之長度約 150µm，與原材之微觀組織沒有明顯差異。

Table 4 FC300 片墨灰鑄鐵拉伸特性及硬度

項目及溫度	510°C	530°C	550°C	570°C
抗拉強度, MPa	133	110	78	85
降伏強度, MPa	120	99	70	77
延伸率, %	5.6	5.1	5.6	5.1
硬度, HRB	88	89	87	88

將 FC300 片墨灰鑄鐵試片於 510、530、550、570°C 下進行拉伸實驗，結果如 Table4 所示，灰鑄鐵進行 510°C 高溫拉伸之抗拉強度為 133MPa，延伸率為 5.6%，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 570°C 時，抗拉強度為 85MPa，其延伸率為 5.1%，比較 510、530、550、570°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 570°C 之強度稍大於 550°C 之強度，考慮到差距不大，可以歸咎於鑄造件之間之誤差，也同時表示此溫度區間對於強度影響不大，而溫度對延伸率沒有影響，同時應力鬆弛實驗後之硬度為 88±1HRB，也沒有明顯差異。

取 Table 4 所得不同溫度之降伏強度之 70% 應力為基準，將試片加到高溫持溫後，再拉伸到此固定應力及相應伸長量後，紀錄應力隨時間釋放變化關係。Table 5 為 FC300 片墨灰鑄鐵應力鬆弛試驗結果，發現 510、530 及 550°C 於應力釋放試驗開始後 1 小時之應力皆降低約 40% 左右，而 570°C 之試片所降低之應力稍高為 46%，於應力釋放試驗開始後 10 小時後，510、530 及 550°C 之試片所降低

之應力接近 60%，而 570°C 之試片所降低之應力達 76%，應力釋放試驗來到 20 小時之後，510、530 及 550°C 之試片所降低之應力依序為 61%、64%、及 68%，隨溫度越高，消除比例也越高，已經可以明顯觀察到溫度對應力釋放的影响，而 570°C 之試片於 20 小時已消除 90% 應力。

Table 5 FC300 片墨灰鑄鐵應力鬆弛試驗結果

項目/溫度	510°C	530°C	550°C	570°C
起始應力	73MPa	86MPa	59MPa	62MPa
1hr 後應力	42MPa	55MPa	37MPa	34MPa
消除比例	42%	36%	38%	46%
10hr 後應力	31MPa	35MPa	25MPa	15MPa
消除比例	57%	59%	58%	76%
20hr 後應力	28MPa	31MPa	19MPa	6.2MPa
消除比例	61%	64%	68%	90%

Fig.7 為應力百分比與時間關係圖所示，應力消除之總體趨勢為溫度越高，應力消除速度越快，570°C 之試片於 19.3 小時消除 90% 之應力，而 510°C 之試片於 20 小時依然留有 39% 應力未消除。

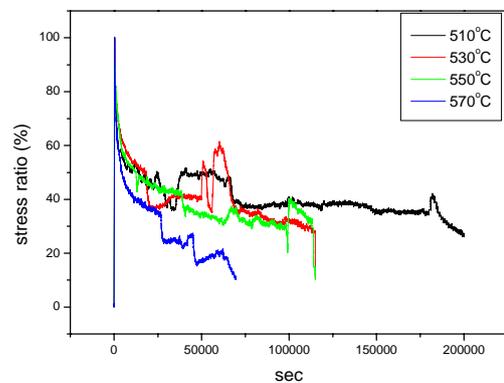


Fig. 7 FC300 片墨灰鑄鐵試片應力鬆弛試驗消除比例與時間關係圖

3.4 FC300 灰鑄鐵(D 型石墨型態)

FC300 D 型石墨灰鑄鐵試片於應力鬆弛實驗前之微觀組織如 Fig. 8 所示，其基底組織依然為肥粒鐵，D 型石墨呈現片狀分布在肥粒鐵基底上，但片狀石墨之長度只有 8µm 左右大小，與 FC300 片墨灰鑄鐵不同。

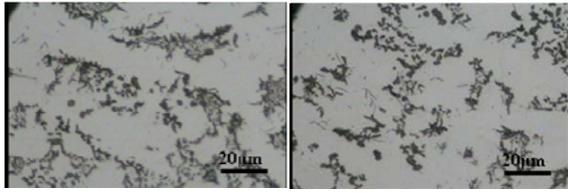


Fig.8 FC300 D 型石墨灰鑄鐵(a)原材及(b)應力鬆弛實驗後之微觀組織

FC300 D 型石墨灰鑄鐵試片於 510、530、550、570°C 下進行拉伸實驗，結果如 Table 6 所示，FC300 D 型石墨灰鑄鐵進行 510°C 高溫拉伸之抗拉強度為 240MPa，延伸率為 10.3%，其抗拉強度隨溫度上升有所下降，延伸率也同時下降，當高溫拉伸實驗之溫度來到 570°C 時，抗拉強度為 142MPa，其延伸率為 5.7%，比較 510、530、550、570°C 之強度及延伸率，可發現當拉伸溫度較高時，其強度降低，而溫度越高，延伸率也下降，與前一批 FC300 灰鑄鐵不同，不過硬度與前一批試片相近。因石墨型態不同，570°C 的抗拉強度 D 型石墨 FC300 鑄鐵為 142MPa 高於片狀石墨 FC300 鑄鐵的 85MPa。在同樣石墨型態而不同強度等級下，570°C 的抗拉強度 D 型石墨 FC300 鑄鐵為 142MPa 高於 D 型石墨 FC250 鑄鐵的 119MPa。

Table 6 FC300 D 型石墨灰鑄鐵拉伸特性及硬度

項目及溫度	510°C	530°C	550°C	570°C
抗拉強度, MPa	240	203	148	142
降伏強度, MPa	232	188	148	141
延伸率, %	10.3	8.6	6.4	5.7
硬度, HRB	88	86	88	88

依據 Table 6 所得不同溫度之降伏強度取其 70% 的應力之伸長量，將試片加到高溫進行持溫並拉伸到此固定伸長量後，紀錄應力隨時間釋放變化。

Table 7 FC300 D 型石墨灰鑄鐵應力鬆弛試驗結果

項目/溫度	510 度	530 度	550 度	570 度
起始應力	178MPa	105MPa	93MPa	86MPa
應力 1h 後	84MPa	61MPa	50MPa	55MPa
消除比例	52%	42%	46%	37%

10h 後應力	46MPa	43MPa	37MPa	36MPa
消除比例	74%	59%	60%	58%
20h 後應力	49 MPa	34 MPa	34MPa	30MPa
消除比例	72%	68%	63%	66%

Table7 為 FC300 D 型石墨灰鑄鐵試片應力釋放試驗結果，發現 510、530、550 及 570°C 於應力釋放試驗開始後 1 小時之應力釋放趨勢大致為溫度越高，速度越慢，510°C 試片下降 52% 之應力，而 570°C 試片僅下降 37% 之應力，與前一批之試片試驗結果相左，於應力釋放試驗開始後 10 小時後，530、550 及 570°C 測試試片所降低之應力接近 60%，而 510°C 之試片所降低之應力達 74%，應力釋放試驗來到 20 小時之後，530、550 及 570°C 之試片所降低之應力依序為 63%、68%、66%，相差不大。

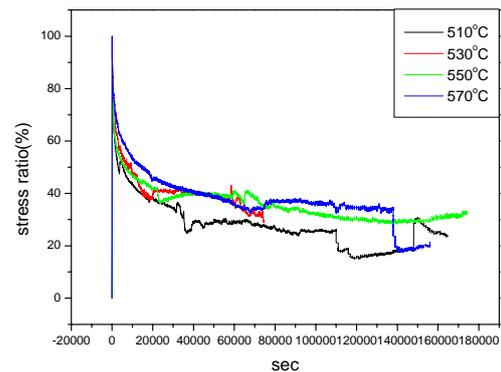


Fig. 9 FC300 D 型石墨灰鑄鐵試片應力鬆弛試驗之消除應力比例與時間關係圖

Fig. 9 為 FC300 D 型石墨灰鑄鐵試片應力鬆弛試驗之消除應力百分比與時間關係圖所示，應力消除開始時，應力消除比例與溫度關係不大，到 20 小時附近時，除 510°C 之試片應力消除比例依然低於其他試片，530、550 及 570°C 之試片於 12.5 小時附近，數據有一個交會點，但交會點前後應力消除比例與溫度看不出明顯關係。

4. 結 論

1. 因鑄鐵等級不同，片狀石墨高鎳低膨脹係數鑄鐵之高溫 630°C 抗拉強度為 182MPa 大於片狀石墨 FC300 灰鑄鐵之 570°C 高溫抗拉強度 85MPa。在同樣石墨型態而不同強度等級下，570°C 的抗拉強度 D 型石墨 FC300 鑄鐵為 142MPa 高於 D 型石墨 FC250 鑄鐵的 119MPa。因石墨型態不同，在 570°C 下 D 型石墨 FC300 鑄鐵的抗拉強度為 142MPa 高於片狀石墨 FC300 鑄鐵的 85MPa。
2. 鬆弛應力釋放結果說明高鎳鑄鐵之片狀石墨鑄鐵較不受到退火溫度改變，但球墨鑄鐵則會。球狀石墨高鎳鑄鐵之鬆弛溫度越高時可縮短其應力消除時間。而 FC300 片墨灰鑄鐵在 510 及 570°C 做鬆弛應力釋放時，10 小時消除比例為 57% 及 76%，其消除比例也會隨溫度升高而降上升。
3. 但由 FC250 和 FC300 的 D 型石墨型態灰鑄鐵在 510 及 570°C 高溫鬆弛應力測試中，10 小時消除比例為 53% 和 45% 和 74% 及 58%，說明無論強度等級，消除比例皆有隨溫度升高而降低。此趨勢表現出石墨形態對鬆弛應力釋放有一定的影響。

誌 謝

感謝金屬工業研究發展中心試片提供及經費支助。

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.
5. 廖冠爵, 蘇洋右, 邱六合, 莊道良, 黃建龍, 吳政諺, "不同石墨型態對高鎳鑄鐵之應力鬆弛影響," 台灣金屬熱處理學會 2012 年年會論文研討會, 論文集光碟, Dec. 2012
6. 廖冠爵, 蘇洋右, 邱六合, 莊道良, 黃建龍, 吳政諺, "FC25 灰鑄鐵應力鬆弛測試," 台灣金屬熱處理學會 2013 年年會論文研討會, 論文集光碟, 2013