

# 鎳元素對沃斯回火球墨鑄鐵微結構及機械性質之影響

## Effects of nickel element on microstructure and mechanical properties of ADI

許正勳\* 呂佳鴻\*\* 韓濟帆\*\*

Cheng-Hsun Hsu\* Jia-Hong Lu\*\* Chi-Fan Han\*\*

\*大同大學 材料工程研究所教授

\*\*大同大學 材料工程研究所研究生

\* Professor, Department of Materials Engineering, Tatung University

\*\*Graduate student, Department of Materials Engineering Tatung University

### 摘要

本研究乃針對非合金和含鎳元素(4wt%)兩種球墨鑄鐵素材進行 ADI 熱處理，即先施以沃斯田體化處理(910°C-1.5hrs)後，淬火至不同回火溫度(分別為 300°C、360°C)並持溫 2 小時後再空冷之；藉由微結構觀察、殘留沃斯田體含量、硬度、拉伸及衝擊韌性等試驗來瞭解 Ni 元素對 ADI 微結構及機械性質之影響。由實驗結果得知 Ni 的添加可使 ADI：(1)有較多的殘留沃斯田體含量；(2)降低沃斯回火溫度對殘留沃斯田體含量之影響；(3)經 300°C-2hrs 處理可提高抗拉強度至 1377MPa，但對衝擊韌性與伸長率影響不大。

**關鍵詞：**球墨鑄鐵、沃斯回火熱處理、鎳元素、微結構、機械性質

### Abstract

In this study, both the materials consisting of unalloyed DI and 4wt% Ni-alloyed DI were performed austempered treatment. They were austenitized at 900°C for 1.5 hrs before quenched in a salt bath of 300°C and 360°C for 2 hrs, respectively, and finally air-cooled to room temperature. And then, microstructure observation, retained austenite measurement, hardness, tensile and impact tests were all carried out for understanding the effect of nickel addition on microstructure and mechanical properties of ADI. The results are showed as the follows: (1) Ni-alloyed ADI has the more retained austenite content than unalloyed DI; (2) 4% nickel addition can reduce the effect of austempering temperature on retained austenite content of ADI; (3) Ni-alloyed ADI austempered 300°C for 2 hrs has the highest tensile strength about 1377 MPa, while its elongation and impact toughness are nearly not changed as compared to unalloyed DI.

**Keywords:** Ductile iron, Austempering treatment, Nickel, Microstructure, Mechanical property

## 1. 前言

ADI 是將球墨鑄鐵(Ductile iron, DI)施以沃斯回火(Austempering)熱處理後所得到之新興材料，沃斯回火為應用在鐵基金屬的一種恆溫熱處理製程，主要是可提高材料的強度與韌性<sup>(1)</sup>。一般沃斯回火處理是將鐵基金屬先進行沃斯田鐵化，再快速淬火(避開 Pearlite nose)至  $M_s \sim 450^\circ\text{C}$  之間，接著使材料在此溫度範圍內保持恆溫，若材料為石墨鑄鐵，則基組織就會變態為沃斯肥粒鐵(Ausferrite)之特有組織<sup>(2-4)</sup>，若材料為鋼料則會形成變韌鐵(Bainite)的組織<sup>(5)</sup>。ADI 之熱處理製程主要為下列四個步驟：<sup>(2-4,6)</sup>

- (1) 沃斯田鐵化熱處理：將球墨鑄鐵先加熱至沃斯田鐵化溫度約  $850\sim 950^\circ\text{C}$  之範圍內，然後持溫適當的時間(1~2hr)，使得基組織能完全變態為均質之沃斯田鐵相。
- (2) 淬火至沃斯回火溫度：當沃斯田鐵化反應完成之後，立即將試片淬火至沃斯回火溫度範圍內，過程中不允許有波來鐵生成。
- (3) 沃斯回火恆溫熱處理：常被使用之沃斯回火溫度範圍介於  $260\sim 385^\circ\text{C}$  之間，當鑄鐵在此溫度持溫一段時間以後，基組織會由單相沃斯田鐵轉變成以針狀肥粒鐵(Acicular ferrite)與富碳殘留沃斯田鐵(High carbon retained austenite)為主之雙相組成，稱之「沃斯肥粒鐵」(Ausferrite)。此步驟所獲得之基組織受到沃斯回火溫度與時間之影響甚深。
- (4) 冷卻至室溫：將已經完成沃斯回火處理之鑄件進行空冷、風冷或水淬等方式冷卻，皆不再改變其微結構。

如眾所周知，ADI 之微結構及機械性質不但受熱處理製程的影響，而且合金元素的添加亦扮演重要之影響因素。添加合金元素的主要目的在於增加硬化能，以提高熱處理的能力。一般合金的添加以矽、錳、鉬及鎳為主，矽會促進石墨化及抑制碳化物的生成；錳會增加硬化能及使 TTT 曲線向右移，但其偏析嚴重；鉬的功能與錳相似，亦在提高硬化能，但鉬易在晶胞間產生偏析及生成碳化物；鎳的添加不僅能改善硬化能，而且偏析程度較小及較不易析出碳化物、麻田散鐵等，使得 ADI 具有好的強度及韌性<sup>(7)</sup>。因此本研究針對非合金及含鎳(Ni)元素之兩種 DI 進行不同沃斯回火條件熱處理，並

藉由金相觀察、殘留沃斯田鐵含量測定以及各種機械性質試驗，來瞭解 Ni 元素對 ADI 微結構和機械性質之影響。

## 2. 實驗方法與步驟

### 2.1 材料來源及熱處理

本實驗所使用之素材來源乃委託民間鑄造廠協助製作之非合金及添加 4.0wt%Ni 兩種球墨鑄鐵(試片編號分別為 A、B)，即利用三明治澆鑄法，澆鑄成 Y-block 鑄件(如第 1 圖所示)，再擷取 Y-block 鑄件下端長方塊位置，然後依規範切取所需之各種試片(如第 2 圖所示)<sup>(8-9)</sup>。此兩種素材之化學組成經 GDOS 分析後列於第 1 表。

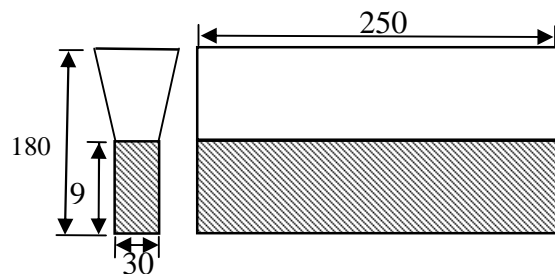


Fig.1. Dimension of the Y-block castings in this experiment.  
(unit: mm).

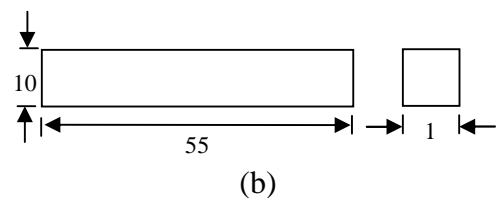
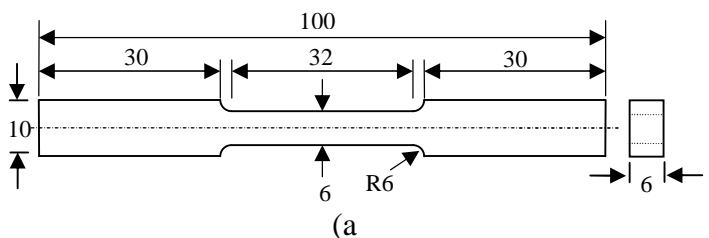


Fig.2. Dimensions of mechanical testing specimens: (a) tensile test and (b) impact test (unit: mm)

試片製備完成後，依上述 ADI 製程步驟進行沃斯回火熱處理。本實驗所設計之熱處理條件僅以變化沃斯回火溫度為主，即將所有試片先施於沃斯田鐵化  $910^\circ\text{C}$ -1.5hrs 後，緊接著各別淬火於  $300^\circ\text{C}$  及  $360^\circ\text{C}$  之溫

Table 1 Chemical composition of the experimental irons.

Material	C	Si	Mn	P	S	Mg	Ni	Fe
A	3.56	2.83	0.22	0.039	0.008	0.042	---	Bal.
B	3.57	2.63	0.24	0.037	0.008	0.042	4.0	Bal.

度皆持溫 2hrs，再取出試片空冷至室溫。熱處理流程如第 3 圖所示。

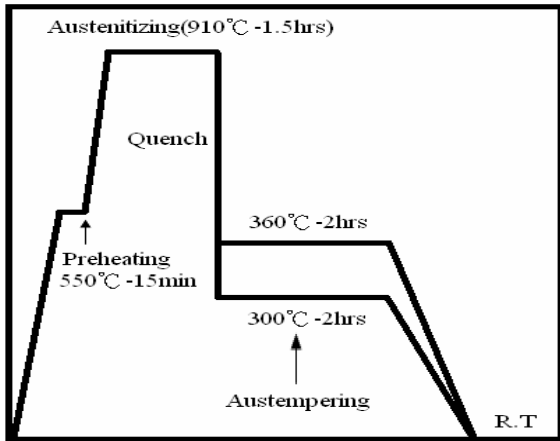


Fig.3 Schematic diagram of the heat treatments.

## 2.2 金相試驗及殘留沃斯田鐵測量

經熱處理之試片依序以 240#、400#、600#、800# 和 1000#之砂紙研磨，再使用 0.5 $\mu$ m 氧化鋁粉於拋光機進行拋光，接著以 3.5wt% Nital 腐蝕液進行腐蝕，然後利用光學顯微鏡(OM)觀察金相組織。同時再以 Optimas 6.2 影像分析系統對微結構中之石墨型態及各種組成要素進行定量分析，並利用 EPMA 分析 Ni 在球墨鑄鐵組成內分佈情形。另外，將所有熱處理之試片進行 X 光繞射(XRD)分析，以便測量殘留沃斯田鐵含量及其碳含量。使用之儀器為 X 光繞射儀 (Regaku DMAX / IIIA)，測量條件之設定分別：X 光源是銅靶 CuK $\alpha$ 、工作電壓為 40kV、工作電流為 15mA、繞射角度(2 $\theta$ )為 30~90°以及掃描速率為 0.02°/s。再利用所測得之繞射圖形峰值之關係，分別計算殘留沃斯田鐵之體積分率 (Vol.%) 以及其碳含量 (%)<sup>(10-11)</sup>。

## 2-3 機械試驗及破斷面觀察

將金相觀察後之試片分別進行硬度試驗，使用 Brinell 硬度試驗機，鋼球直徑 10mm、荷重 3000kg 於試片表面進行壓痕，測量壓痕平均直徑，代入硬度公式<sup>(12)</sup>： $HB = 2P/\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})$ 。其中 P 為荷重，D 為壓痕器直徑，d 為凹痕直徑，計算各種試片的硬度值，且

每一試片進行 5 次試驗再求其平均值。

另外，將鑄態與各種沃斯回火處理之試片於室溫下進行拉伸試驗，所使用的設備為 10 噸 MTS 動態萬能試驗機，並在拉伸速率為 0.6mm/min 的條件下進行測試。試驗前先將試片平行部份 (Gage length) 標上 25mm 的標距長度(L<sub>0</sub>)，於拉斷後量取伸長量 ( $\Delta L$ )，可一併求取抗拉強度及伸長率，每一條件進行三次試驗，然後求其平均值。衝擊試驗的設備則為 Charpy 衝擊試驗機，於室溫下進行 Un-notch 試片之 Charpy 衝擊測試，可直接獲得衝擊值(Joule)，每一試驗進行 3 次求其平均值。並且將 ADI 衝擊試驗後的試片，利用 SEM 進行破斷面的觀察，以瞭解各試片之破壞型態。

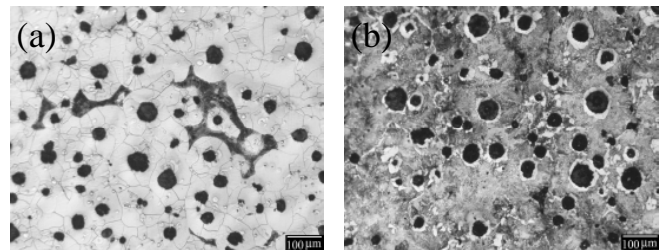


Fig.4 Microstructure of the as-cast (a) material A and (b) material B

## 3 結果與討論

### 3.1 微結構觀察

第 4 圖所示為本實驗兩種球墨鑄鐵之微結構，且其石墨型態(球化率、石墨數)及各種組成要素之定量分析亦分別列於第 2 表。此外，由第 5 圖之 EPMA 照片亦可看見 4wt%Ni 均勻地固溶於 DI 之基地組織中。在石墨形態方面之比較(如第 6 圖)，顯示出材料 A、B 之球化率都可達 80% 以上，且材料 A 及材料 B 之石墨數相近約為 100 nodules/mm<sup>2</sup>；在基地組成方面(如第 7 圖)，材料 A 之基地組織為波來鐵及肥粒鐵之混合型態，添加 Ni 的 B 材料則幾乎是以波來鐵為主的基地組織，因此明顯可知，4.0wt% Ni 元素具有促使基地組織波來鐵化的效應。第 8 圖及第 9 圖所示分別為材料 A、B 經過不同沃斯回火溫度處理所獲得之 ADI 微結構，圖中黑色的部分為針狀肥粒鐵，白色的部分為殘留沃斯田鐵，整體而言，不論是材料 A 或 B 經 360°C 沃斯回火所得

到的沃斯肥粒組織較為稀疏，而在 300°C 沃斯回火的組織則較為緻密。

Table 2 Constituent amounts in the microstructure of the ductile irons.

Material	Nodularity (%)	Nodule count (No./mm <sup>2</sup> )	Ferrite (%)	Pearlite (%)	Graphite (%)
A	90	100	60	24	16
B	82	96	15	73	12

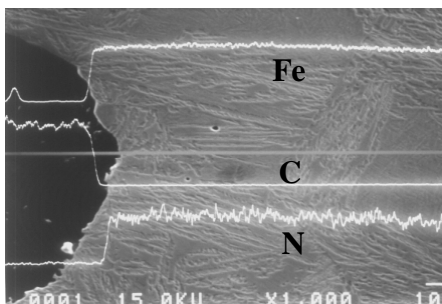


Fig.5 EPMA line-scan pattern of the irons with Ni addition.

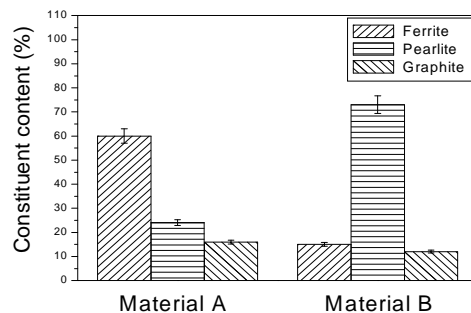


Fig.7 Comparison of constituent content in the microstructure of the materials.

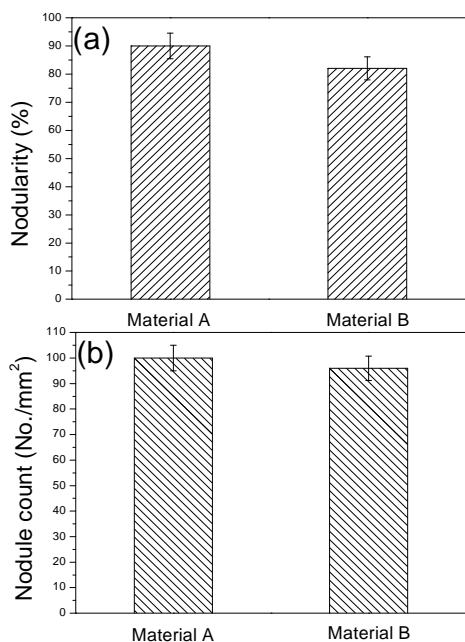


Fig.6 Comparison of nodular graphite of the irons: (a) nodularity and (b) nodule count.

### 3.2 殘留沃斯田鐵分析

利用 XRD 圖形所計算出殘留沃斯田鐵體積分率及其碳含量之結果列於第 3 表，從第 10 圖(a)之比較可以看出，沃斯回火溫度較高時，其殘留沃斯田鐵含量也較多，此乃因在較高沃斯回火溫度時，由於過冷度較

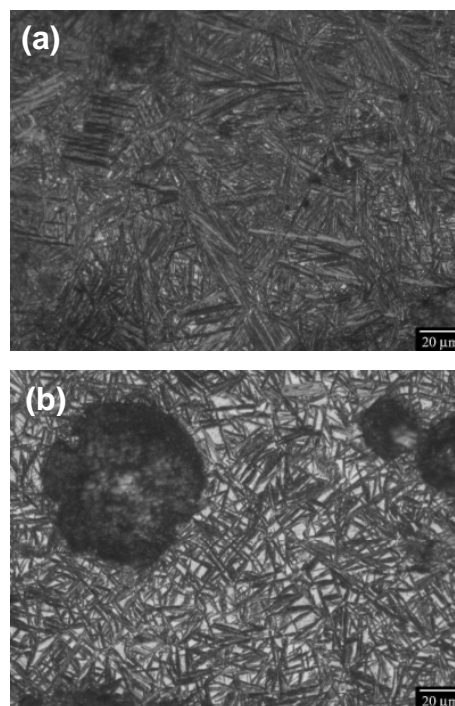


Fig.8 Microstructure of ADI treated at 300°C-2hrs: (a) material A and (b) material B.

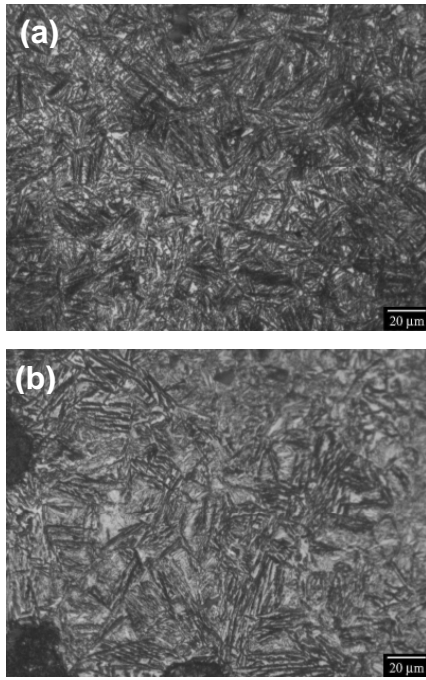


Fig.9 Microstructure of ADI treated at 360°C -2hrs: (a) material A and (b) material B.

小，肥粒鐵的成核速率慢、但成長速率快，因此形成的肥粒鐵較為鬆散、粗大，造成富碳殘留沃斯田鐵含量較高。另值得注意的是非合金 ADI 經 300 及 360°C 處理後之殘留沃斯田鐵含量為 15.3~27.5vol.%，而 4%Ni-ADI 之殘留沃斯田鐵含量為 22.0~25.4vol.%，換言之，當添加 4wt%Ni(材料 B)時，似乎有縮短沃斯回火溫度對殘留沃斯田鐵含量的差異。從第 10 圖(b)之比較，可以看出殘留沃斯田鐵含碳量之變化趨勢恰好與殘留沃斯田鐵含量的趨勢相反。材料經完全沃斯田鐵化之後，基地組織除了球墨外，其餘的碳皆固溶於沃斯田鐵中，當在 ADI 變態階段，由於針狀肥粒鐵的產生，該處之碳原子便擴散至殘留沃斯田鐵中，形成穩定的富碳殘留沃斯田鐵相。原則上，沃斯回火溫度愈高，其碳擴散速率愈快，因此可形成較多的殘留沃斯田鐵，但也相對地造成其碳含量較少，此結果可以從材料 B 得到印證，因添加 Ni 元素造成殘留沃斯田鐵含量平均較多，故其碳含量反而減少。

Table 3 Retained austenite and mechanical properties of the resulting irons in this experiment.

Material	Austempering condition	Retained austenite $\gamma_R$ (Vol.%)	Carbon in $\gamma_R$ (%)	Brinell hardness (HB)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Impact toughness (J)
A	As-cast	----	---	161	499	18.2	73
	300°C -2hrs	15.3	1.98	345	1193	2.3	57
	360°C -2hrs	27.5	1.95	328	1113	5.6	91
B	As-cast	---	---	232	1027	3.4	13
	300°C -2hrs	22.0	1.76	328	1377	3.8	53
	360°C -2hrs	25.4	1.69	299	1011	4.9	89

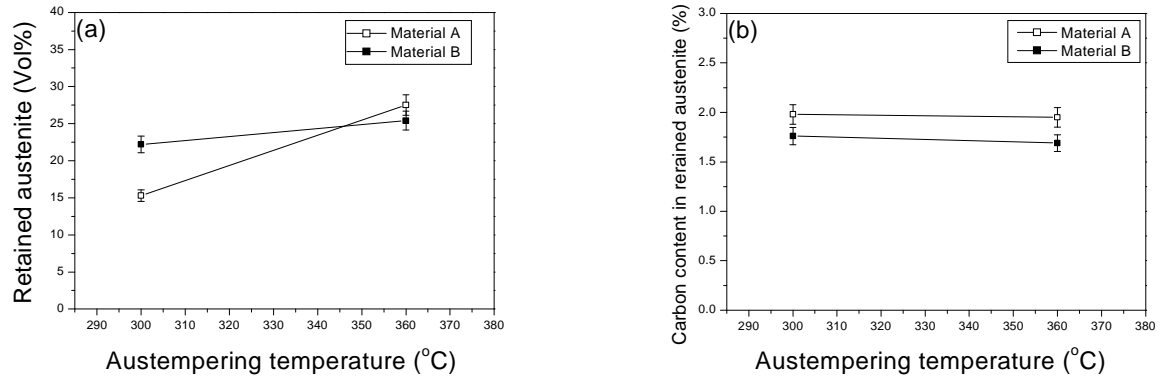


Fig.10 Effect of austempering temperature on the ADI's (a) retained austenite content and (b) carbon content in retained austenite.

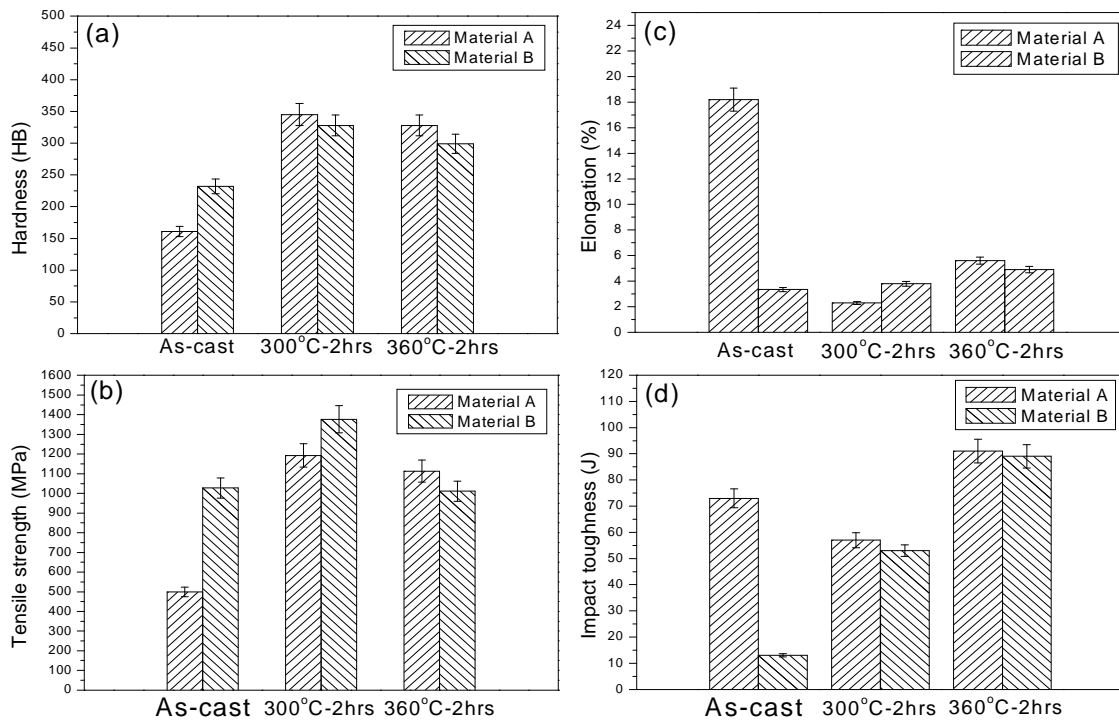


Fig.11 Comparison of the mechanical properties among the resulting materials: (a) hardness, (b) tensile strength, (c) elongation and (d) impact toughness.

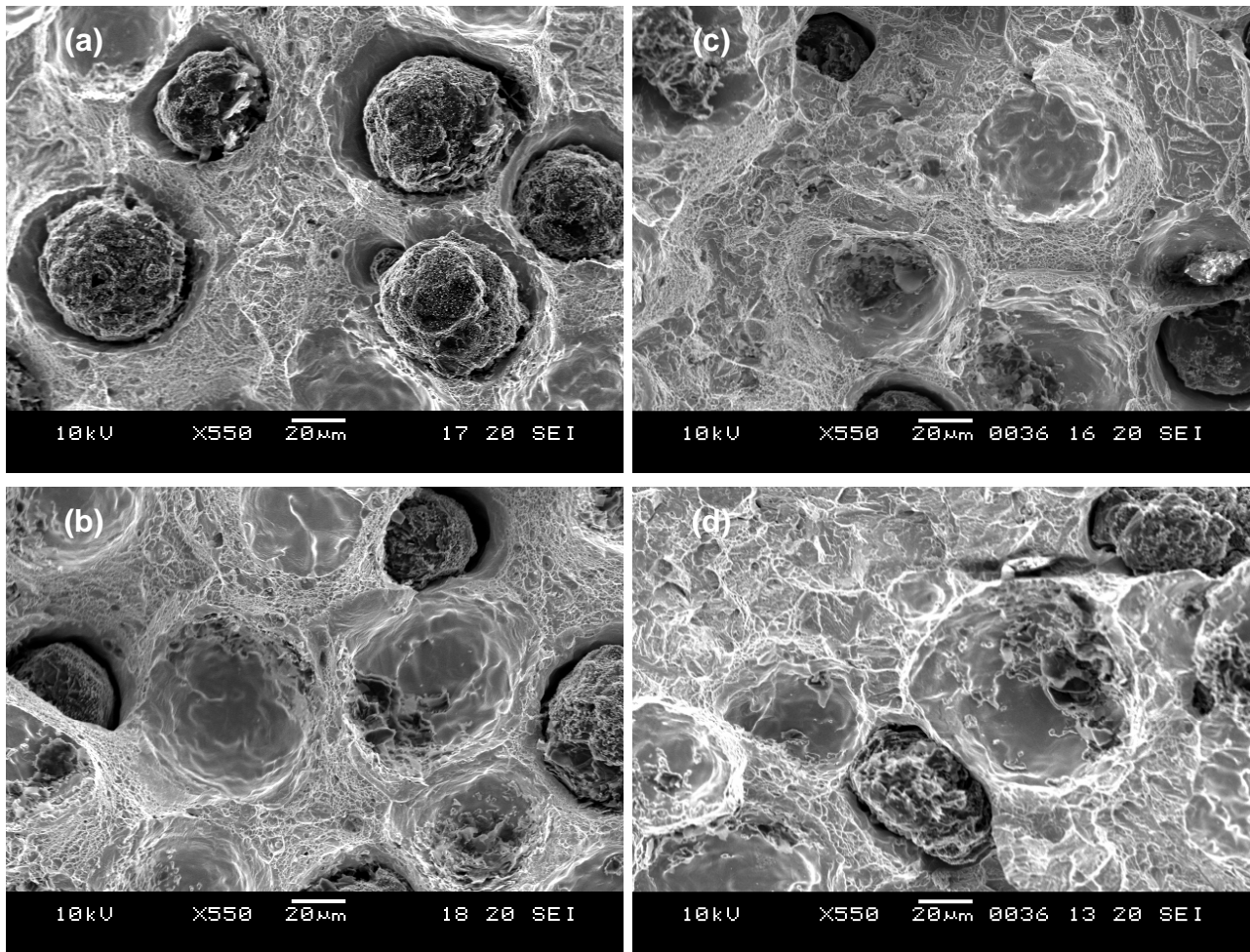


Fig.12 SEM fractographs of various ADIs: (a) material A 300°C-2hrs, (b) material A 360°C-2hrs, (c) material B 300°C-2hrs and (d) material B 360°C-2hrs

### 3.3 機械性質分析

第 3 表列出各實驗條件試片之機械性質試驗結果，並將各機械性質作一比較，如第 11 圖所示。在硬度方面，鑄態 B 材料比 A 材料為高，主要是 B 材料基地具有較多波來鐵含量及 Ni 元素固溶強化之效果；而不論是 A 或 B 材料經沃斯回火處理變成 ADI 材質後，其硬度皆明顯地增加，其中又以 300°C-2hrs 處理較 360°C-2hrs 為高，此一結果主要是和 ADI 之微結構有關（前者較緻密，後者較粗大）。在抗拉強度方面，鑄態 B 材料比 A 材料為高，此結果與硬度的趨勢是一樣的，主要也是受波來鐵含量及 Ni 固溶強化之雙重影響；經 ADI 處理後，A、B 兩種材料皆大幅提升其抗拉強度，但特別的是 B 材料經 300°C-2hrs 處理可獲得最大抗拉強度(1377MPa)，此顯著效果應該與其組織較緻密、Ni 之固溶強化以碳化物含量有所關係。相對地在伸長率方面，A 材料在鑄態時因擁有較多的肥粒鐵含量，具有不

錯之伸長率(~18.2%)，但經沃斯回火處理後則明顯地下降至約 2~6%，而 B 材料經沃斯回火熱處理後，伸長率呈現不降反略升的現象，除此之外，就數據上看來，伸長率的趨勢與殘留沃斯田鐵含量呈現一正比關係。

在衝擊韌性方面，A 材料的鑄態肥粒鐵含量較多，故其衝擊韌性比 B 材料為高(73 vs. 13 joule)，然而此兩種材料經沃斯回火處理變成 ADI 微結構時，當以 300°C-2hrs 處理者因殘留沃斯田鐵含量較少且伴隨有碳化物析出，故 A 材料衝擊韌性相較於鑄態時是降低的(57 joule)，而 B 材料則是增加的(53 joule)；當以 360°C-2hrs 處理者因具有較多量的殘留沃斯田鐵，因此 A、B 兩材料皆可提高衝擊韌性，其中 A 材料(91 joule)略比 B 材料(89 joule)為高，推測此趨勢是因殘留沃斯田鐵含量所造成。

### 3.4 破斷面觀察

第 12 圖為 A、B 兩材料經不同沃斯回火溫度處理之 ADI，其衝擊試片破斷面的 SEM 照片，由圖中可發現不論是 A 或 B 材料經 300°C 處理者，其破斷面特徵為韌窩狀(Dimple)與河流紋(River pattern)之混合型態，而經 360°C 處理者皆呈現出明顯較多的韌窩狀形貌，此一結果也說明了 360°C 處理者比 300°C 處理者具有較高的衝擊韌性。

### 4. 結論

- (1). 球墨鑄鐵添加 4wt% Ni 元素不但可均勻固溶於基地內，而且可促進鑄態基地波來鐵化。
- (2). 添加 4wt% Ni 元素的球墨鑄鐵經不同沃斯回火溫度處理後，可縮短沃斯回火溫度對殘留沃斯田鐵含量之影響，同時也降低了殘留沃斯田鐵中的碳含量。
- (3). 添加 4wt% Ni 元素的 ADI 經 300°C-2hrs 沃斯回火處理者，可獲得最高抗拉強度約 1377MPa，但對其伸長率則影響不明顯。
- (4). 添加 4wt% Ni 元素的球墨鑄鐵經不同沃斯回火溫度處理後，其衝擊韌性皆比鑄態為高(53~89J vs. 13J)，而其中 360°C-2hrs 處理者(89J)又比 300°C-2hrs 處理者(53J)為高。

### 致謝

本研究經行政院國家科學委員會專題研究計畫(計畫編號：NSC94-2216-E-036-003)之經費補助，特此致謝。

### 參考文獻

1. 廖高宇 譯, “ADI在汽車工業的應用”, 鑄造科技188期(2005), p.11.
2. C.H. Hsu, S.C. Lee, H.P. Feng, Y.H. Shy, Metallurgical and Materials Transactions A, vol.32A, 2001, pp.295-303.
3. C.H. Hsu, T.L. Chuang, Metallurgical and Materials Transactions A, vol.32A, 2001, pp.2509-2514.
4. ASTM A897-90, Standard Specification for Austempered Ductile Iron Castings, ASTM, 1990, pp.557-562.
5. Smith, “structure and Properties of Engineering alloys”, McGraw-Hill, New York, 1993, pp.45-51.
6. ASTM A644-92, Standard Terminology Relating to Iron Castings, ASTM, 1992, pp.341-342.
7. T.S. Shih, P.Y. Lin, C.H. Chang, AFS Transactions, vol.142, 1990, pp.609-630.
8. ASTM E8M: Annual Book of ASTM Standards, vol.03.01, 1997, pp.77-97.
9. ASTM E327M: Annual Book of ASTM Standards, vol.01.025, 1991, pp.138-139.
10. ASTM E 975-03, “Standard Practice for X-Ray Determination of Retained Austenite in Steel with Near Random Crystallographic Orientation”.
11. B.D Cullity and S.R. Stock, “Elements of X-Ray Diffraction, 3<sup>rd</sup> edition”, pp.347~357.
12. N.E. Dowling, Mechanical Behavior of Materials, Prentice-Hall, London, 1993, p.178.