

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

銅-鋅-錫/鋁合金之形狀記憶效應及相變態研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC92-2216-E-002-030-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學材料科學與工程學研究所

計畫主持人：王文雄

共同主持人：徐永富

計畫參與人員：鄭裕凱、徐正恩、李江浩、郭荷宏

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 9 月 10 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

銅-鋅-錫合金之形狀記憶效應及相變態研究

A Study on the Shape Memory Effect and Phase Transformation of Cu-Zn-Sn Alloys

計畫編號：NSC 92-2216-E-002-030

執行期限：92 年 08 月 01 日至 93 年 07 月 31 日

主持人：王文雄 國立台灣大學材料科學與工程學研究所教授

共同主持人：徐永富 國立台北科技大學材料及資源工程系副教授

計畫參與人員：鄭裕凱、徐正恩、李江浩、郭荷宏 國立台灣大學材料科學與工程學研究所研究生

中文摘要

本實驗以真空石英膠囊熔煉配置三種錫含量為 3~5wt%之銅-鋅-錫合金來探討其形狀記憶效應之相關特性。熔煉出來的鑄錠經 800°C 均質化與熱軋後，試片分別在 800°C~870°C 進行固溶後再淬火於-10°C 的 10%NaOH 溶液中，利用示差熱分析儀(DSC)及四點電阻量測來測定其變態溫度隨成分變化之情形。熱處理後以掃描式電子顯微鏡(SEM)及穿透式電子顯微鏡(TEM)觀察各試片之顯微組織及相變化，並進行微硬度試驗及形狀回復率測試，此外也以 X-ray 繞射實驗分析其結晶構造。

實驗結果顯示，由 X 光繞射及穿透式電子顯微鏡分析可知，Cu-Zn-Sn 合金之母相為 B2(order BCC)結構，麻田散體為 M9R 結構。經 50 次熱循環，其熱穩定性及形狀回復率仍維持相當不錯。且 Cu-Zn-Sn 合金在恆溫時效期間，其析出物的形貌會隨著時效溫度的上升而有所變化，由 DSC 的觀察，可發現在 228°C 與 342°C 之間有兩個吸熱峰，第一個吸熱峰(250°C)為 α_1 plate 產生所造成，其結構為 M9R，隨著溫度的上升，其析出物的結構會轉變為 FCC 之 α phase，而第二個吸熱峰(300°C)則為 γ 析出物的產生，結構為 BCC。

關鍵詞：形狀記憶效應，形狀回復率

Abstract

In this experiment, three kinds of Cu-Zn-Sn alloys with 3~5wt% Sn were melted in evacuated quartz capsules. After homogenized and hot rolled at 800°C, the specimens were quenched into -10°C NaOH solutions from 800°C~870°C. The effects of alloy additions on the transformation temperatures were determined by differential scanning calorimetry (DSC) and by means of measuring the variation of resistivity with temperature. Microstructures and crystal structures of the specimens after heat treatments were examined by scanning electron

microscope (SEM), transmission electron microscope (TEM), and x-ray diffraction (XRD).

The results show that the crystal structures of parent phase and martensite of Cu-Zn-Sn alloy are B2 and M9R respectively. After fifty thermal cycles, they still have good thermal stability and shape recovery. The morphologies of the precipitates were changed with different aging temperature. Two endothermic peaks between 228°C and 342°C were found on DSC heating curve, the first peak (250°C) is α_1 -plate whose structure is M9R, and the second peak (300°C) is a BCC γ precipitate.

Key words: shape memory effect, shape recovery

1. 前言

形狀記憶合金(Shape Memory Alloy, 簡稱 SMA)是一種能夠記憶原有形狀的機能材料，當合金在低於變態溫度下受到有限度的塑性變形後，可由加熱的方式使其恢復到變形前的形狀，這種特殊的現象稱為形狀記憶效應(Shape Memory Effect, 簡稱 SME)；而當合金在高於變態溫度下($T > A_f$)，對合金施以一應力使其受到超出彈性限之荷重的塑性變形後，釋放應力後將恢復到變形前的形狀，此種特殊的現象稱為擬彈性(Pseudoelasticity, 簡稱 PE)或超彈性(Superelasticity)，另外形狀記憶合金亦具有高制震能力(High damping capacity)而被廣泛應用於機械、醫工、軍事、能源及家電製品等方面，是近年來頗受矚目的機能材料之一。而具有形狀記憶效應的合金應需具備下列幾種特性：

- (1) 具熱彈性麻田散體變態
- (2) 相變態具晶體學上的可逆性
- (4) 母相及麻田散體相皆為序化結構
- (5) 相變態過程中無差排滑移之不可逆塑性變形
- (6) 麻田散體內部的次組織為雙晶或疊差

1951 年 L.C.Chang 及 T.A.Read 在金鎘 (Au-47.5%Cd)中首次發現形狀記憶效應^[1]之後，不

斷的有新的形狀記憶合金被發展出來，例如 Ni-Al、In-Tl、Cu-Zn、Cu-Al-Ni、Fe-Pt、CuAlNi、FeNiC、TiNi、CuZnAl.....等等，然而形狀記憶合金並不是只在金屬材料中發現，在陶瓷材料(Shape Memory Ceramics)^[2]與高分子材料(Shape Memory Polymers)^[3]中均發現到形狀記憶效應。

一般形狀記憶合金種類可分為鐵系及非鐵系合金兩大類，彼此各具有不同的優缺點。非鐵系的形狀記憶合金具有較佳的形狀記憶效應及機械性質，其中銅基形狀記憶合金^[4,5]，具有較低廉的價格與易於製造成型^[6]的優點，但銅基形狀記憶合金會因在使用溫度下發生時效而降低合金的形狀回復率或造成材料脆化，因而減少材料的使用壽命。另外鈦鎳基形狀記憶合金具有極佳的形狀記憶能力、機械性質、抗疲勞強度、耐腐蝕及生物相容性佳，與銅基形狀記憶合金並列為商用形狀記憶合金之主要開發對象。

在以前的文獻中曾指出 Cu-(33~35)wt%Zn-(3~3.5)wt%Sn 合金，具有形狀記憶效應，因為 β 相可以產生多種的相變化，所以大部分的研究都集中在 β 相^[7-8]。因此本實驗主要以 Cu-33.5wt%Zn-(3~5)wt%Sn 作為研究材料，來觀察不同成份的 Sn 含量對合金的影響，並觀察在不同的時效溫度及時效時間的析出物種類、大小及分佈狀況及其對形狀回復率的影響。

2. 實驗步驟

本實驗以真空石英膠囊搭配三種 CuZnSn 形狀記憶合金(成分如表 1 所示)。首先將封管後之真空石英膠囊置於 1150°C 高溫爐中熔煉，再快速冷卻至 800°C 進行 24 小時均質化處理，最後冰水淬而得到合金鑄錠。將鑄錠經由 800°C 熱軋成 1mm 厚平板，再以慢速切片機切成 60mmx2mmx1mm 尺寸之四點電阻、熱循環及彎曲試驗試片，和 15 mm x15 mm x1 mm 的 SEM 及 XRD 試片。接著將試片於 800°C~870°C 下進行 3 分鐘之固溶處理，並以自由落體方式直接淬在 -10°C 的 10%NaOH 溶液中，將固溶熱處理及淬火處理後之試片分別在矽油及鹽浴爐中進行 185°C、225°C、250°C、275°C、300°C、380°C 各五分鐘的恆溫時效處理，在設定的時效處理時間後將試片取出並直接水淬至室溫，以獲得時效處理後之試片。

實驗內容包括:四點電阻變態溫度量測(其設備如圖 1 所示)、EPMA、氧氮含量成分分析、熱循環測試、形狀回復率測試、Hv 微硬度試驗、SEM

顯微組織觀察、XRD 及 TEM 之晶體分析與顯微組織觀察。

表 1 成分分析表

合金編號	實際成分(wt%)				Ms(°C) ⁽³⁾
	Cu ⁽¹⁾	Zn ⁽¹⁾	Sn ⁽¹⁾	O ⁽²⁾	
3353	63.82	33.13	3.05	0.00234	55
3354	62.82	33.43	3.75	0.00635	-74
3355	62.33	32.95	4.72	0.00071	-135

1. Cu、Zn、Sn 使用 EPMA 分析

2. O 使用氧氮分析儀分析

3. Ms 使用四點電阻量測

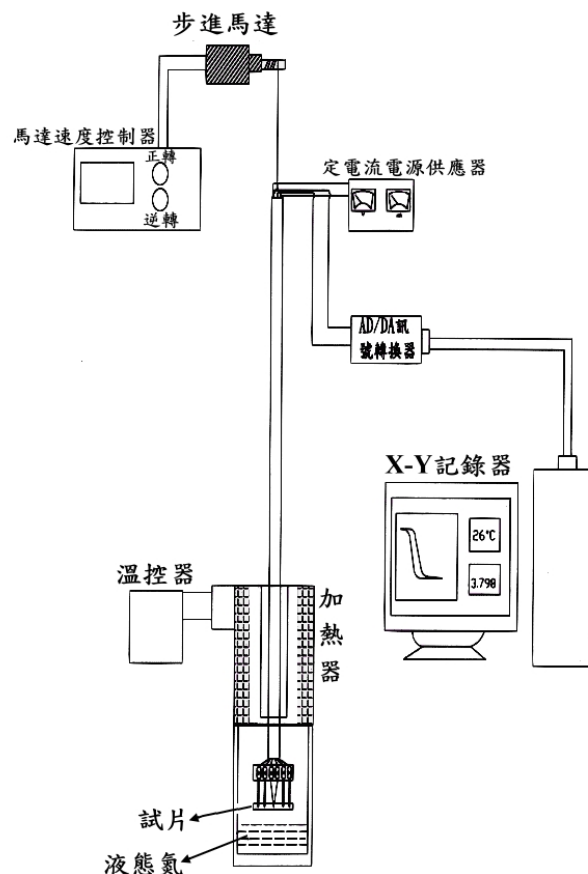


圖 1 四點電阻量測設備示意圖

3. 結果與討論

3.1 熱循環對試片變態溫度之影響

為求本文的內容簡化通順，各合金試片分別以 3353、3354 及 3355 簡稱來表示。試片代號由四位數代表，前面三碼代表 Zn 含量(wt%)，後一碼則代表 Sn 含量，時效處理編號使用斜線(/)分開，斜線前的數字表時效溫度(°C)，斜線後的數字表時效時間(mins)，例如 225/5 表示 225°C 時效 5 分鐘。各試片代號則如表 2 所示。

表 2 試片代號表

試片種類	試片代號
Cu-33.5Zn-3.0Sn	3353
Cu-33.5Zn-4.0Sn	3354
Cu-33.5Zn-5.0Sn	3355
3354 試片經過時效處理後之代號如下所示	
185°C 5 分鐘 時效	3354-185/5
225°C 5 分鐘 時效	3354-225/5
250°C 5 分鐘 時效	3354-250/5
275°C 5 分鐘 時效	3354-275/5
300°C 5 分鐘 時效	3354-300/5
380°C 5 分鐘 時效	3354-380/5

表 3 為 3354、3355 合金試片經由熱循環試驗後，各個變態溫度與遲滯溫度(Af-Ms)之變化情形，圖 2 則為 3354、3355 試片經熱循環後之電阻-溫度遲滯曲線圖。其結果歸納如下：

1. 由實驗結果可知，3354 合金經過熱循環測試後，結果顯示此合金並不因熱循環而造成其變態溫度的大幅改變，代表其熱穩定性相當不錯。從表 3 中可發現經 50 次循環後，各變態溫度約下降了 2~12°C。
2. 而 3355 合金的熱循環結果顯示，Ms 與 As 溫度隨著熱循環次數的增加幾乎保持不變，表示無明顯的母相與麻田散體安定化之現象。另外，觀察合金之溫度遲滯(Af-Ms)其改變不大，表示熱循環穩定性佳。

表 3 各合金試片於熱循環試驗後之變態溫度(°C)

合金編號	As	Af	Ms	Mf	Af-Ms
3354 1 st cycle	-88	-68	-74	-92	6
10 th cycles	-86	-72	-80	-92	8
20 th cycles	-88	-72	-80	-98	8
30 th cycles	-88	-70	-80	-98	10
40 th cycles	-90	-71	-82	-102	11
50 th cycles	-90	-74	-86	-102	12
3355 1 st cycle	-149	-120	-135	-163	15
10 th cycles	-140	-120	-133	-158	13
20 th cycles	-142	-114	-133	-158	19
30 th cycles	-145	-119	-138	-160	19
40 th cycles	-142	-118	-132	-159	14
50 th cycles	-145	-118	-132	-161	14

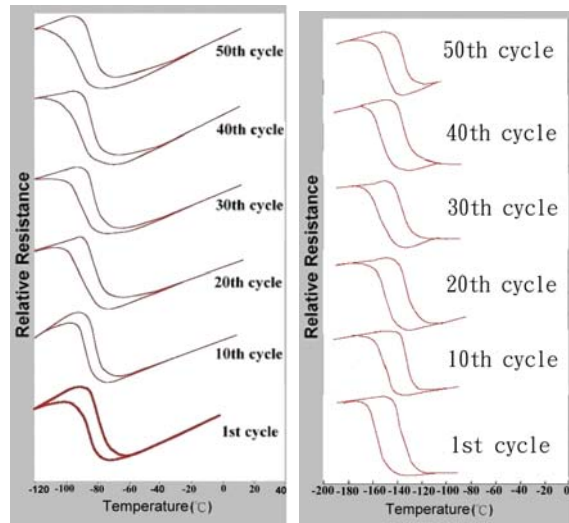


圖 2 各試片經熱循環後之電阻-溫度遲滯曲線圖：
(a)試片 3354,(b)試片 3355。

3.2 Cu-Zn-Sn 合金之熱穩定性質

利用 DSC 量測可瞭解合金的熱穩定性質，圖 3 為 3354 合金由 60°C 加熱至 530°C 之 DSC 曲線圖。由圖中可發現於 250°C 及 300°C 溫度附近產生兩個明顯的吸熱波峰，顯示在此溫度範圍可能有析出物的產生，而合金之熱穩定性質也將受到影響。

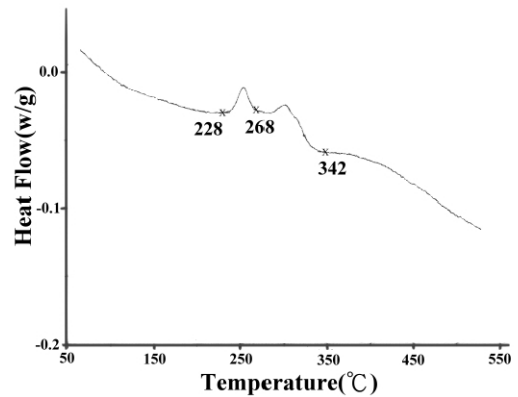


圖 3 3354 合金加熱時之 DSC 曲線圖

3.3 時效對形狀回復率及硬度之影響

依據 DSC 曲線的變化，將試片分別於 185、225、250、275、300 及 380°C 中進行五分鐘的恆溫時效處理，接著進行微硬度與彎曲形狀回復率量測。形狀回復率是形狀記憶合金的重要性質，它是一種用以評估合金實用性的一項指標，在此將對固溶處理及經過 50 次熱循環後之試片進行測試，本實驗是採用彎曲試驗來量測合金的形狀回復

率。其結果歸納如下:

1. 經由實驗發現，3353 合金的形狀回復率為 77.5%，3354 合金的形狀回復率為 83.3%，而 3355 合金的形狀回復率為 87.5%，其所承受的應變(strain)為 2.4%。
2. 另外對 3354 與 3355 進行 50 次循環的試片來量測其形狀回復率，3354 與 3355 合金的形狀回復率分別為 81.3%及 80%，由此可發現經過 50 次循環後的試片，其形狀回復率均有下降的趨勢，不過其仍具有 80%以上的不錯形狀回復率。

由圖 4 的曲線變化趨勢可知，硬度值與形狀回復率在 250~275°C 將發生劇烈的變化，此現象主要是 α_1 -plate 開始在基地上析出所造成，由此可知 α_1 -plate 的析出將造成合金硬度明顯增加，但卻使形狀回復率劇烈下降，且隨著時效溫度的增加，其硬度值會隨之下降。經 380°C 時效 5 分鐘後之試片則是出現脆化行為，試片經彎曲後即發生斷裂，完全喪失形狀記憶能力。

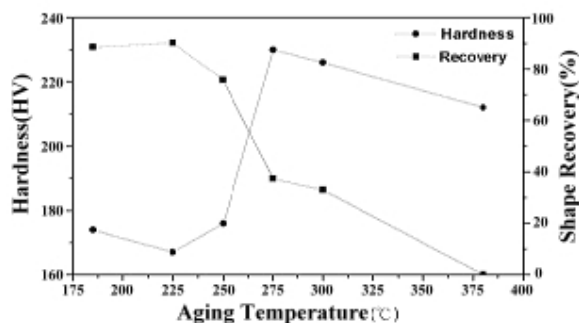


圖 4. 3354 合金之時效溫度與硬度、形狀回復率關係圖 (彎曲應變量為 2.4%)

3.4 X 光繞射分析

X 光繞射儀和 TEM 皆具判定晶體結構之功能，在以往對形狀記憶合金晶體結構的判讀，主要是藉由 TEM，其主要因素在於容易從電子繞射圖形中區分出不同的結構，如[010]Zone 用以區分單斜(monoclinic)和正交(orthorhombic)結構，也可以藉由反相晶界(Anti-Phase Boundary, APB)及超晶格繞射點(superlattice)的出現，來證明序化結構的存在。

為了更深入瞭解時效後的析出物與相變化所造成的結構變化，在此將對各時效試片進行 X 光繞射分析，而藉由實驗數據可獲得繞射平面 {hkl} 之 d 值，進而換算其晶格常數，而其麻田散體與 α_1 -plate 析出物是利用單斜晶系(Monoclinic)的公式:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{1}{\sin^2 \beta} \left(\frac{h^2}{a^2} + \frac{k^2 \sin^2 \beta}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} - \frac{2hl \cos \beta}{ac} \right)$$

。將四個繞射面 {hkl} 與 d 值代入此四元聯立方程式中，利用 Mathematica 軟體程式計算出晶格常數 a、b、c 與 β 角，若算出之 β 角等於 90°，則可以判定其為 9R 結構，反之，若 β 角不等於 90°，則為 M9R 結構。

1. 固溶處理狀態之 3353、3354 及 3355 合金的 X 光繞射分析

首先圖 5(a)、(b)、(c)分別為試片 3353、3354、3355 的 X-ray 繞射圖，而(d)、(e)、(f)則是將各試片旋轉 90 度後的 X-ray 繞射圖。圖 5(a)、(d)經過 Mathematica 軟體程式分析後可以發現 3353 試片之波峰是由 β_1' 麻田散體所提供，並計算出其晶格常數 $a=5.038\text{\AA}$ 、 $b=2.048\text{\AA}$ 、 $c=19.083\text{\AA}$ 、 $\beta=88.8^\circ$ ，其 β 角不等於 90 度，並且在 X-ray 繞射圖中發現有 (009) 的繞射峰，所以此麻田散體為 M9R(Monoclinic)結構。而圖 4.10(b)、(c)、(e)、(f)，經由分析發現 3354 及 3355 試片之繞射峰均是由 β' 母相所提供，所以其在室溫為 β' (order BCC，B2)相，其晶格常數為 $a=2.95\text{\AA}$ 。

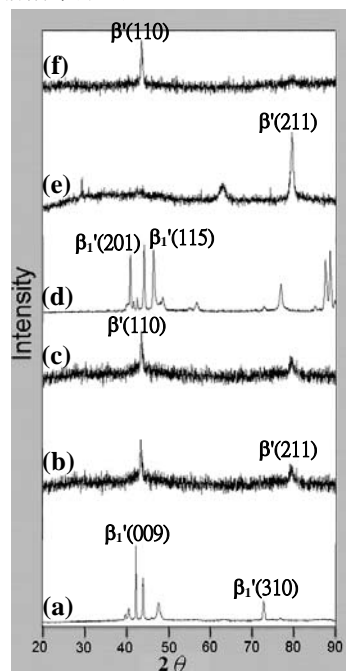


圖 5. 固溶處理狀態之 3353、3354 及 3355 合金的 X 光繞射分析圖:(a)、(b)、(c)分別為 3353、3354、3355 固溶處理狀態,(d)、(e)、(f)分別為各試片旋轉 90 度 (β_1' :Martensite, β' :Parent phase).

2. Cu-33.5Zn-4Sn 合金時效後之 X 光繞射分析

圖 6 為 3354 合金時效後之 X 光繞射圖，(b) 圖為 185°C 時效 10 分鐘，而(c)圖為 225°C 時效 5 分鐘，由於 α_1 -plate 的析出隨著恆溫處理溫度的改變，會有不同時間的析出潛伏期(incubation)，當變態溫度越高時，其析出潛伏期則越短，可發現在此時效溫度下， α_1 -plate 來不及析出，所以在室溫下仍是母相的狀態；(d)、(e)圖為 250°C 及 275°C 時效各 5 分鐘的 X-ray 繞射圖，在圖(d)中，可發現有 α_1 -plate 的峰值開始產生，其內部為母相與 α_1 -plate 共存，此結果可以由 TEM 與 SEM 來印証，而圖(e)也是 α_1 -plate 與母相共存，但因為較高溫的時效，使 α_1 -plate 成長，變的比較粗大，且分佈密度大為提高；(f)圖為 300°C 時效五分鐘的 X-ray 繞射圖，因時效溫度的更高，其析出物的結構慢慢的由 α_1 -plate 轉變成 FCC 結構的 α phase，其晶格常數 $a=6.307\text{\AA}$ ，其中也發現有 γ 析出物的產生，其晶格常數 $a=8.598\text{\AA}$ ；(g)圖為 3354 合金在 380°C 時效十分鐘的 X-ray 繞射圖，其結構大多為母相與 α phase。

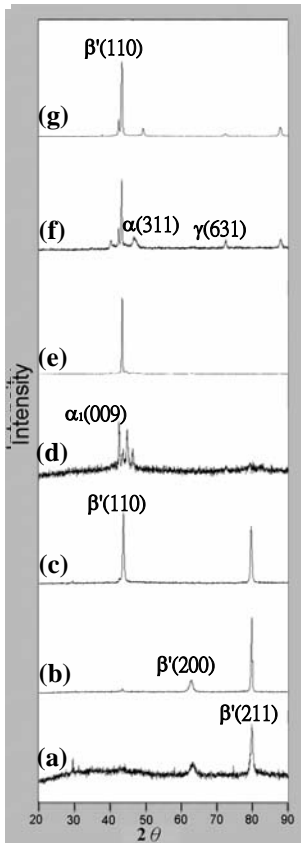


圖 6. 3354 合金經過不同時效之 X-ray 繞射圖：
(a) 3354 固溶處理狀態，(b)3354-185/10，
(c)3354-225/5，(d) 3354-250/5，(e)3354-275/5，
(f)3354-300/5，(g)3354-380/10(β' : Parent phase
 γ : Cu_5Zn_8 α_1 : α_1 -plate α : α phase)。

3. Cu-33.5Zn-5Sn 合金時效後之 X 光繞射分析

圖 7(a)、(b)、(c)分別是 3355 之固溶狀態、185°C 時效十分鐘、380°C 時效十分鐘的 X-ray 繞射圖，圖(a)、(b) 的結構為母相，而圖(c)則有 α phase 與 γ 析出物的波峰產生。

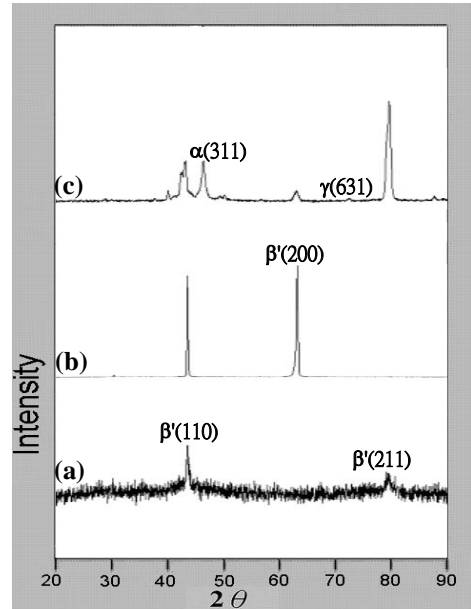
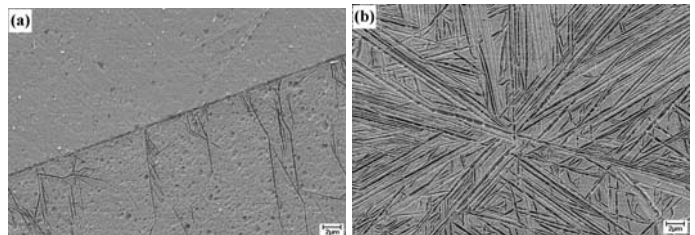


圖 7. 3355 合金經過不同時效之 X-ray 繞射圖：(a)3355 固溶處理狀態，(b)3355-185/10，(c)3355-380/10
(β' : Parent phase, γ : Cu_5Zn_8 , α_1 : α_1 -plate, α : α phase)。

3.5 SEM 顯微組織觀察

將時效後之試片進行 SEM 顯微組織觀察，由圖 8(a)中可發現於 250°C 時效期間， α_1 -plate 將首先由晶界處開始異質生核，並以樹枝狀方式成長，隨著時效溫度升高至 275°C，析出物的數量與尺寸也跟著增加，而在圖 8(c)~(d)中可發現在 300°C 時效期間， γ 析出物會於 α_1 -plate 與基地界面處開始析出。而溫度持續升高至 380°C 後， γ 析出物的數量亦隨之增加。由 SEM 的顯微組織觀察可知，圖 3 中 DSC 曲線的兩個吸熱峰分別表示 α_1 -plate 及 γ 析出物的生核成長行為。



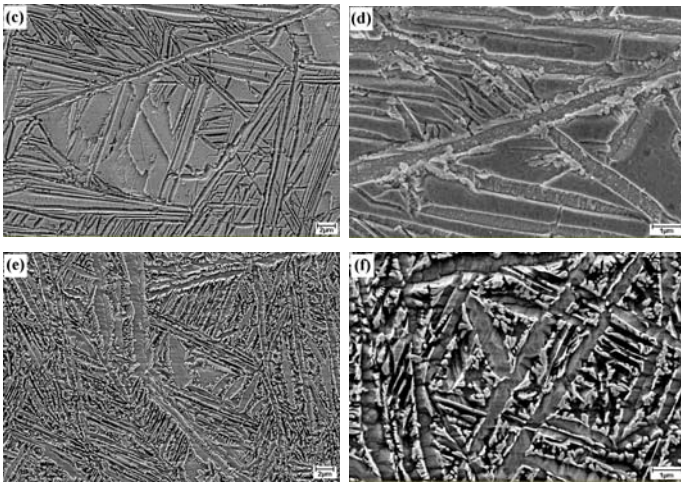


圖 8. SEM 顯微組織觀察: (a)3354-250/5, (b)3354-275/5,(c)3354-300/5, (d)3354-300/5 高倍率觀察,(e)3354-380/5, (f)3354-380/5 高倍率觀察.

3.6 TEM 顯微組織觀察與晶體結構分析

(1) Parent phase 之結構分析 (225°C 時效 5 分鐘)

圖 9(a)為 3354 合金經 225°C 時效後之顯微組織圖，顯示尚未有任何 α_1 -plate 於 parent phase 基地中析出，而由圖 9(b)之 SADP 中的超晶格繞射點可知，Parent phase 屬於序化之 B2 結構，另外也觀察到典型的 Ω streak 存在，經計算可知晶格常數 $a = 2.951\text{\AA}$ 。

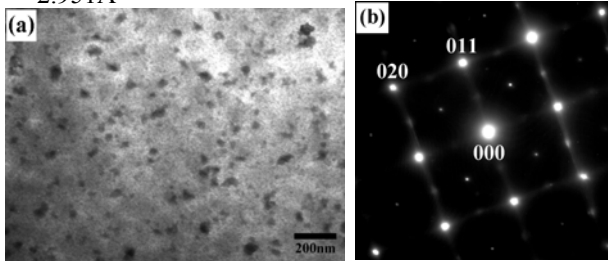


圖 9. TEM 顯微組織觀察: (a)3354-225/5 明視野像, (b) 3354-225/5 之[100]Zone SADP 圖.

(2) α_1 -plate 之結構分析 (275°C 時效 5 分鐘)

圖 10 為合金 3354 於 275°C 時效所生成的 α_1 -plate 析出物，其內部呈現高密度疊差，而由 SADP 圖分析可知， α_1 -plate 析出物為 M9R 結構，晶格常數 $a = 5.038\text{\AA}$ 、 $b = 2.049\text{\AA}$ 、 $c = 19.083\text{\AA}$ 、 $\beta = 88.89^\circ$ 。

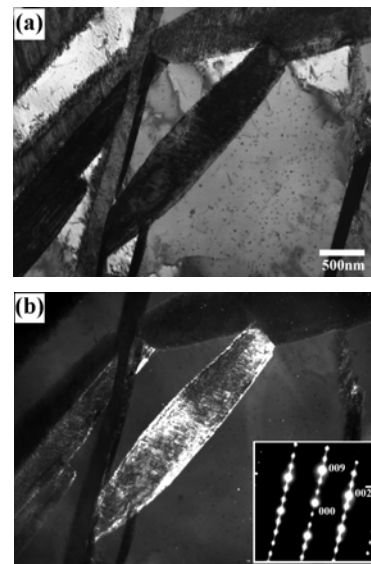


圖 10. TEM 顯微組織觀察: (a)3354-275/5 明視野像, (b) 3354-275/5 之暗視野像與[110]Zone SADP 圖.

(3) α phase 之結構分析 (380°C 時效 5 分鐘)

圖 11 顯示 α phase 析出物內部疊差密度降低，界面也較不平整，且周圍伴隨許多 γ 析出物的存在。由 SADP 分析可知為 FCC 結構，晶格常數 $a = 6.307\text{\AA}$ 。

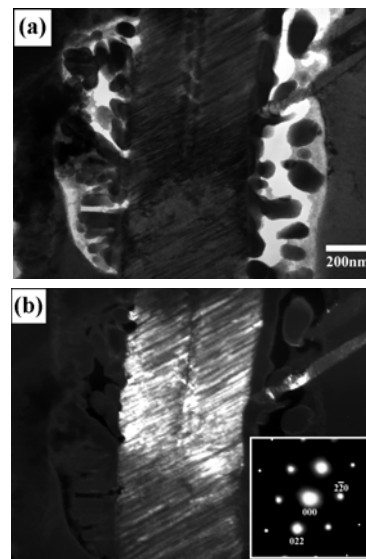


圖 11. TEM 顯微組織觀察: (a)3354-380/5 明視野像, (b) 3354-380/5 之暗視野像與[110]Zone SADP 圖.

(4) γ 析出物之結構分析 (380°C 時效 5 分鐘)

圖 12 顯示在 380°C 時效溫度下， γ 析出物在 α phase 界面及 parent phase 基地上大量析出。圖 12(b) 顯示 parent phase(P)與 γ 共存之 SADP 圖(parent

phase 之繞射點以 P 表示)，經分析可知 γ 析出物屬於 Cu_5Zn_8 之 BCC 結構，其晶格常數 $a = 8.598\text{\AA}$ 。

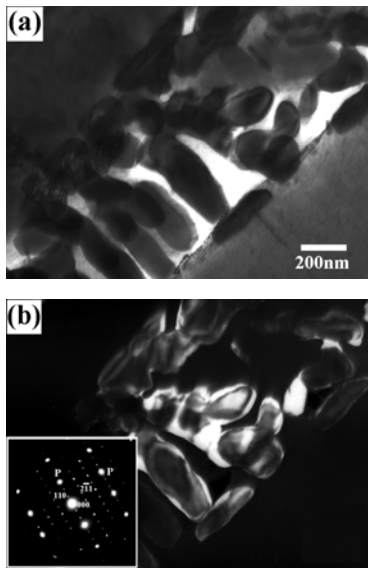


圖 12. TEM 顯微組織觀察: (a)3354-380/5 明視野像, (b) 3354-380/5 之暗視野像與 $[\bar{1}13]$ Zone SADP 圖.

(5) α_1 -plate 之樹枝狀模式成長

α_1 -plate 最初會在晶界處異質生核(如圖 8(a)所示)，並隨著溫度的增高而向基地內部成長。圖 13 則顯示合金 3354-250/5 的 TEM 顯微組織圖，可發現 α_1 -plate 呈現樹枝狀成長，即藉由析出物本身為異質生核處而再次生核成長。

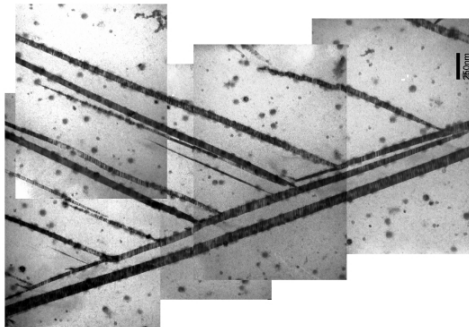


圖 13. α_1 -plate 之樹枝狀模式成長

(6) α_1 -plate 交錯之成長模式

圖 14 為合金 3354-2750/5 之 TEM 顯微組織觀察，大量的 α_1 -plate 容易發生相互交錯的現象，隨著析出物體積的增大，交錯處的成長將受到抑制而產生大量的殘留應變(如圖 14(b)所示)。

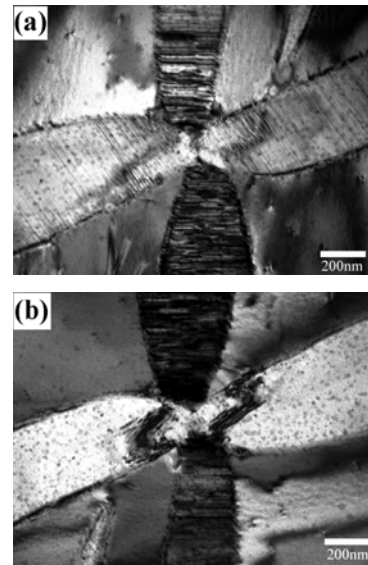


圖 14. α_1 -plate 交錯之成長模式: (a)顯示兩個不同方向疊差之關係, (b)顯示所造成之殘留應變.

(7) γ 析出物之生核模式

原本亞共析的 Cu-Zn-Sn 合金不會析出高 Zn 的 γ 析出物，但由於 α_1 -plate 的不斷成長，使周圍基地的 Zn 原子濃度增高，超過其原子飽和固溶限，使得 γ 析出物在能量較高之界面處異質生核，並隨著溫度的提高而大量成長。圖 15 顯示合金 3354-300/5 之 TEM 顯微組織圖。

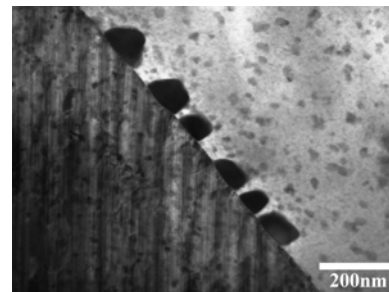


圖 15. γ 析出物之成核模式

(8) α phase 內部疊差方位之重新取向

圖 16 顯示合金 3354-380/5 之 TEM 顯微組織圖，經由 SADP 可證明，在 α phase 上下兩部分皆同為 $[011]$ Zone 之 FCC 結構，顯示在同一個 α phase 內部中存在著兩種不同的疊差方位，且疊差內部伴隨著差排的存在。隨著時效溫度增加， α_1 -plate 的體積將逐漸成長增大，結構也將由 M9R 轉變成 FCC 的 α phase，在這成長的過程中，為了調適析出物體積增加所造成的大量塑性變形，析出物會利用內部疊差方位的重新取向，或是以差排來進行塑性調節。

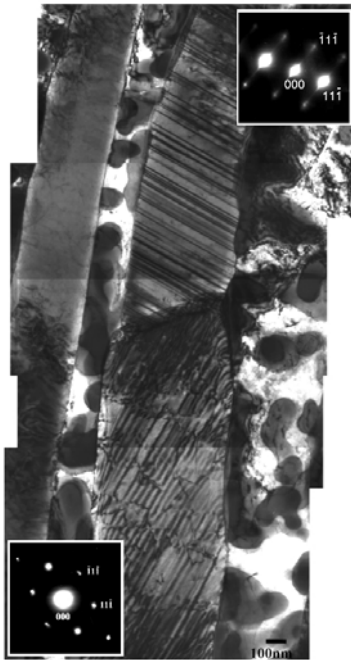


圖 16. α phase 內部疊差方位之重新取向

4. 結論

1. 本實驗所熔煉合金試片 3353、3354、3355 在固溶處理後均具有熱彈性麻田散體變態之特性，基地相為 Parent Phase 者屬於 B2 結構，基地相為麻田散體者屬於 M9R 結構。
2. 3354 與 3355 合金在經過 50 次的熱循環後，其變態溫度不會因熱循環而造成大幅的改變，代表其熱穩定性相當不錯。且兩合金再經過 50 次熱循環後的形狀回復率仍有 80% 以上。
3. 當合金於 250°C 時效期間會有樹枝狀的 α_1 -plate 析出物產生，使硬度值有上升的趨勢，其為樹枝狀的生長方式且是沿著其優選方向生長，而當大量的 α_1 -plate 析出時，其 α_1 -plate 會有互相重疊的交錯處，此處的晶格被嚴重扭曲且有殘留應變存在其中。
4. γ 析出物會於 300°C 時效期間於 α_1 -plate 與基地界面處異質生核，隨溫度增高其析出量亦隨之增大。
5. α_1 -plate 成長轉變至 α phase 的過程中，析出物會以差排或是內部疊差的重新取向來進行塑性調節。

[參考文獻]

- [1] L. C. Chang and T. A. Read, Trans. Met. Soc. AIME, 189(1951)p.47.
- [2] D. Berlincourt, H. H. A. Krueger and B. Jaffe, J. Phys.

& Chem. Solids, 25(1964) p.659.

- [3] S. Takei, In Development and Applications of Shape Memory Polymers (in Japanese), (1989) p.11.
- [4] C. M. Wayman, J. Met., 32(1980) p.129.
- [5] Hiroyasu Funakubo, Shape Memory Alloys, p.176.
- [6] K. Otsuka and K. Shimizu, Int. Metals Review, 31(1986) p.93.
- [7] J. D. Eisenwasser and L. C. Brown, Metall. Trans 3(1972) p.1359
- [8] I. Dvorak And E. B. Hawbolt, Metall. Trans. A 6(1975) p.95

致謝

感謝國科會計畫編號 NSC92-2216-E-002-030 的經費支援。