

**SIMA製程中不同應變量及加熱條件對AZ61鎂合金微觀組織之影響**  
**Effects of different strain and heating factor on the microstructure of AZ61**  
**Mg alloy produced by SIMA process**

葉怡良\*、呂傳盛、陳立輝、洪飛義  
國立成功大學材料科學及工程學系

Yi-Liang Ye\*, Truan-Sheng Lui, Li-Hui Chen, Fei-Yi Hung

Department of Materials Science and Engineering, National Cheng Kung University.

\*Email: hahaha7603@hotmail.com

Tel : 886-6-2757575 ext 62964

### 摘要

本研究利用不同應變量之AZ61鎂合金擠型材經應變導引熔漿活化法(Strain Induced Melt Activation, SIMA)製程後，探討其微觀組織的演變。SIMA製程具發展潛力因成形過程簡便、設備裝置較為單純，所以成本較為低廉。本研究藉由不同擠形比去取代傳統利用冷壓縮所導入的應變量並探討其不同擠形比對微觀組織之影響。藉由提升加熱溫度及適當的持溫時間獲得較等軸之晶粒，本研究發現擠形量EX3.5材其加熱溫度560°C、持溫15分鐘為最佳結果其平均晶粒徑約為70.3 $\mu\text{m}$ 、液相率約20.2，EX2.5材則加熱溫度560°C、持溫20分鐘為最佳結果，平均晶粒徑約為67.9 $\mu\text{m}$ 、液相率約17.3故應變量大(EX3.5)的材料其液相較易生成並包覆固相晶粒，進而縮短球化時間。晶粒粗大化機制在加熱初期由coalescence所主導，後期則由Ostwald ripening所主導，且藉由Lifshitz-Slyozov-Wagner LSW理論分析晶粒粗大速率。

關鍵詞：半固態製程, SIMA, AZ61

### Abstract

Strain-induced melt activation (SIMA) is a process with development potential due to its simplicity and low cost. The semisolid billet of AZ61 Mg alloy was fabricated by the modified SIMA process which was applied with different extrusion ratios instead of the conventional cold compression. The grain becomes more globular with increasing the reheating temperature and the appropriate holding time. Moreover, EX3.5 has the optimal heating parameters for holding temperature 560°C and heating time 15 minutes. EX2.5 has the optimal heating parameters for holding temperature 560°C and heating time 20 minutes. Therefore, large strain (EX3.5) material generated liquid phase easily and shorted the heating time. The dominant mechanism of grain coarsening at initial stage is grain coalescence, while Ostwald ripening at longer

holding time, and the coarsening rate was analyzed by LSW (Lifshitz-Slyozov-Wagner) theory.

Key word: Semisolid process, SIMA, AZ61

## 一、前言

由於鎂合金具有低密度，高比強度及良好的耐震性質，對於要保有強度又需輕重量的產業而言，鎂合金是很理想的材料[1]。鎂合金為hexagonal close-packed(HCP)結構在室溫底下因滑移系統受限制導致其加工性很差，所以在製造鎂合金時必須提升溫度以增加其加工性[2]。製造鎂合金主要分為壓鑄法(DC)、半固態製程(SSP)等[1]。相較於壓鑄法，半固態製程廣為研究因其有較低成形溫度，可增加模具壽命、減少孔洞和固化收縮、促進機械性質[3]。但半固態製程需要球狀晶胚料，現今有許多方法可製作球狀晶，其中以SIMA製程去製作半固態胚料較廣為研究，因SIMA製程設備簡便成本較為低廉。

SIMA製程中當溫度到達半固態溫度時晶粒會被液相包覆，為了降低界面能因而使晶粒趨於等軸。但處於半固態溫度區間晶粒成長快速，而晶粒大小將影響材料成形的品質。因此一個理想的半固態胚料必須有一個適合的加熱條件。傳統SIMA製程被K.P. Young等人[4]提出，是使用冷壓縮去導入應變量，但材料容易因為冷壓縮產生破壞使導入的應變量受到限制。為了改善傳統SIMA製成的缺點最常使用的為等徑轉角擠製(Equal channel angular extrusion, ECAE) [5]，但其設備複雜成本較高，本實驗將以SIMA製程去製作半固態胚料(球狀晶)，並以不同擠型量探討AZ61鎂合金微觀組織的差異，且由於晶粒成長快速也將探討材料晶粒粗大化機制。

## 二、實驗方法與步驟

本實驗選用AZ61鎂合金擠型材其組成成分如Table 1。試片以適合大小進行SIMA製程，經研磨拋光後利用腐蝕液(醋酸1ml+苦味酸3.45g+酒精9ml)腐蝕。利用光學顯微鏡(optical microscope, OM)觀察試片之微觀組織。實驗選用兩種不一樣擠型比之板材與棒材，經計算擠型比( $\sum \epsilon = \ln(A_0/A)$ )， $A_0$ 為起始表面積， $A$ 則為擠型後表面積)得到板材擠型比為3.6，棒材則為2.5(以下板材以EX3.6材、棒材則以EX2.5材表示)。

先將EX3.6材利用空氣爐真空加熱，溫度分別為500°C、520°C、540°C、560°C、580°C並持溫30分鐘以找到適合SIMA製程所需的溫度，再以560°C持溫1、4、7、10、15、20、30分鐘去探討其晶粒粗大化機制。

EX2.5材則以相似EX3.6材加熱條件540°C、560°C、580°C持溫10、20分鐘，找出SIMA製程之最佳加熱條件，因為棒材在擠型時其邊材與心材所受應變量不同，所以實驗也將觀察其邊材與心材SIMA製程後微觀組織的差異。且比較不同應變量之材料EX3.6材及EX2.5材加熱條件相同但因其不同應變量所造成微觀組

織的差異。

### 三、實驗結果及討論

#### 3.1 微觀組織

**Fig.1(a)**為 EX3.6 材 ND 面金相圖，觀察其晶粒為細小的動態再結晶晶粒，而粒徑大小約為 10 $\mu\text{m}$ 。

**Fig.2** 為 EX3.6 材加熱溫度分別於 500 $^{\circ}\text{C}$ 、520 $^{\circ}\text{C}$ 、540 $^{\circ}\text{C}$ 、560 $^{\circ}\text{C}$ 、580 $^{\circ}\text{C}$  持溫 30 分鐘之金相圖，計算其平均粒徑與液相率如 **Fig.3**，由 **Fig.3** 可觀察出晶粒在 540 $^{\circ}\text{C}$  有明顯的成長，應為液相的產生導致晶粒成長不受晶界限制而快速成長，隨著溫度的提升液相率也相對上升。粒徑在加熱溫度 560 $^{\circ}\text{C}$ (92.5 $\mu\text{m}$ )至 580 $^{\circ}\text{C}$ (92 $\mu\text{m}$ )、600 $^{\circ}\text{C}$ (82.1 $\mu\text{m}$ )，其粒徑隨著溫度提升而下降主要是因材料內部晶粒開始液化所致。

#### 3.2 粗大化機制

**Fig.5**為EX3.6材加熱溫度560 $^{\circ}\text{C}$ ，持溫時間分別為1、4、7、10、15、20、30分鐘之金相圖。加熱前期持溫1、4、7分鐘，可以觀察到部分細小晶粒結合成長條狀晶，因此加熱初期晶粒粗大化機制為coalescence主導。而加熱後期持溫時間(10、15、20、30分鐘)液相出現，晶粒成長屬於體擴散所以其粗大化機制可透過LSW(Lifshitz-Slyozov-Wagner)理論去判斷是否為Ostwald ripening主導，其等式[6, 7, 8]:

$$\bar{d}^3 - \bar{d}_0^3 = Kt$$

$\bar{d}$ 為平均粒徑、 $\bar{d}_0$ 為初始未加熱之平均粒徑而 $t$ 為加熱時間， $K$ 表示粗大化速率常數。於LSW理論 $n=3$ 時，線性迴歸所得之相關係數越趨近於1則表示晶粒成長機制越符合體擴散機制的Ostwald ripening。由**Table 3**顯示EX3.6材在不同持溫條件其平均粒徑變化所得之決定係數見**Fig.6**相關性大於0.98，證明其主導晶粒粗大化機制為Ostwald ripening[8]。

#### 3.3 不同應變量之影響

**Fig.1(b)**為 EX2.5 材 ND 面金相圖，比較 **Fig.1(a) (b)**兩張圖可觀察應變量較大之 EX3.6 材有較均勻的動態再結晶細小晶粒。且利用相似 EX3.6 材之加熱條件處理 EX2.5 材比較在相同加熱條件下因材料不同應變量導致微觀組織的差異。

**Fig.4** 則為 EX2.5 材 SIMA 製程處理後邊材與心材之金相圖，利用此金相圖算出粒徑變化 **Table 2**，可看出在加熱條件為 560 $^{\circ}\text{C}$  持溫 20 分鐘其邊材粒徑 75.2 $\mu\text{m}$  與心材粒徑 71.2 $\mu\text{m}$  差異不大，所以對於邊材與心材因擠型所導致應變量的不同(應變量邊材大於心材)，經 SIMA 處理後造成微觀組織的差異在本實驗是較小的。

**Fig.7** 為 EX3.6 材和 EX2.5 材在加熱條件相同下其微觀組織的差異，利用液相率 **Fig.8** 去觀察不同應變量之材料(EX3.6 材與 EX2.5 材)經 SIMA 製程後微觀組織的差異，且由 **Fig.8** 觀察出應變量大的材料(EX3.6)其球化所需時間較短，推測是由於 EX3.6 材未經 SIMA 處理前有較均勻的動態再結晶細小晶粒。所以透過擠

型給予材料較大應變量進而縮短 SIMA 製程中之加熱時間而達到細化晶粒是可行的。

#### 四、結論

1. 本實驗鎂合金AZ61擠型材可透過SIMA製程形成半固態胚料所需的等軸晶。
2. EX3.6材經加熱溫度560°C持溫15分鐘、EX2.5材經加熱溫度560°C持溫20分鐘，其球化效果最好。
3. EX3.6材晶粒粗大化機制在加熱初期(持溫1、4、7分鐘)為coalescence主導，加熱後期(持溫10、15、20、30分鐘)液相出現則為Ostwald ripening主導。
4. 應變量大(EX3.6)之材料其未經SIMA處理前有較均勻動態再結晶之細小晶粒，導致其球化時間較短。

#### 參考文獻

- [1] KLEINER S, BEFFORT O, WAHLEN A, UGGOWITZER P J, "Microstructure and mechanical properties of squeeze cast and semi-solid cast Mg<sub>2</sub>Al alloys", Journal of Light Metals, 2002, 277-280.
- [2] H. Yoshinaga, R. Horiuchi, "On the nonbasal slip in Magnesium crystals", Jpn. Inst. Met., 1964, 14-21.
- [3] Ju-fu JIANG, Xin LIN, Ying WANG, Jian-jun QU, Shou-jing LUO, "Microstructural evolution of AZ61 magnesium alloy predeformed by ECAE during semisolid isothermal treatment", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2012, 555-563
- [4] K. P. Young, United States Patent 4415374, 1983. W. Dai, S.B. Xue, J.Y. Lou, Y.B. Lou and S.Q. Wang, "Torch brazing 3003 aluminum alloy with Zn-Al filler metal", Trans. Nonferrous Met. Soc. China, 2012, 30-35.
- [5] R.Z.Valiev,R.K.IslamgalievandI.V.Alexandrov,"Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation", Progress in Materials Science, 2000, 103-189.
- [6] Amir Bolouri, Mohammad Shahmiri, Chung Gil Kang, "Coarsening of equiaxed microstructure in the semisolid state of aluminum 7075 alloy through SIMA processing", J Mater Sci, 2012, 3544-3553.
- [7] H.V. Atkinson, D. Liu, "Coarsening rate of microstructure in semi-solid aluminum alloys", Trans. Nonferrous Met. Soc, 2010, 1672-1676.
- [8] S. C. Hardy, P. W. Voorhees, "Ostwald ripening in a system with a high volume fraction of coarsening phase", Metallurgical transactions A, 1988, 2713-2721.

Table 1 Composition of AZ61 (wt.%)

	鋁	鋅	錳	鎂
AZ61	6.77	0.905	0.366	Bal.

Table 2 EX2.5 材 SIMA 後邊材與心材平均粒徑

	560°C 20 分鐘
EX2.5 邊材平均粒徑	75.2 $\mu\text{m}$
EX2.5 心材平均粒徑	71.2 $\mu\text{m}$

Table 3 EX3.6 材不同持溫時間之平均粒徑變化

Time(min)	10	15	20	30
Grain size( $\mu\text{m}$ )	58.7	64.5	69	80.5

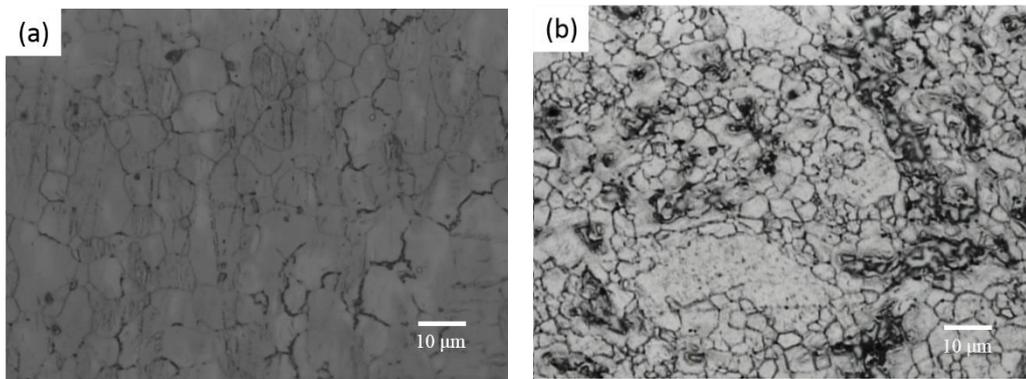


Figure 1. EX3.6 材與 EX2.5 材金相圖: (a)EX3.6 (b) EX2.5

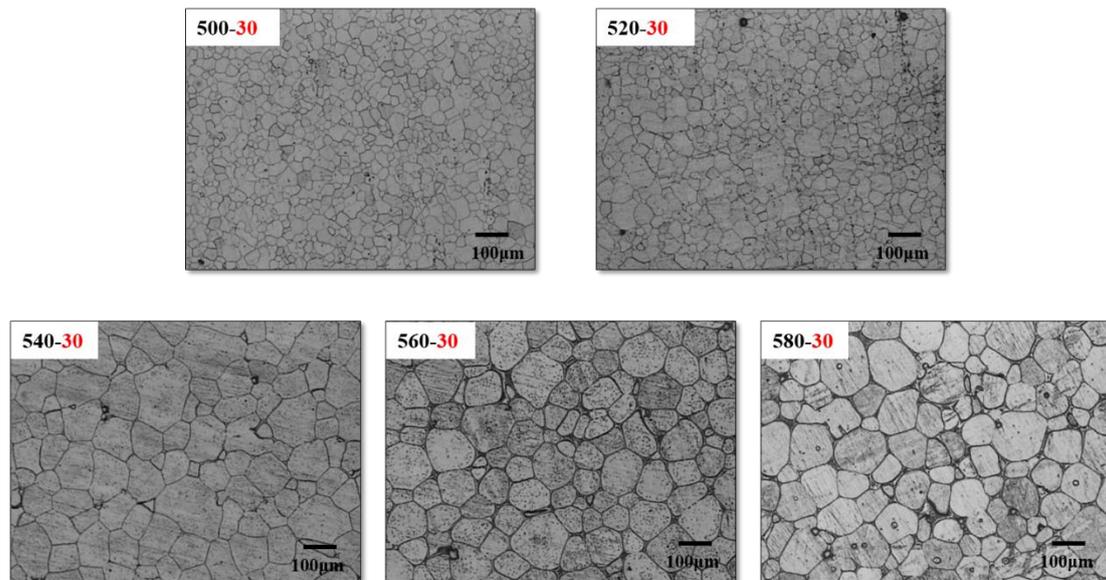


Figure 2. EX3.6 材加熱 500°C、520°C、540°C、560°C、580°C 持溫 30 分鐘金相圖

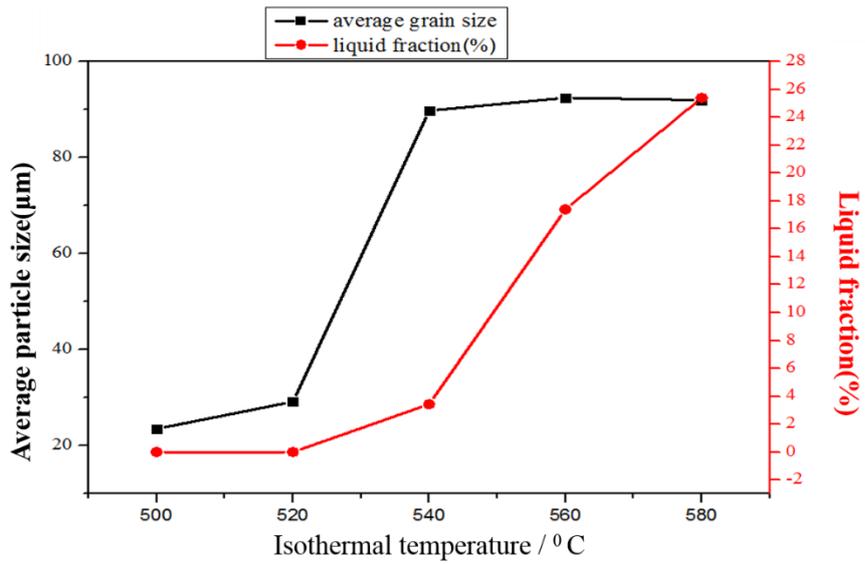


Figure 3. EX3.6 材加熱後之平均粒徑與液相率

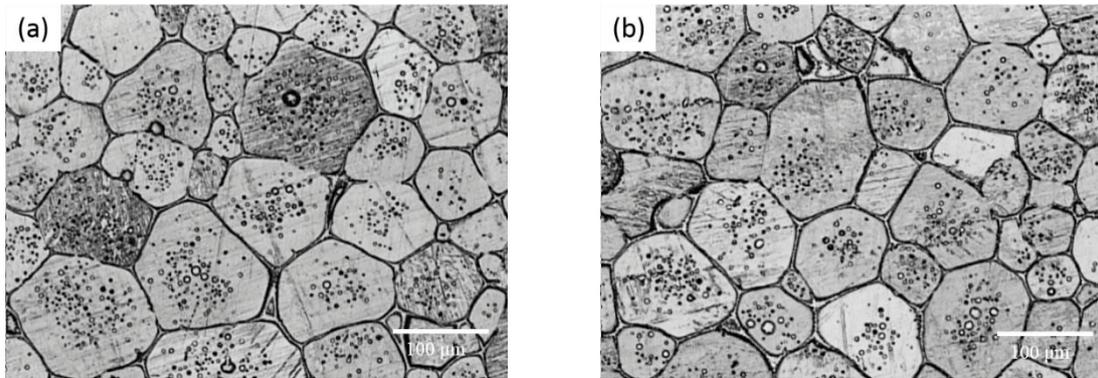


Figure 4. EX2.5 材加熱溫度 560°C 持溫 20 分鐘金相圖: (a)邊材(b)心材

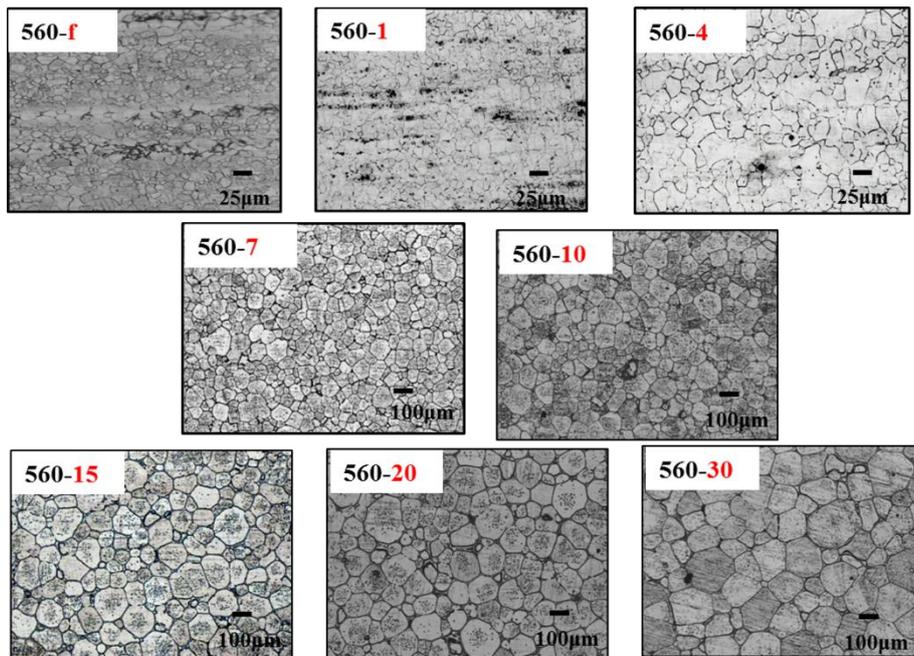


Figure 5. EX3.6 材加熱 560°C 持溫時間 1、4、7、10、15、20、30 分鐘金相圖

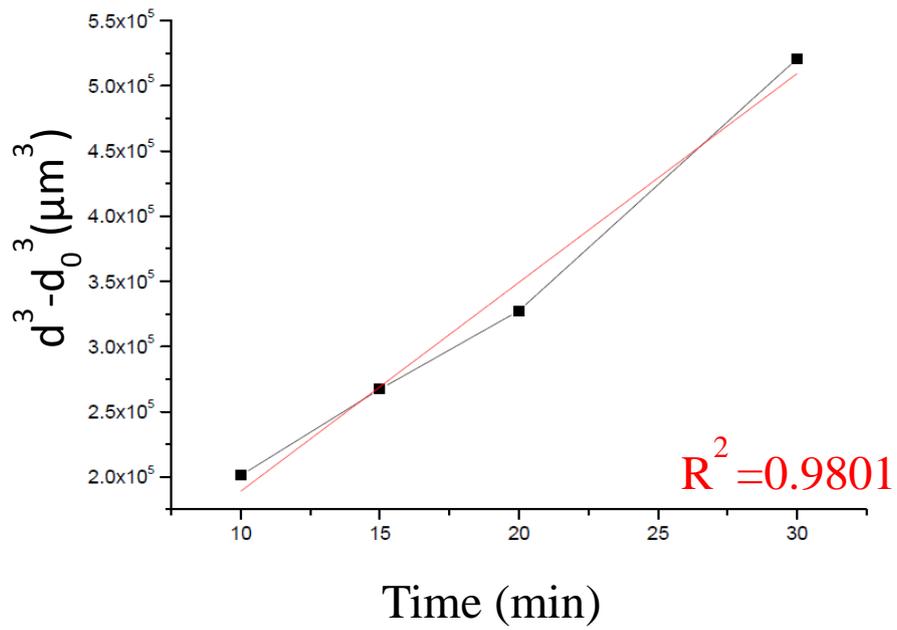


Figure 6.  $\Delta d^3$  與持溫時間關係圖

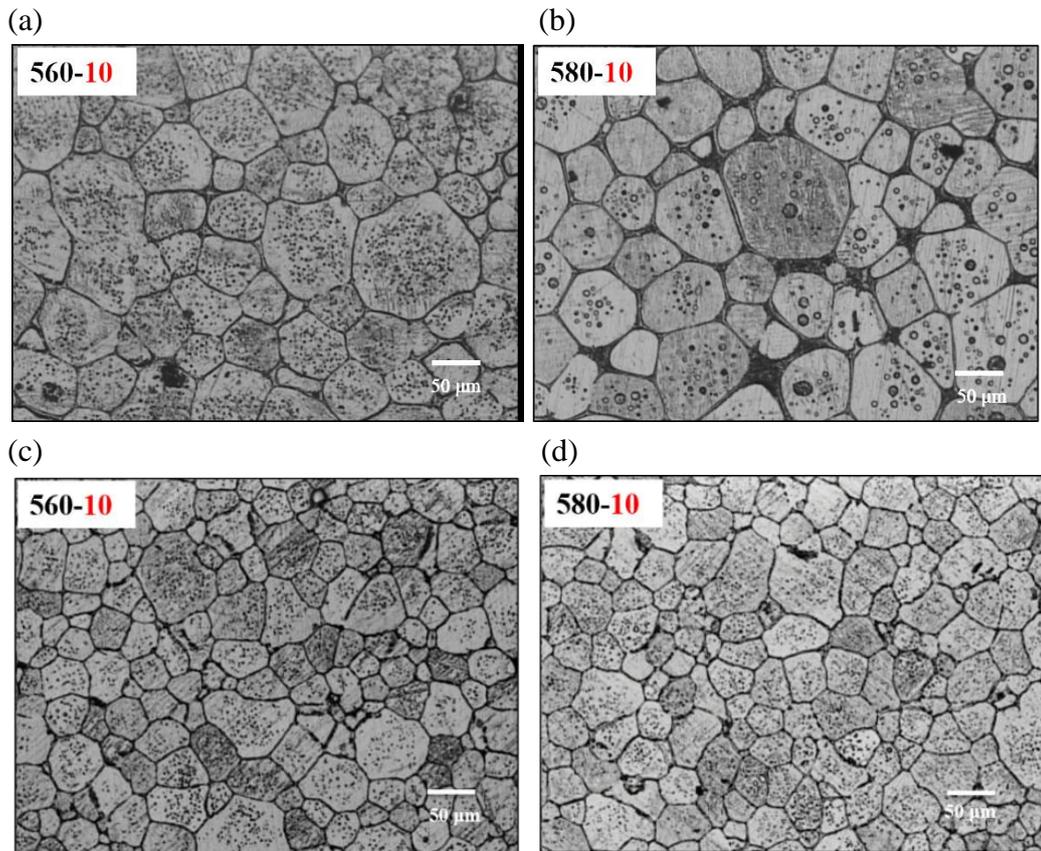


Figure 7. (a)EX3.6 材加熱 560°C 持溫 10 分 (b) EX3.6 材加熱 580°C 持溫 10 分  
(c)EX2.5 材加熱 560°C 持溫 10 分 (d) EX2.5 材加熱 580°C 持溫 10 分

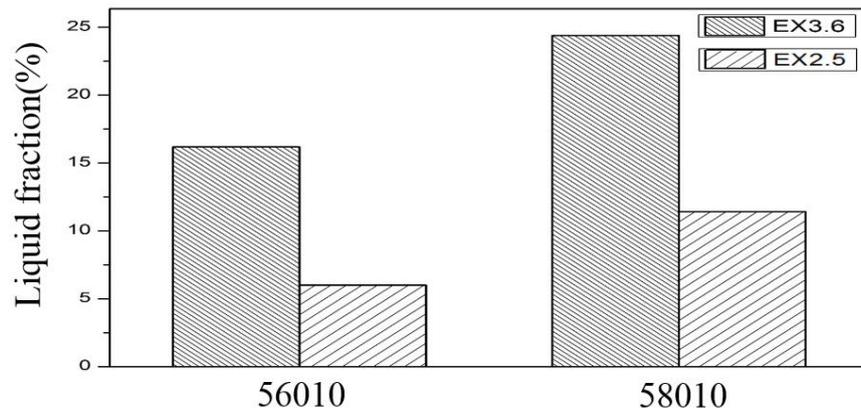


Figure 8. EX3.6 及 EX2.5 材 SIMA 處理後液相率比較圖

### 誌謝

感謝國科會計畫 102-2221-E-006-060-MY2 提供經費幫助研究