

6066及6061鋁合金時效處理之研究

A study on the aging treatment of 6066 and 6061 aluminum alloy

洪榮德¹ 吳灝展² 劉正賢² 林昆明³ 林新智^{2*}

Steven Hong H.C. Wu C.H. Liu K.M. Lin H.C. Lin

¹振鋒企業有限公司

²台灣大學材料科學與工程研究所

³逢甲大學材料科學與工程研究所

* 連絡作者 e-mail: hclinntu@ntu.edu.tw

摘要

本實驗主要以商用 6066 及 6061 鋁合金擠製棒材為主要材料，首先會將材料重新熔鑄，以了解材料原始特性的不同，之後將擠製棒利用 T6 時效方式，比較兩者的機械性質差異性，並利用光學顯微鏡、掃描式電子顯微鏡、XRD、DSC、穿透式電子顯微鏡等儀器，判斷經時效處理後所產生的微結構及析出物變化，藉此了解材料內部微結構及析出物對材料機械性質的影響。最後再利用旋鍛機進行冷鍛處理，以了解鋁合金冷鍛後對之微結構及機械性質的變化。

關鍵詞：6066 鋁合金、時效處理、機械性質、顯微組織

Abstract

The main topic of this research is to investigate the mechanical properties and microstructure between 6066 and 6061 commercial extruded bars by re-melt, cast, T6 treatment and cold forging. First, to investigate the original characteristics of these two alloys, we use TGA-DTA and SEM to observe these samples after re-melt and cast. Second, to compare and understand the effect of mechanical properties and microstructure by using OM, SEM, XRD, DSC, TEM after T6 treatment. Finally, to explore the change of their microstructure and mechanical properties after cold forging by using the rotary swaging machine and heat treatment.

一、前言

6系列鋁合金具質輕、比強度佳、耐蝕性高、價格低廉等，屬熱處理型鋁合金。6系列鋁合金的強化機制為時效硬化及固溶強化，藉此有效提高其強度，主要應用在汽車零組件、自行車結構件、傢俱用品上。其中6061由於價格較為低廉，

目前已被工業界廣泛使用，但其最大強度約只有300MPa左右，不及於強度最高之7系列鋁合金(例:7075-UTS: 600MPa)的一半；若改以6066，其強度會比6061高100MPa左右(例:6066-UTS: 400MPa)，而其價格卻與6061相當，因此工廠在考量材料成本與產品強度時，可改用6066作為6061的替代材料；但根據文獻[1-3]，6066因屬於含Cu量較高的Al-Mg-Si合金，在鑄造後會產生Q相(Al-Mg-Si-Cu)四元相化合物，此化合物因熔點較低，在固溶處理時會熔解並產生微孔洞，進而弱化6066的機械性質。

本實驗主要以6061與6066為主要研究材料，首先會對6066中的Q相進行探討，之後再對6066及6061的鋁合金擠製棒材進行時效處理，並比較兩者的機械性質及微結構的差異性；最後，為了解鋁合金擠製棒材進行冷鍛製程會對工件產生何種影響，我們利用旋鍛機進行冷鍛並配合T6處理以探討機械性質及微結構的改變。

二、實驗方法

Table 1 Chemical composition of 6066 and 6061

Sample 6061	成分規範%	試片成分%	Sample 6066	成分規範%	試片成分%
Al	Bal.	97.1678	Al	Bal.	95.8673
Si	0.4-0.8	0.5448	Si	0.9-1.8	1.0740
Fe	0.7max	0.2022	Fe	0.5max	0.1562
Cu	0.15-0.4	0.1636	Cu	0.7-1.2	0.7985
Mn	0.15	0.0829	Mn	0.6-1.1	0.8721
Mg	0.8-1.2	0.9286	Mg	0.8-1.4	1.0000
Cr	0.04-0.35	0.0846	Cr	0.4max	0.1279
Ni		0.0058	Ni		0.0065
Zn	0.25max	0.0314	Zn	0.25max	0.0718
Ti	0.15max	0.0269	Ti	0.2max	0.0277

6066 及 6061 的成分如 Table 1 所示。

本研究分為四個不同實驗如下所示：

實驗一：將兩種材料升溫 680℃ 重新熔融並鑄造，之後利用 SEM，DSC，XRD 以進行觀察，以了解兩種材料原始特性的差異。

實驗二：將兩種擠製棒材經由 530℃，90mins 的固溶處理後水淬，之後進行 175℃ 的時效處理，之後進行硬度及拉伸測試、XRD、OM、DSC、SEM 以了解顯微組織對機械性質的影響，其拉伸試片如 Fig1 所示。

實驗三：將 6061 及 6066 擠製棒先經過完全退火後，再利用旋鍛機進行冷鍛，之後施以 530℃，90mins 的固溶處理後水淬，並於 175℃ 時效處理，最後對其機械性質及微結構進行比較分析。

實驗四：將 6061 及 6066 擠製棒先進行 530℃，90mins 的固溶處理後水淬，再利用旋鍛機進行冷鍛，之後再進行 175℃ 時效處理。

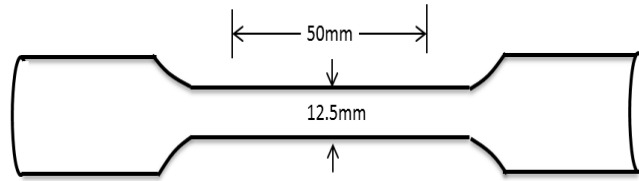


Fig 1 Size of a tensile specimen[4]

三、結果與討論

3-1鑄造材分析

將6066及6061重新熔鑄後，利用SEM觀察(Fig2)可發現6066會出現含Cu量高的Q相化合物，其大小約10-20 μm ，利用TGA分析(Fig3)可發現其起始融熔點約在540 $^{\circ}\text{C}$ 以下，但6061的鑄造材卻未觀察到此融熔點，顯示6061含Cu量低不會產生此化合物，若施以520 $^{\circ}\text{C}$ 及適當時間的均質化處理，則此融熔點會漸趨平緩，顯示Q相被有效地消除，藉此，其後續之固溶溫度便可有效提升至550 $^{\circ}\text{C}$ -560 $^{\circ}\text{C}$ ，以提升其固溶效果及後續的時效析出效果。

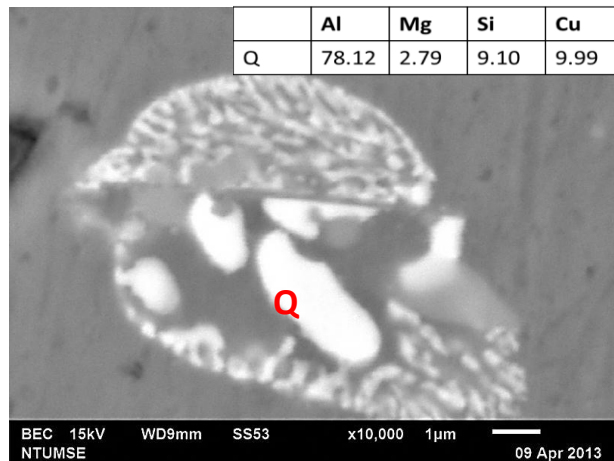


Fig 2 SEM image and EDS analysis of Q-phase in Al-6066.

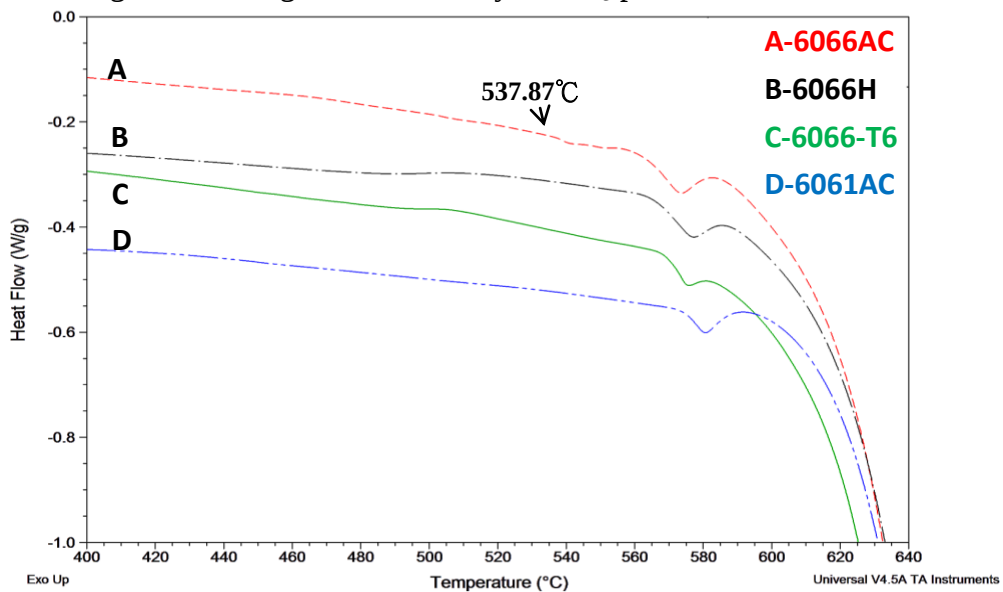


Fig 3 TGA curves for as cast, homogenization and T6 treatment of 6066 and 6061.

3-2時效處理分析

3-2-1 機械性質分析

6066及6061經時效處理過後所得到的機械性質如Fig4所示，可發現6061需要24小時才能達到時效尖峰，而其硬度最高約為HRF 95，最大抗拉強度及降伏強度則分別為353MPa與333MPa；相較於6061，6066只需要8-12小時就能達到時效尖峰，而其硬度卻可達到HRF 100以上，最大抗拉強度及降伏強度更可達到460MPa及422MPa，比6061高了近100MPa，而時效時間也縮短了12小時以上。

由成分分析可以發現，6066的合金元素含量會較6061多，因此會有較好的固溶效果及散佈強化效果，甚至是析出強化效果，進而有效提高其強度。

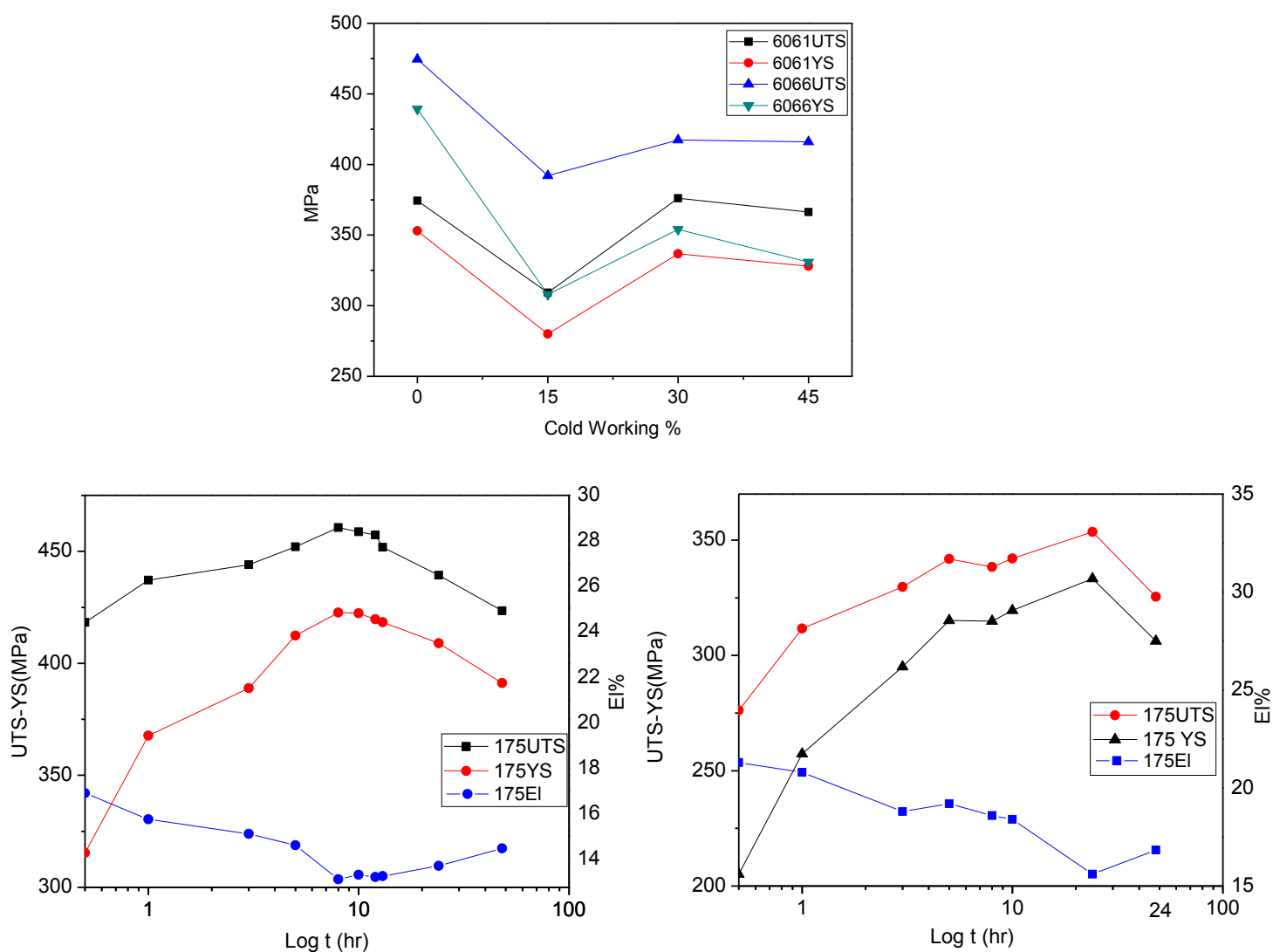


Fig 4 Mechanical properties of 6066 and 6061 after aging treatments (a)Hardness curve of 6066 and 6061, (b) Strength and Elongation curve of 6066, (c) Strength and Elongation curve of 6061.

3-2-2 微結構分析及觀察

利用SEM對6066及6061進行觀察可以發現(Fig5)，兩者都會散佈著 Mg_2Si 及 $Al(FeMn)Si$ 化合物，而6066的化合物會相對於6061來的粗大且數量較多，由此可知6066會有較好的散佈強化效果，其原因便如之前所提到，6066合金元素含量較高，因此可產生較大量的化合物。

再觀察DSC分析結果(Fig6)，可得到6061有幾個明顯的放熱區(析出峰)：A點(230°C-300°C)為 β'' 析出，隨溫度上升至B點(300°C-330°C)會析出 β' ，最後在C點(400°C以上)會析出最後穩定相 β ，由結果可發現GP-Zone的析出峰並不明顯。

若改觀察6066的析出峰，其析出流程為：在A點(50°C-100°C)會首先析出Si-cluster，當達B點(230°C-250°C)會析出 β'' ，C點(280°C-300°C)會析出 β' ，D點(350°C-400°C)會另外析出silicon相，最後在E點(450°C以上)會產生穩定相 β 。

將兩者進行比較可發現，6066會另外析出Si-cluster及silicon相，其主要是由於6066的Si含量較高，因此能額外產生這兩種高Si含量相；若再對兩者的析出溫度進行觀察，6066的析出峰溫度會相對於6061低溫，顯示6066的主要析出物會在較低溫就形成，因此會有較高的析出效率，由機械性質比較圖可知6066只需要8-12小時就能達到時效尖峰，但6061卻需24小時才能達到時效尖峰。

對6061及6066之T6處理試片進行TEM觀察(Fig7)，可發現到兩者基地內部皆含有大量的散佈顆粒，主要以矩形或長棒狀為主，大小約在200nm，成分為 $Al(Fe,Mn,Cr,Cu)Si$ ，此化合物也可在SEM中觀察到，但尺寸較粗大(約在1~2 μm)；對6066與6061進行比較，其形狀及大小並未有太大差別。

將6066倍率提高也可觀察到非常細小的針狀析出物 β'' ，與DSC之結果相符，此為時效尖峰的主要強化相。

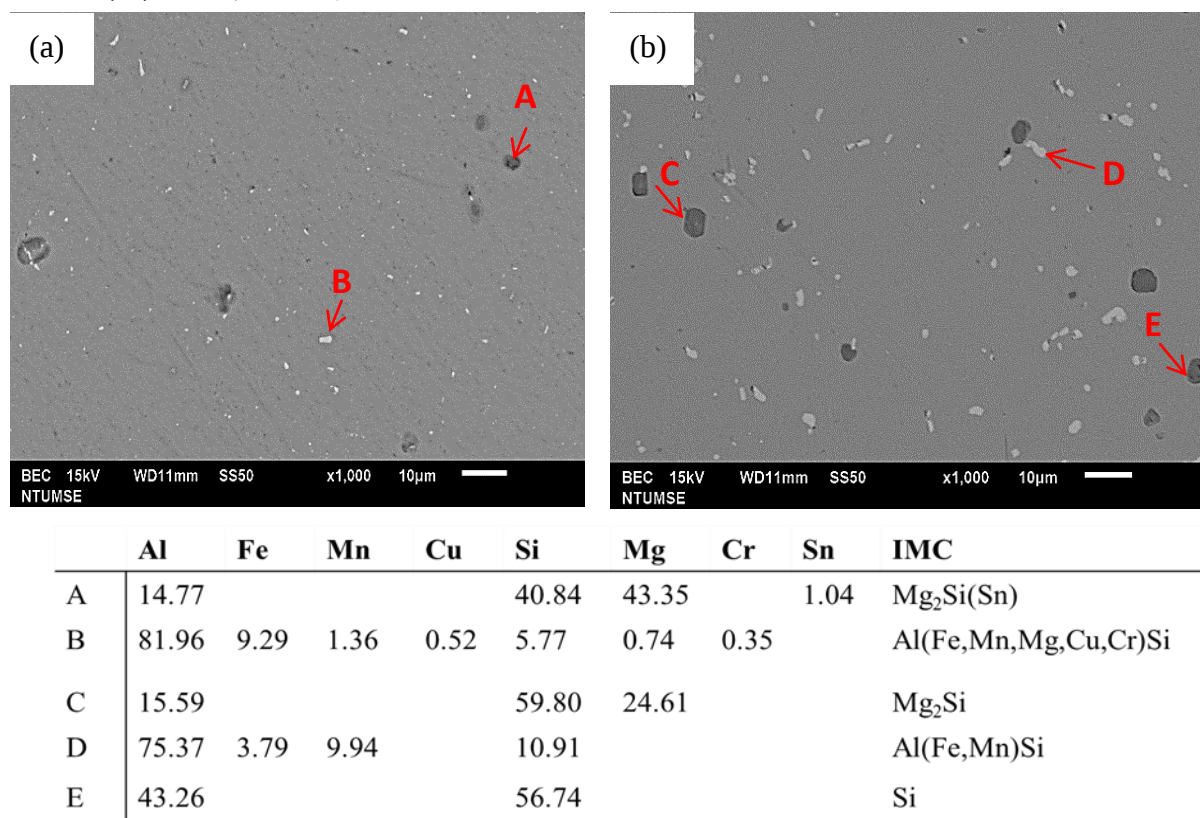


Fig 5 SEM images and EDS analysis of T6 treatment (a)6061, (b)6066.

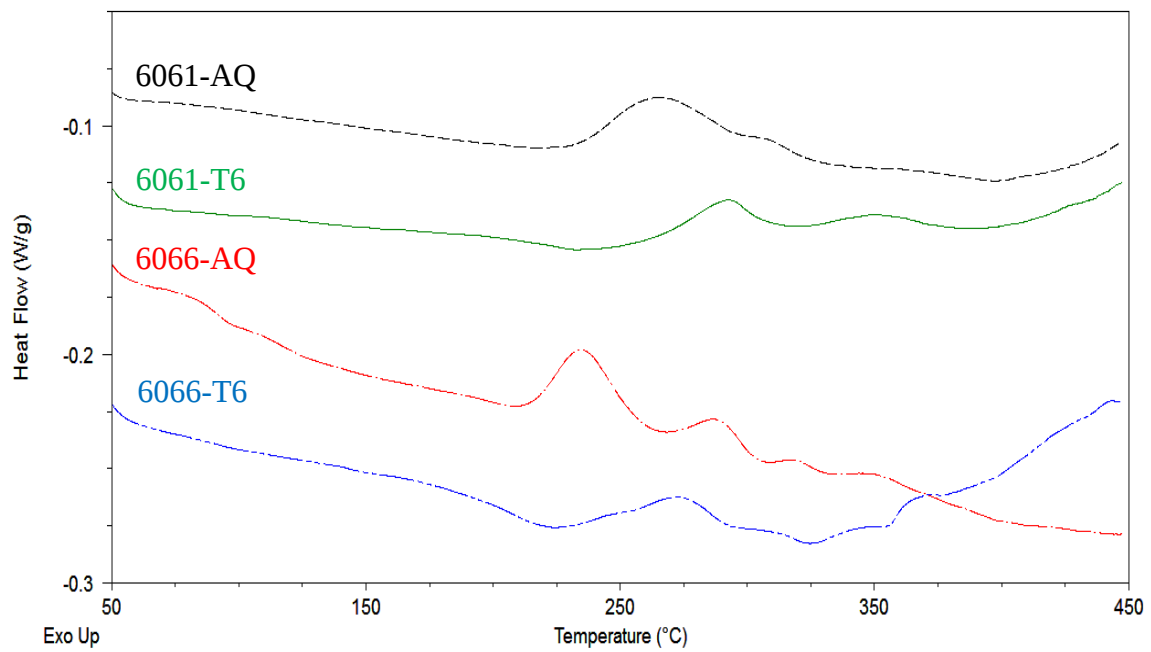


Fig 6 DSC curves for as cast and T6 treatment of 6066 and 6061.

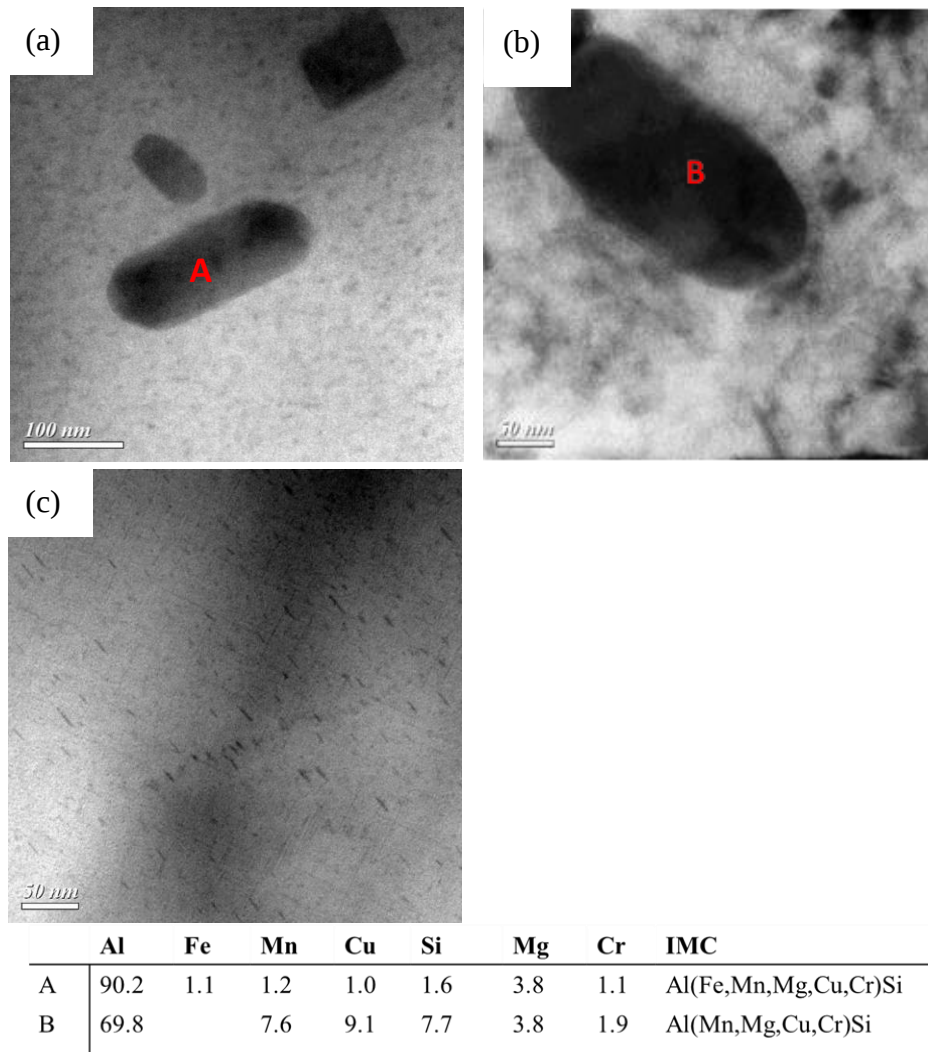


Fig 7 TEM images and EDS analysis of intermetallic compound (a) 6061, (b) 6066, (c) needle like precipitate of 6066 β'' phase.

3-3 旋鍛熱處理分析

將兩種鋁合金擠製棒材經常溫旋鍛後再做固溶淬火時效(Cold working and T6 treatment, CW-T6)，其剖面金相如 Fig 8 所示，經過不同鍛造加工量後再進行固溶處理會發生再結晶；晶粒大小隨著加工量不同而改變，當加工量 15 %產生再結晶成核晶粒少而成長較為粗大且保有原擠製方向性，加工量達 30 %時再結晶成核多，所得晶粒較為細小，擠製方向性會部分消除並轉變為等軸狀，但仍保有部分擠製方向性，當加工量達到 45 %時，6061 與 6066 之擠製方向性幾乎完全消除並呈等軸再結晶。。

由固溶淬火直接進行 DSC(Fig9)可觀察到 6061 及 6066 之析出放熱峰明顯的向低溫偏移，主要是因加工時所產生之差排可成為析出物之成核位子而使析出物成長較為快速，但對強度進行比較(Fig10b)，可發現不同加工量的強度都有明顯差異，但硬度卻無明顯改變(Fig10a)，由於硬度之變化與析出效應較相關，暗示著冷加工雖可加速析出，但對整體硬度及強度並未有明顯改變，而此時真正影響強度的主要是纖構變化；6066 及 6061 在 15 %加工量後 T6 之強度都會遠低於單純擠製材 T6 之強度，其中 6066 的抗拉強度更由 470MPa 降到了 390MPa，而降伏強度也從 439MPa 降至 309MPa，嚴重弱化其機械性質；由金相觀察可知此主要是由於擠製纖構方向性被破壞及晶粒粗大化所導致，隨著冷加工量增加至 30 %，晶粒愈趨細小而產生細晶強化，強度因而提高，當加工量提高至 45 %時，強度仍無法有效增加。

針對6066在旋鍛後再T6會因晶粒粗大及纖構遭到破壞而嚴重影響其強度，遂改以固溶後再旋鍛時效之T8處理，其金相如Fig11，其纖構組織因為鍛打更為緻密，並未因時效(175℃ -8hrs)而發生明顯再結晶，再對其機械性質進行比較(Fig12)，其硬度及強度皆會隨加工量增加而加大，在加工量45%時更可達到520 MPa的抗拉強度但伸長率會降低至12%，利用SEM對拉伸破斷面進行觀察(Fig13)，可發現相較於冷鍛後再T6之延性破斷面，經T8處理之破斷面之窩穴卻大量減少，甚至有脆性劈裂之情形，顯示6066經T8處理後已由原始之延性破裂轉換成脆性延性共存之破裂模式，進而嚴重降低其伸長率。

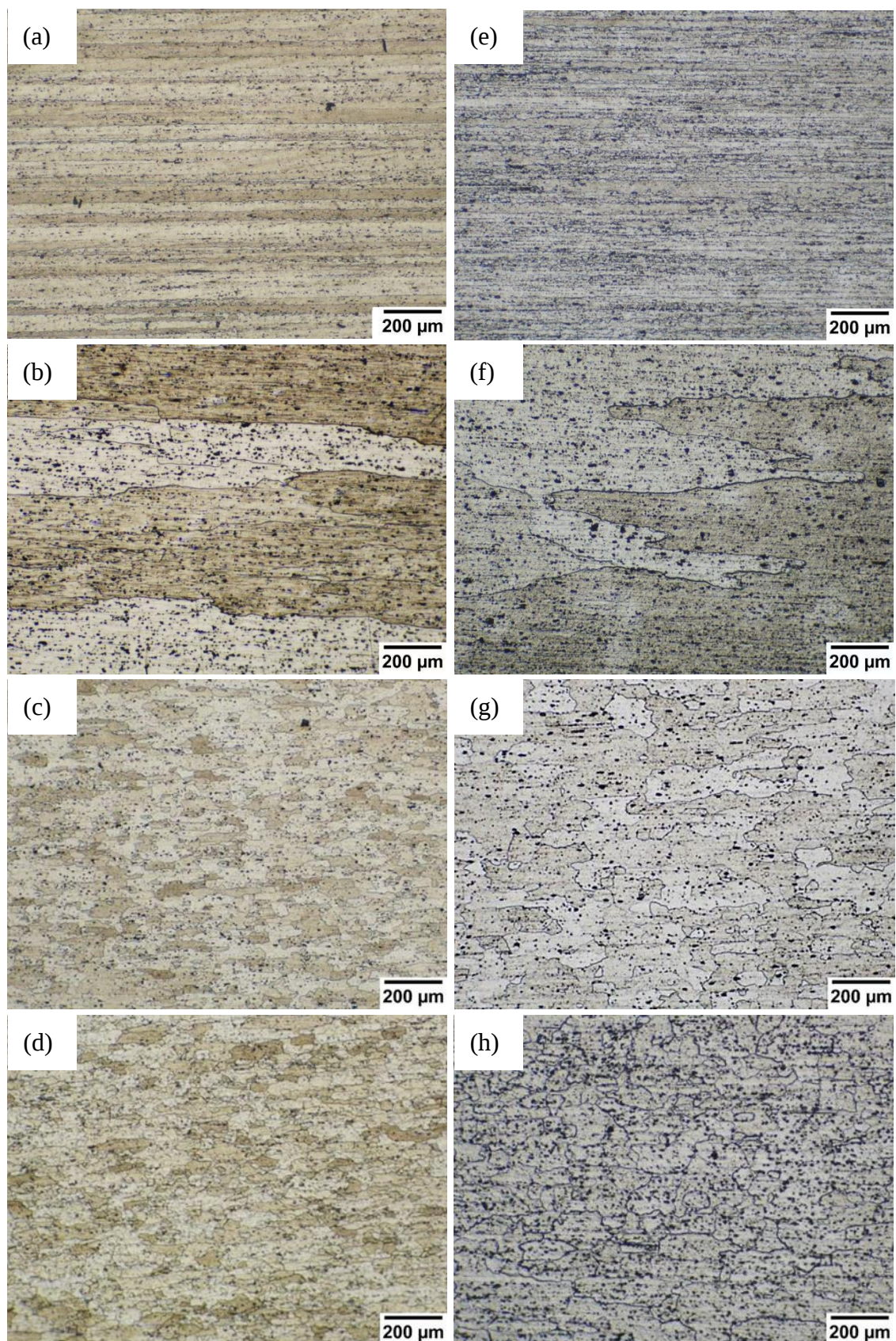


Fig 8 Microstructure of 6066 (a)extruded bar, (b)(c)(d)after 15%, 30%, 45% cold working; microstructure of 6061 (e)extruded bar, (f)(g)(h)after 15%, 30%, 45% cold working.

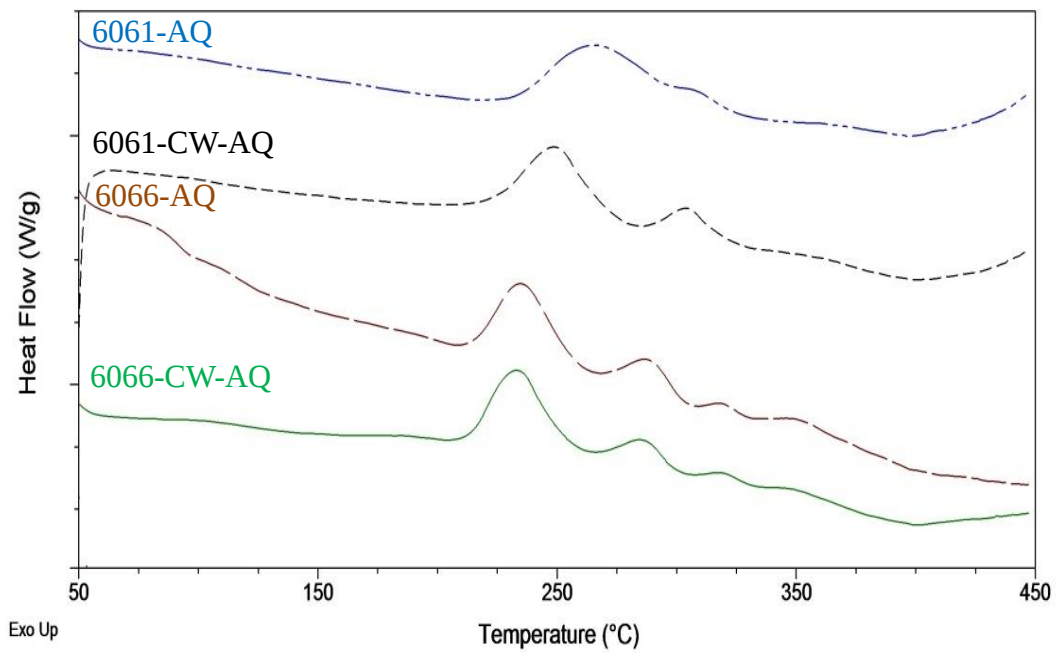


Fig 9 DSC curves for as cast and CW-AQ treatments of 6066 and 6061.

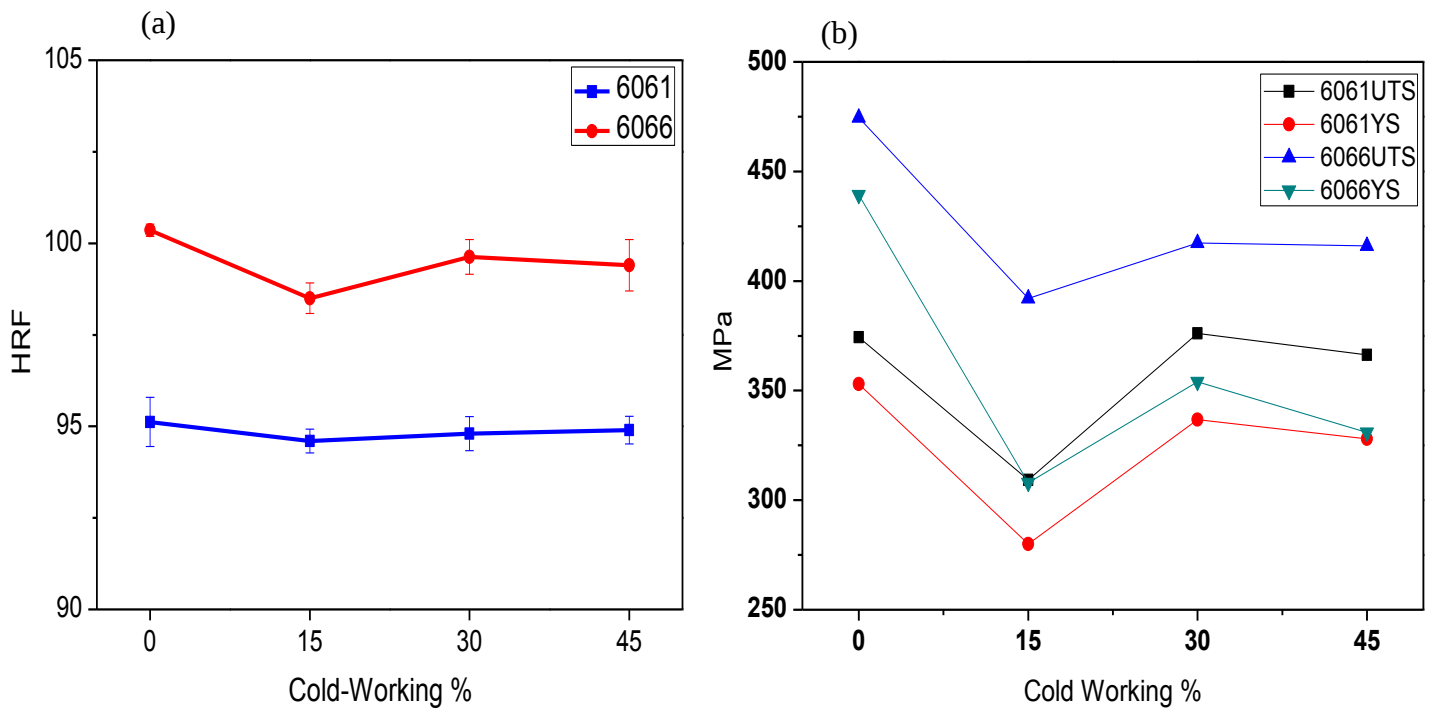


Fig 10 Mechanical properties of 6066 and 6061 after different cold working % and T6 treatment (a)hardness curves, (b) strength curves.

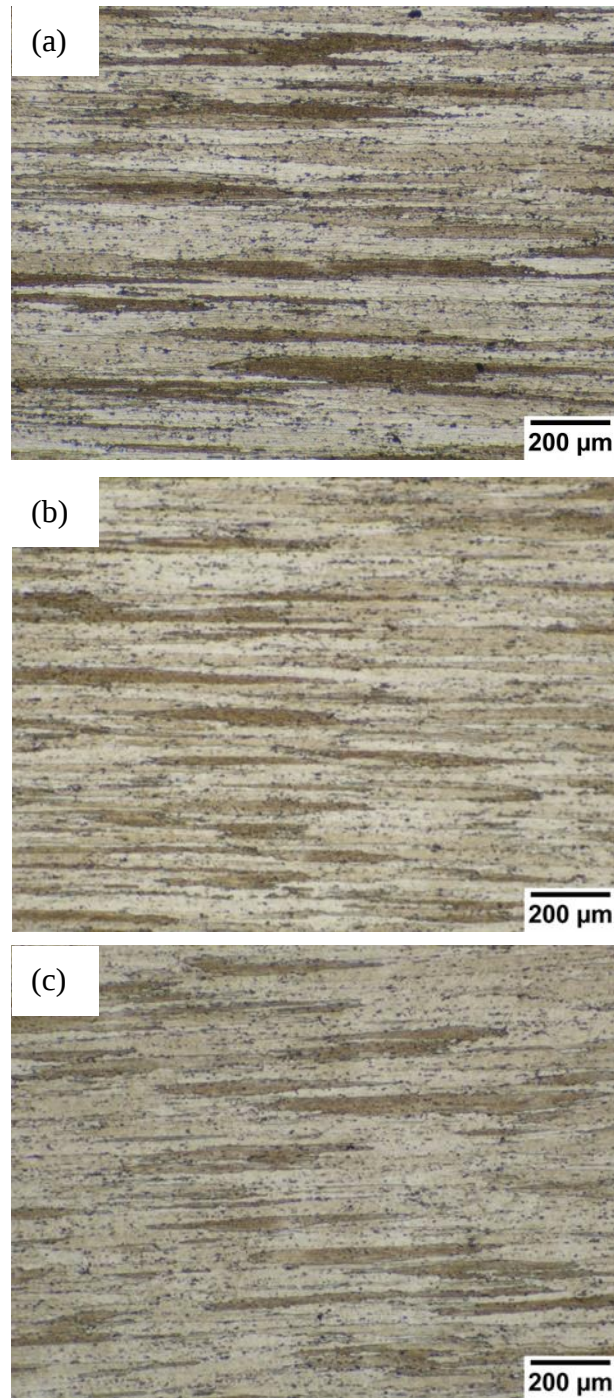


Fig 11 Microstructure of 6066 after T8 treatment with different cold working %
(a)15%, (b)30%, (c)45%.

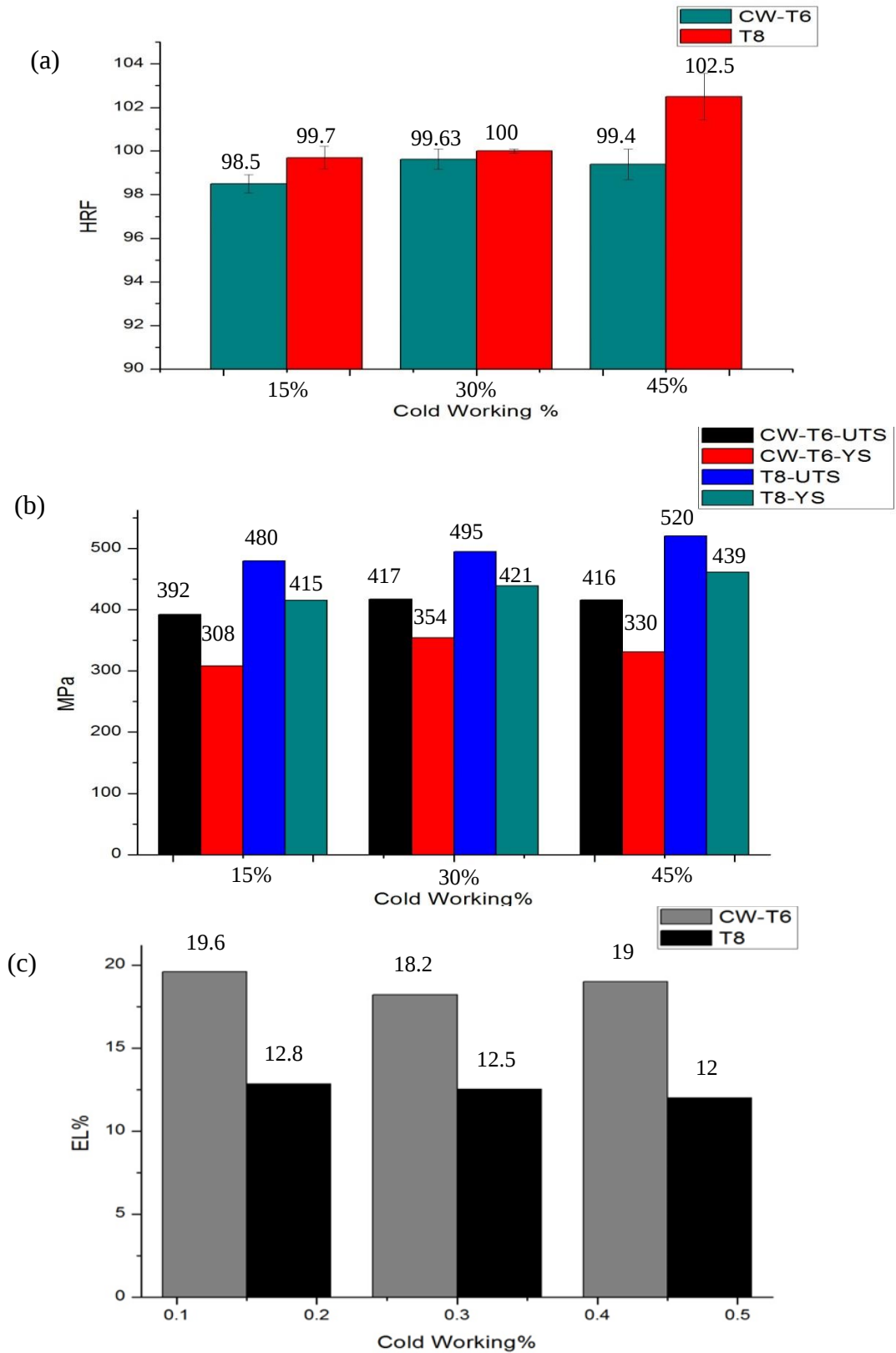


Fig 12 Mechanical properties of 6066 after heat treatments and forging processes
(a)hardness, (b)strength, (c)elongation.

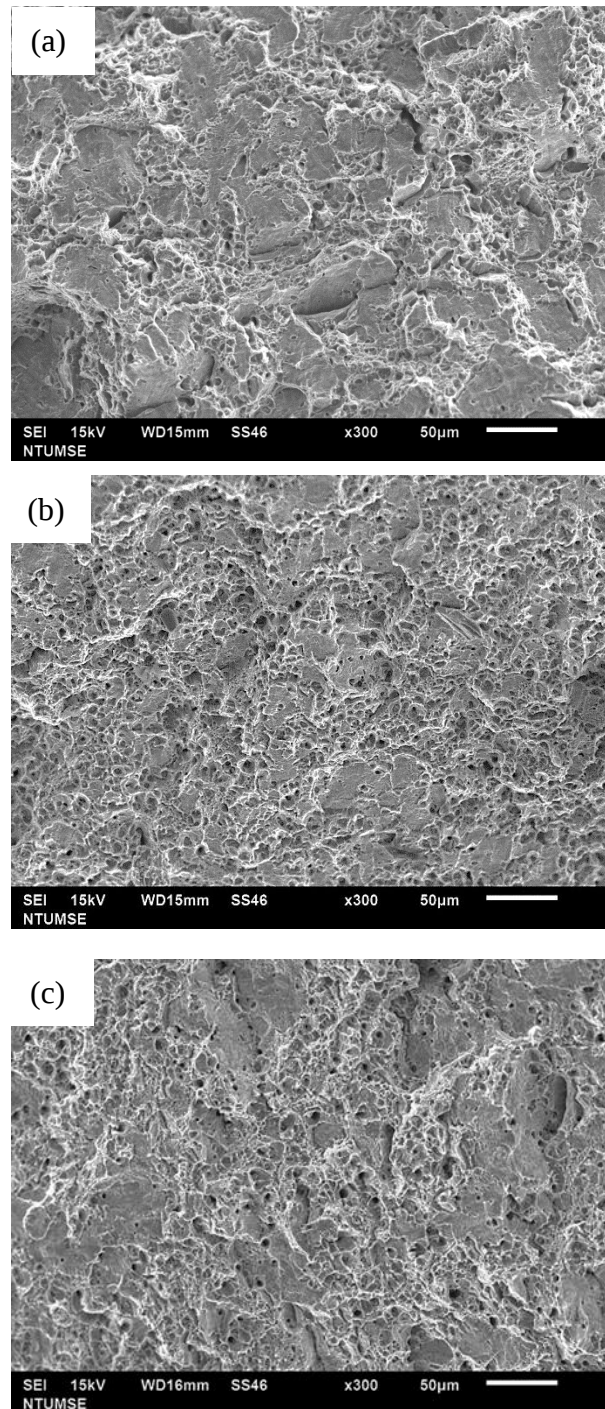


Fig 13 SEM fractographs of T8 treatments after different cold working % (a)15, (b)30, (c)45.

四、結論

1. 6066 含 Cu 量較高會產生 Q 相化合物，可利用適當之均質化處理消除此化合物，進而提高固溶溫度，以提升固溶強化及時效析出效果。
2. 6066 由於 Si 含量較 6061 來的多，DSC 分析後，析出物的析出峰都相對 6061 來的低溫，可較快成核成長，由時效曲線也顯示，6066 只需 8-12 小時便能達到時效尖峰，但 6061 卻需時效 24 小時才能達到時效尖峰。
3. 6066 因 Mn、Cr、Si、Cu 含量較 6061 高，可有較佳的固溶強化效果，也可形成較多且較粗大之介金屬化合物，有較佳的散布強化效果。
4. 對 6061、6066 個別進行冷鍛再 T6 處理，會因固溶而發生再結晶進而破壞原始組織，使強度下降。其中 6066 及 6061 加工量越大再結晶越小而產生細晶強化效果，使強度重新上升。
5. 若將 6066 改以 T8 處理，則其組織會更加緻密，強度也會隨著加工量越大而上升，甚至可達到 520MPa，但其破斷方式會由原本延性破裂轉變為脆性延性共存之破裂方式，其伸長率會降低至 12%。

參考文獻

1. 程文宗、呂傳盛、陳立輝，「Al-Mg-Si 鋁合金拉伸性質與可靠度之固溶化處理效應」，國立成功大學，(2010)
2. W.F. Miao , D.E. Laughlin ,”Effects of Cu Content and Preaging on Precipitation Characteristics in Aluminum Alloy 6022”, *Metallurgical and Materials Transactions A* ,vol. 31 , 361-371 (2000)
3. Man Jina, Jing Lib , Guangjie Shaoc ,”Study of Cu Addition on Precipitation Behaviors and Mechanical Properties in AA6082 Al-Mg-Si Alloy”, *Materials Science Forum* ,vol. 546-549, 825-828 (2007)
4. “Metals-Mechanical Testing; Elevated and Low Temperature Tests” , Section 3, Vol. 3 , ASTM , 132 (1998)
5. Evren Tan , Bilgehan Ogel, “Influence of Heat Treatment on the Mechanical Properties of AA6066 Alloy”, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol.31 , 53-60 (2007).
6. Yucel Birol, “The effect of sample preparation on the DSC analysis of 6061 alloy”, *Journal of Materials Science* ,vol. 40 , (2005).
7. I. Dutta , S. M. Allen , “A calorimetric study of precipitation in commercial aluminium alloy 6061” , *Journal of Materials Science* , vol.10 (1991), pp323-326
8. L. Zhen, W. D. Fei, S. V. Kang, H. W. Kim , “Precipitation behaviour of Al-Mg-Si alloys with high silicon content” , *Journal of Material Science* , vol. 32, 1895-1902 (1997).