

# 鋁合金內添加微量分散相合金元素對強度之提升效果

## The Effects of Dispersoid-forming Elements on the Mechanical Properties of Al Alloys

彭駿傑<sup>1\*</sup>、鄭仲凱<sup>1</sup>、楊智富<sup>1</sup>

C. C. Peng<sup>1\*</sup>, Z. K. Zheng<sup>1</sup>, C. F. Yang<sup>1</sup>

大同大學材料工程學系

### 摘要

本研究於 7050 合金內添加 Mn、Zr、Sc 等過渡金屬(TM)元素，探討在不同之展伸材製程處理下，合金內 Al-TM 介金屬分散相粒子(Dispersoids)之析出反應特性，及其對合金微觀組織及機械性質之影響，並釐清能使分散相充分發揮提升機械性質效果之適當製程條件。藉由光學顯微鏡(OM)觀察微觀組織，以及使用洛氏硬度機及拉伸試驗機來探討分散相元素及分散相析出反應對 7050 鋁合金之機械性質影響。

實驗結果顯示，添加 Mn 及 Zr 分散相元素之 7050Mn 及 7050Zr 鋁合金需經一「分散相析出處理(300°C/12 h + 470°C/12 h)」，方能有效的析出 Al<sub>6</sub>Mn 及 Al<sub>3</sub>Zr 分散相，產生增加拉伸強度之效果；其 7050Mn 及 7050Zr 鋁合金之 T6 抗拉強度分別為 583 及 585 MPa，較 7050 鋁合金者(543 MPa)分別高出 40 及 42 MPa。而添加 Sc 分散相元素之 7050Sc 鋁合金則是不經過「分散相析出處理」之製程條件下，其 Al<sub>3</sub>Sc 分散相顆粒能提升機械性質，其 T6 抗拉強度為 591 MPa，但若經「分散相析出處理」則會造成 Al<sub>3</sub>Sc 分散相過時效粗大化，造成機械性質下降，此時 T6 抗拉強度下降至 573 MPa。至於複合添加 Zr、Sc、Mn 分散相元素之 7050X 合金，因其複合分散相析出效應，在不經「分散相析出處理」之製程條件下，具有最高之抗拉強度，其 T6 抗拉強度高達 643 MPa。

**關鍵字：**分散相元素、抗拉強度、Al<sub>3</sub>Sc、Al<sub>6</sub>Mn、Al<sub>3</sub>Zr

### Abstract

In this study transition metals of Mn, Zr and Sc were added into a 7050 Al alloy for the study of effects of Al-TM compound dispersoids on microstructure, mechanical properties of 7050 Al alloy which has been subjected to under a couple of wrought alloy processing routes. In addition, the proper process conditions for

various Al-TM dispersoids to exhibit their best functions on improving mechanical properties of the 7050 Al alloy were identified. The microstructure of the heat-treated 7050 Al alloys containing various dispersoid-forming elements were examined by using OM. The effect dispersoid-forming elements and the precipitation reaction of Al-TM dispersoids on the mechanical properties of 7050 Al alloy were studied by using Rockwell hardness tester and tensile test.

The results showed that the precipitations of Al<sub>6</sub>Mn and Al<sub>3</sub>Zr dispersoids in 7050Mn (with addition of Mn) and the 7050Zr (with addition of Zr) alloys, through a special thermal (2-step dispersoid precipitation of 300°C/12h + 470°C/12h) and hot rolling processing route, exhibit proper results in terms of high tensile strength. Through the special 2-step dispersoid precipitation the 7050Mn and 7050Zr alloys exhibit excellent T6 tensile strengths of 583 and 585 MPa, respectively, which are 40 and 42 MPa in magnitude greater than that of 7050 Al alloy (543 MPa). On the other hand, the 7050Sc (with addition of Zr) would precipitate Al<sub>3</sub>Sc dispersoid properly through the other type of wrought alloy processing route, which is without the 2-step dispersoid precipitation. This type of processing rendered the 7050Sc alloy with proper high tensile strength up to 591 MPa. But if the 7050Sc alloy was processed with the 2-step dispersoid precipitation, its mechanical properties would drop significantly; the T6 tensile strength dropped to 573 MPa. As for the 7050X (multi-addition of Mn, Zr and Sc) alloy, with composite Al-TM dispersoids the alloy exhibit the best tensile strength (up to 643 MPa in T6 condition) under a wrought alloy processing route without 2-step dispersoid precipitation.

**Keywords :** Dispersoid-forming elements 、Tensile strength、Al<sub>3</sub>Sc、Al<sub>6</sub>Mn、Al<sub>3</sub>Zr

## 1. 前言

7000 系列(Al-Zn-Mg)鋁合金是鋁合金中開發較晚的合金，但也是各系列中強度最高的合金。自 1943 年美國首次開發出可實際應用的 7075 鋁合金以來，世界各國都加強了對 7000 系列鋁合金的研究，包括提高 Zn、Mg 及 Cu 的含量，提高 Zn 與 Mg 的比值，降低 Fe 和 Si 雜質含量，以及添加微量合金元素。7050 鋁合金是由 ALCOA 公司所研製具有高強度、優異斷裂韌性和抗應力腐蝕性能的合金，且擁有良好的抗焊火敏感性，可以製備厚度較大的板材，已廣泛運用在航太材料，主要用作飛機框架及機翼等<sup>[1-3]</sup>。

商業應用上經常會在 7000 系列(Al-Zn-Mg)鋁合金內添加可形成分散相之過渡金屬(TM)元素(例如 Mn、Zr、Cr)，添加這些分散相元素主要功效為避免合金在熱加工及高溫熱處理時發生晶粒過度成長，具有細化展伸材鋁合金晶粒之效果。但不同 Al-TM 系統所產生分散相之析出行為與效益，一直以來未像 2000、6000 及 7000 系列之析出行為被充分探討，並整理出像 T6、T7 般之熱處理規範。由於分散相之析出行為深受熱處理之溫度與時間之影響，不同條件之熱處理製程對分散相之生成與粗大化具有重大之影響，若在製程上未加以控制，則含分散相元素鋁合金之機械性質將有顯著變異性。本研究於 7050 合金添加 Mn、Zr、Sc 等分散相元素，藉由兩種不同之展伸材製程，探討分散相元素及分散相析出行為對 7050 鋁合金機械性質之影響，並釐清能使分散相充分發揮效果之適當製程條件。

## 2. 實驗方法

### 2.1 合金熔煉與材料製備

為了使研究較為單純且具有比較性，本研究選用自配不含 Zr 元素之 7050 鋁合金作為參考組。本研究於 7050 鋁合金內以分別添加及複合添加 Mn、Zr、Sc 等分散相元素之方式，製備含不同分散相合金元素之 7050 鋁合金包括：7050 鋁合金(代號 7050)，含

0.4%Mn 之 7050 鋁合金(代號 7050Mn)、含 0.2%Zr 之 7050 鋁合金(代號 7050Zr)、含 0.2%Sc 之 7050 鋁合金(代號 7050Sc)、含 0.2%Zr、0.2%Sc、0.4%Mn 之 7050 鋁合金(代號 7050X)。合金鑄造過程簡述於後。首先秤取適量之純鋁(99.99%純度)、純鋅(99.99%純度)、純銅(99.9%純度)、純鎂(99.9%純度)以及含有分散相合金元素之母合金(Al-15wt.% Zr、Al-2wt.% Sc 及 Al-60wt.% Mn)，將純鋁、純銅及含分散相元素之母合金置入電熱坩鍋熔爐熔煉。熔煉溫度約 850°C，待其熔解為液態後，再加入純鋅及純鎂，待全部熔融後略作攪拌，之後快速澆鑄於模具內並再鑄錠收縮後(約 5~10 秒)水淬，避免高溫分散相在冷卻時大量晶出。鑄錠尺寸約長 150 mm 寬 70 mm 高 10 mm。

澆鑄後之鑄錠分別進行二種不同之展伸材製程，一為不作高溫分散相析出處理，直接熱軋軋；另一為先作高溫分散相析出處理再作熱軋軋。而熱軋軋加工是先將厚度約為 10 mm 之合金置於 500°C 之空氣爐內 15 分鐘，再施予熱間軋軋，軋軋速度約為 200 mm/s，每一道軋軋板材厚度減縮量約 0.5 mm，軋軋後將合金板料回爐加溫 2 分鐘，以維持合金於適當之高溫狀態，如此熱軋軋之步驟持續至總縮減量達到 80% 以上(試片厚度為 2 mm)。經上述步驟，使合金變成組成均勻之片狀展伸材；軋軋後之片材經裁切適當尺寸後製成拉伸試片及硬度試片，之後進行 T6 處理及機械性質分析。

### 2.2 熱處理

本研究之高溫分散相析出處理乃是對含不同分散相元素之 7050 鋁合金進行兩階段之分散相析出處理，第一階段先將合金鑄錠置於 300°C 之空氣爐內持溫 12 小時，第二階段再將合金鑄錠由 300°C 之空氣爐內轉移至 470°C 之空氣爐內持溫 12 小時；此二階段熱處理之目的乃是使合金在第一階段時發生成核反應，產生大量細密的分散相成核點，而第二階段則是使高溫分散相得以成長至適當尺寸，達到分散強化的效果。

在含分散相合金元素之 7050 鋁合金不僅可藉由高溫(300~480°C)分散相處理來產生分散相還可藉由 T6 熱處理(480°C 固溶、淬水及約 120°C 人工時效)析出

MgZn<sub>2</sub>，獲致析出強化；本實驗將兩種不同展伸材製程之 7050 系列之展伸材鋁合金試片於空氣爐進行固溶處理，固溶處理條件為 480°C/1 h，水淬後於油浴爐進行 120°C 時效處理獲得時效硬度曲線，並得知頂時效發生在 120°C/24 h，因此後續拉伸性質之試片取 120°C/24 h 之時效處理。

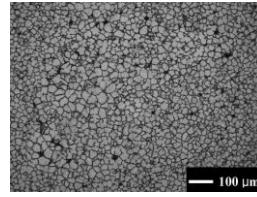
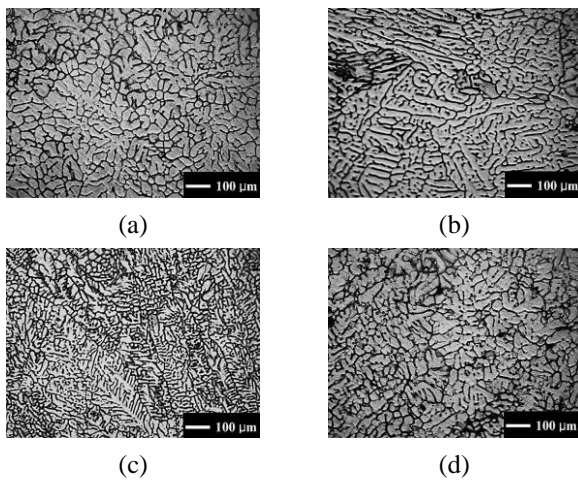
### 2.3 拉伸試驗

將含有分散相合金元素之 7050 展伸材鋁合金經飛輪式高速沖壓機沖成拉伸試片後，進行室溫拉伸性質測試。所使用之拉伸設備為 Hung-Ta HT 8150 拉伸試驗機，拉伸速率為 1 mm / 1 min，初始應變速率為  $1.667 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。

## 3. 結果與討論

### 3.1 五種 7050 系列合金之微觀組織

圖 3.1 (a) - (e) 分別為 7050、7050Mn、7050Zr、7050Sc 及 7050X 鋁合金之鑄件微觀組織圖，其皆為典型的樹枝狀結構，由初晶 pri- $\alpha$  及共晶  $\alpha + \beta$  組織所構成。仔細比對這五種合金之金相組織可發現，添加 Zr 之 7050Zr 及添加 Mn、Zr 及 Sc 之 7050X 合金鑄造組織內 pri- $\alpha$  較為細密，其原因應與 Al<sub>3</sub>Zr 之晶出有關。根據 Al-Zr 二元相圖得知，添加 Zr 元素之合金在鋁湯冷凝過程中，在約 740°C 時會先在鋁湯中晶出 Al<sub>3</sub>Zr，此 Al<sub>3</sub>Zr 粒子可作為  $\alpha$ -Al 的異質成核點，促使鋁合金鑄件之 pri- $\alpha$  晶粒細化，五種 7050 系列鑄造組之中以 7050X 具有最明顯之細化晶粒效果。



(e)

圖 3.1 五種 7050 系列鋁合金之鑄態金相組織；(a)

7050、(b) 7050Mn、(c) 7050Zr、(d) 7050Sc 及 (e) 7050X。

圖 3.2 (a) - (e) 為鑄錠經分散相析出處理 (300°C/12 h + 470°C/12 h) 後水淬之金相圖，由圖可發現柱狀晶間的富銅 Al-Zn-Mg 相已經有相當程度的重溶回  $\alpha$  相基地內，換句話說，此分散相析出處理亦能促使合金具有均質化 (Homogenization) 效果；此乃由於高溫狀態下溶質原子較易擴散，促使柱狀晶間之高濃度溶質原子向低濃度之鋁基地內擴散，因而可觀察到高溫分散相析出處理/均質化處理後柱狀晶間之富銅相已大量減少。

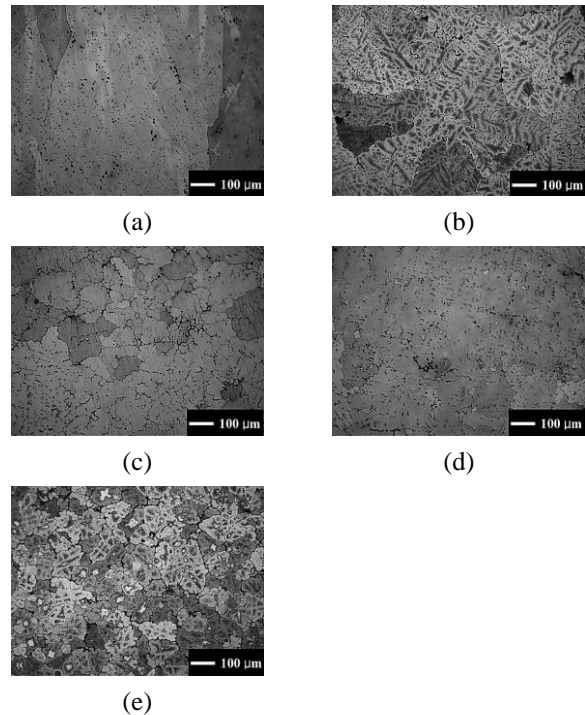


圖 3.2 五種 7050 系列鋁合金鑄錠經分散相析出處理後之金相組織；(a) 7050-H、(b) 7050Mn-H、(c) 7050Zr-H、(d) 7050Sc-H 及 (e) 7050X-H。

### 3.2 五種 7050 系列合金鑄錠之一階段及兩階段分散相析出時效硬度分析

圖 3.3 為 7050、7050Mn、7050Zr、7050Sc 及 7050X 鋁合金鑄錠經單一階段 300°C 分散相析出處理之時效曲線圖，可以發現經過一階段 300°C 時效，7050 合金鑄錠硬度隨著時效時間增長而下降，經 48 小時時效後，其硬度由鑄造狀態(As cast)之 56 HRF 下降至約 20 HRF，推斷造成合金硬度下降之原因有兩項，主要為鑄件內析出強化相(MgZn<sub>2</sub>)發生過時效軟化，此乃因鑄件在冷凝過程中及在室溫時效階段的析出強化相(MgZn<sub>2</sub>)在 300°C 持溫時發生過時效軟化現象，導致硬度持續下降。另一項可能原因為鑄件內殘留應力之消除，此乃因合金在鑄造時為不平衡凝固，會殘留大量內應力(硬度較高)，但隨鑄件溫度升高，退火效應使得殘留應力得以消除(硬度下降)。7050Mn 及 7050Zr 兩合金 300°C 之時效硬度曲線之變化趨勢與 7050 者相似，其硬度變化都是隨著時效時間之增長而下降。經過 300°C/12 h 分散相析出處理後，7050、7050Mn 及 7050Zr 合金之硬度分別為 23、41、及 32 HRF。至於 7050Sc 及 7050X 合金則因在 300°C 時效期間發生 Al<sub>3</sub>Sc 及 Al<sub>3</sub>(Sc<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>)之析出硬化，因此其硬度在析出初期(1 小時內)而合金硬度呈現上升趨勢，而後在時效 1~12 小時期間硬度維持在頂時效平台，經 300°C/12 h 分散相析出處理後，7050Sc 及 7050X 之硬度分別為 73 及 80 HRF。根據學長葉秉洋<sup>[4]</sup>研究顯示，Al-Sc 二元合金在 300°C 進行時效就會有 Al<sub>3</sub>Sc 分散相析出，在這裡可以推斷合金硬度隨時間上升為 Al<sub>3</sub>Sc 分散相析出硬化效果；在 7050X 合金鑄錠方面，Al<sub>3</sub>(Sc<sub>1-x</sub>Zr<sub>x</sub>)之析出反應，亦能使合金出現明顯的分散相析出之強化效果。

圖 3.4 為上述五種 7050 系列合金鑄錠經二階段分散相析出處理(300°C/12 h + 470°C/12 h)之複合時效曲線圖，各合金先經第一階段 300°C 時效 12 小時後，移至 470°C 爐內進行第二階段之 470°C 時效。由圖 4.25 可發現，各合金在第二階段時效一小時內，其硬度值均有明顯變化；其中 7050 合金之硬度值由 23 HRF 增加到 40 HRF，約增加 17 HRF，此硬度變化主要係因

析出相重溶回基地所造成固溶強化所引起。而 7050Mn 及 7050Zr 於第二階段 470°C 時效 1 小時亦發生類似固溶強化效果，但此兩合金在此溫度時效各會產生 Al<sub>6</sub>Mn 及 Al<sub>3</sub>Zr 分散相之析出硬化效果，故硬度增加之效果較 7050 合金者更為顯著。

至於 7050Sc 合金則呈現極不相同之硬度變化，其硬度由第一階段 300°C 時效 12 小時後之 73 HRF 驟降至 55 HRF，顯然在第一階段所產生細密 Al<sub>3</sub>Sc 分散相，在第二階段 470°C 時效 1 小時內造成粗大化，並造成顯著的過時效軟化現象，此時 7050Sc 合金之硬度已下降至與 7050 合金者相近，表示此時之 Al<sub>3</sub>Sc 之析出硬化效果幾乎完全喪失。至於 7050X 合金，雖然所含之 Sc 元素/Al<sub>3</sub>Sc 分散相會發生軟化現象，但因同時含有 Mn、Zr 等分散相元素，故經第二階段 470°C 時效 1 小時其硬度仍持續增加。五種 7050 系列鋁合金第二階段後續 1~12 小時之分散相析出處理過程中，硬度雖有不同之變化，但變化幅度已不像第一小時般的劇烈變化。其中 7050 合金硬度隨第二階段時效時間之增加呈現略微下降趨勢，而 7050Mn 及 7050Zr 合金則呈現略微上升趨勢；7050Sc 及 7050X 合金則沒有明顯變化。

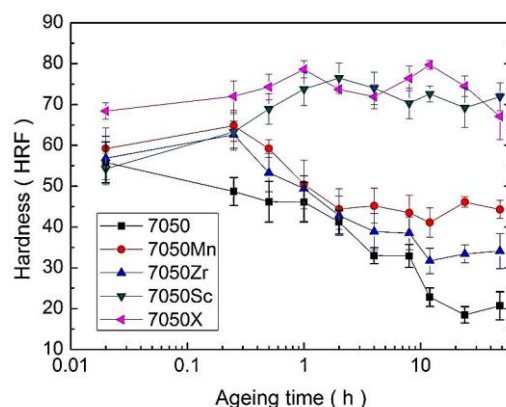


圖 3.3 五種 7050 系列鋁合金鑄錠經單一階段 300°C 分散相析出處理之時效曲線圖

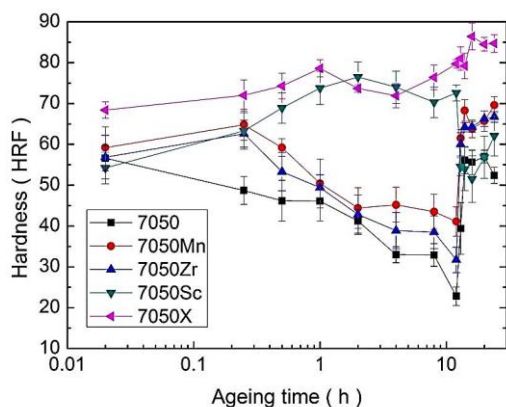


圖 3.4 五種 7050 系列合金鑄錠經二階段分散相析出處理(300 °C/12 h + 470°C/12 h)之複合時效曲線圖

### 3.3 五種 7050 系列合金之拉伸性質

由於表 3.1 及 3.2 分別為未經分散相析出處理及有經分散相析出處理之 7050 系列展伸材合金，於 480°C 固溶處理 1 小時並水淬(As Solution-treated 狀態)後之降伏強度、抗拉強度與延伸率數據表。

在由表 4.1 可知，未經分散相析出處理之 7050、7050Mn、7050Zr、7050Sc 及 7050X 展伸材

之降伏強度、抗拉強度及延伸率分別為 149 MPa、297 MPa 及 51 %；181 MPa、351 MPa 及 39 %；182 MPa、336 MPa 及 37 %；200 MPa、359 MPa 及 34 %；287 MPa、434 MPa 及 24 %。若以 7050 展伸材作為比較基準，則 7050Mn、7050Zr、7050Sc 及 7050X 之抗拉強度較 7050 展伸材者分別提升 54 MPa (18%)、39 MPa (13%)、62 MPa (21%)及 137 MPa (46%)，此顯示在 As Solution-treated 狀態下，分散相元素中以 Sc 對 7050 合金抗拉強度之增加較具效果，而添加複合分散相元素者則能造成加乘之分散強化及細晶強化。

至於有經分散相析出處理之展伸材，在 As Solution-treated 狀態下，7050-H、7050Mn-H、7050Zr-H、7050Sc-H 及 7050X-H 合金之降伏強度、抗拉強度及延伸率分別為 150 MPa、302 MPa 及 53 %；190 MPa、364 MPa 及 42 %；197 MPa、351 MPa 及 44 %；174 MPa、339 MPa 及 44 %；281 MPa、418 MPa 及 22 %。以 7050-H 展伸材作為比較基準，則

7050Mn-H、7050Zr-H、7050Sc-H 及 7050X-H 之抗拉強度較 7050 展伸材者分別提升 62 MPa (20%)、49 MPa (16%)、37 MPa (13%)及 116 MPa (38%)。此顯示經分散相析出處理後，Al<sub>3</sub>Sc 之分散強化效果已大幅下降，相對的 Al<sub>6</sub>Mn 及 Al<sub>3</sub>Zr 之分散強化效果開始展現，而含複合分散相元素之 7050X 合金則較添加單一分散相元素者呈現較大之強度增幅。

表 3.3 及 3.4 分別為未經分散相析出處理及有經分散相析出處理之 7050 系列展伸材合金，於 T6 頂時效狀態下之降伏強度、抗拉強度與延伸率數據表。

在未經分散相析出處理，各合金經 T6 時效後之降伏強度、抗拉強度及延伸率分別為 507 MPa、544 MPa 及 12 %；544 MPa、573 MPa 及 10 %；538 MPa、561 MPa 及 9 %；566 MPa、591 MPa 及 13 %；627 MPa、643 MPa 及 8 %。以 7050 展伸材作為比較基準，則 7050Mn、7050Zr、7050Sc 及 7050X 之抗拉強度較 7050 展伸材者分別提升 17 MPa (3%)、29 MPa (5%)、47 MPa (8%) 及 99 MPa (18%)。此顯示在 T6 頂時效狀態下，分散相元素中 Sc 對 7050 合金抗拉強度之增加較具效果，至於 Mn、Zr 分散相元素則較不明顯，而添加複合分散相元素者具有最佳加乘之分散強化及細晶強化。

有經分散相析出處理，各合金經 T6 時效後之降伏強度、抗拉強度及延伸率分別為 504 MPa、543 MPa 及 18 %；543 MPa、583 MPa 及 11 %；557 MPa、585 MPa 及 14 %；539 MPa、573 MPa 及 15 %；600 MPa、608 MPa 及 6 %。以 7050-H 展伸材作為比較基準，則 7050Mn-H、7050Zr-H、7050Sc-H 及 7050X-H 之抗拉強度較 7050 展伸材者分別提升 40 MPa (7%)、42 MPa (7%)、30 MPa (6%)及 65 MPa (12%)。此顯示在 T6 頂時效狀態下，三種分散相元素對 7050 展伸材之抗拉強度提升效果非常相近，至於添加複合分散相元素者依舊具有最佳加乘之分散強化及細晶強化。

表 3.1 未經分散相析出處理之五種 7050 系列合金經熱軋後於 480°C 固溶處理 1 小時後之拉伸性質

合金種類	YS (MPa)	UTS (MPa)	分散相元素提升 UTS 量 (MPa)	Elongation (%)
7050	149 ± 5	297 ± 6	--	51 ± 6
7050Mn	181 ± 2	351 ± 8	54	39 ± 3
7050Zr	182 ± 5	336 ± 7	39	37 ± 7
7050Sc	200 ± 11	359 ± 11	62	34 ± 3
7050X	287 ± 14	434 ± 8	137	24 ± 4

表 3.2 有經分散相析出處理之五種 7050 系列合金經熱軋完於 480°C 固溶處理 1 小時後之拉伸性質

合金種類	YS (MPa)	UTS (MPa)	分散相元素提升 UTS 量 (MPa)	Elongation (%)
7050-H	150 ± 5	302 ± 10	--	53 ± 7
7050Mn-H	190 ± 3	364 ± 7	62	42 ± 6
7050Zr-H	197 ± 1	351 ± 2	49	44 ± 7
7050Sc-H	174 ± 2	339 ± 4	37	44 ± 4
7050X-H	281 ± 4	418 ± 18	116	22 ± 4

表 3.3 未經分散相析出處理之五種 7050 系列合金熱軋後經 480°C 固溶處理 1 小時後，於 120°C 時效 24 小時之拉伸性質

合金種類	YS (MPa)	UTS (MPa)	分散相元素提升 UTS 量 (MPa)	Elongation (%)
7050	507 ± 15	544 ± 30	--	12 ± 5
7050Mn	544 ± 6	573 ± 5	29	10 ± 2
7050Zr	538 ± 13	561 ± 15	17	9 ± 1
7050Sc	566 ± 20	591 ± 4	47	13 ± 4
7050X	627 ± 13	643 ± 4	99	8 ± 2

表 3.4 有經分散相析出處理之五種 7050 系列合金熱軋後經 480°C 固溶處理 1 小時後，於 120°C 時效 24 小

時之拉伸性質

合金種類	YS (MPa)	UTS (MPa)	分散相元素提升 UTS 量 (MPa)	Elongation (%)
7050-H	504 ± 5	543 ± 7	--	18 ± 4
7050Mn-H	543 ± 5	583 ± 6	40	11 ± 1
7050Zr-H	557 ± 3	585 ± 3	42	14 ± 1
7050Sc-H	539 ± 12	573 ± 9	30	15 ± 5
7050X-H	600 ± 13	608 ± 11	65	6 ± 1

### 3.4 未經分散相析出處理與有經分散相析出處理之五種 7050 系列合金固溶處理後之抗拉強度分析比較

分析以上實驗結果，彙整出未經過分散相析出處理與有經過分散相析出處理之 480°C 固溶處理 1 小時，並水淬(As Solution-treated 狀態)後之抗拉強度比較表(如表 3.5 所示)。

含 Mn 之 7050Mn 展伸材在 As Solution-treated 狀態下，有經分散相析出處理較未經分散相析出處理者之抗拉強度提升 13 MPa (4%)，乃因在經分散相析出處理期間會析出 Al<sub>6</sub>Mn 分散相，對差排滑移造成阻力，導致材料強度較未經分散相析出處理者來的高。

含 Zr 之 7050Zr 展伸材在 As Solution-treated 狀態下，有經分散相析出處理較未經分散相析出處理者之抗拉強度提升 15 MPa (5%)，乃因分散相析出處理具有較高溫且足夠時間使 Al<sub>3</sub>Zr 分散相進行析出反應，致使材料強度上升。

含 Sc 之 7050Sc 展伸材在 As Solution-treated 狀態下，未經分散相析出處理較有經分散相析出處理者具有較佳之抗拉強度，提升量為 20 MPa (6%)，乃因 7050Sc 合金在熱軋時，即可使 Al<sub>3</sub>Sc 分散相析出且具有硬化之效果，若合金有進行分散相析出處理，Al<sub>3</sub>Sc 分散相則會因第二階段 470°C/12 h 高溫長時間處理而發生過時效粗大化，造成材料軟化。

7050X 展伸材則是未經分散相析出處理較有經分散相析出處理者具有較佳之抗拉強度，As



Solution-treated 狀態下之抗拉強度提升 16 MPa (4%)，在複合添加分散相合金元素部分， $Al_3(Sc_{1-x}Zr_x)$  分散相在熱軋加工時已具有析出硬化效果，若進行分散相析出處理，較易發生過時效，造成材料強度降低。

最後，於 7050 鋁合金添加 Mn、Zr、Sc 等分散相元素，皆能造成不同程度之分散強化效果，根據實驗結果可彙整出表 3.6 所示之各分散相在兩種不同之展伸材製程中所發生分散相析出之程度及效應。由於  $Al_6Mn$  及  $Al_3Zr$  分散相需在較高溫且足夠時間進行析出反應，在未做分散相析出條件下之熱軋加工及固溶處理階段，因製程時間較短只有少量析出，故強度增幅低，但  $Al_3Sc$  分散相則因析出溫度較低，在這兩種製程下已大量析出，故強度增幅高；至於兩階段分散相析出處理，因高溫長時間  $Al_6Mn$  及  $Al_3Zr$  分散相大量析出，故強度增幅高，而  $Al_3Sc$  則會在第二階段時開始發生過時效軟化，強度下降，為充分發揮分散強化之效果，以下針對不同分散相元素之 7050 鋁合金，建議較合適之製程：

- (1) 對含 Mn 及 Zr 之 7050 合金，由於  $Al_6Mn$  及  $Al_3Zr$  需在較高溫度進行足夠時間之析出處理，方能析出細密之分散相，故建議鑄錠需作適當高溫與足夠時間(例如  $470^\circ C/12\text{ h}$ )之分散相析出處理處理。
- (2) 對含 Sc 及複合添加(Mn、Zr、Sc)之 7050 合金，建議無需進行高溫分散相析出處理 (例如  $470^\circ C/12\text{ h}$ )，以避免  $Al_3Sc$  之粗化，造成材料強度之下降。

表 3.5 五種 7050 系列合金經不同製程處理之固溶處理後(As Solution-treated)之抗拉強度

合金種類	未經分散相析出處理之抗拉強度 (MPa)	有經分散相析出處理之抗拉強度 (MPa)	分散相析出處理提升 UTS 量 (MPa)
7050	$297 \pm 6$	$302 \pm 10$	+ 5
7050Mn	$351 \pm 8$	$364 \pm 7$	+ 13
7050Zr	$336 \pm 7$	$351 \pm 2$	+ 15

7050Sc	$359 \pm 11$	$339 \pm 4$	- 20
7050X	$434 \pm 8$	$418 \pm 18$	- 16

表 3.6 分散相在不同製程階段時之析出程度及效應

分散相種類	兩階段分散相析出處理	未作分散相析出處理條件下	
		熱軋加工	固溶處理
$Al_6Mn$	大量析出 (強度增幅高)	少量析出 (強度增幅低)	少量析出 (強度增幅低)
$Al_3Zr$	大量析出 (強度增幅高)	少量析出 (強度增幅低)	少量析出 (強度增幅低)
$Al_3Sc$	大量析出，且會在第二階段 ( $470^\circ C/12\text{ h}$ ) 開始發生過時效軟化(強度下降)	大量析出 (強度增幅高)	大量析出(強度增幅高)

#### 4. 結論

本研究探討 7050、7050Mn(含 0.4% Mn)、7050Zn(含 0.2% Zr)、7050Sc(含 0.2% Sc)及 7050X(含 0.4% Mn、0.2% Zr 及 0.2% Sc)等五種鋁合金之分散相析出行為，以及不同之展伸材製程下(鑄件在熱軋前有經及未經一分散相析出處理)合金之機械性質，並獲致以下結論。

1. 含 Sc 之 7050Sc 鋁合金在兩階段分散相析出處理過程中，其硬度在第一階段  $300^\circ C$  時效過程中因析出  $Al_3Sc$  造成析出硬化，約在 2 小時達到頂時效(77 HRF)，之後至 12 小時期間之硬度值變化不大。但在第二階段  $470^\circ C$  時效 1 小時後，其硬度已大幅下降至 55 HRF，發生明顯的過時效軟化。而含 Mn 及 Zr 之 7050Mn 及 7050Zr 鋁合金則在第一階段  $300^\circ C$  時效過程中未發現分散相之析出硬化，但在第二階段  $470^\circ C$  則出現析出硬化效果，其中 7050Mn 及 7050Zr 分別在 12 及 24 小時達頂時效。
2. 對未經分散相析出處理之 7050、7050Mn、7050Zr、7050Sc 及 7050X 等五種鋁合金，其 T6 時效處理後之抗拉強度分別為 544、573、561、591 及 643 MPa；添加 0.2% Sc 較 0.4% Mn 及 0.2% Zr 更具提升抗拉強

度之效果。對有經分散相析出處理之 7050、7050Mn、7050Zr、7050Sc 及 7050X 等五種鋁合金，其 T6 時效處理後之抗拉強度分別為 543、583、585、573 及 608 MPa；顯示添加 0.4% Mn 與 0.2% Zr 皆具良好提升抗拉強度之效果，而添加 0.2% Sc 效果略低。至於複合添加之 7050X 合金則因其分散強化及細晶強化之綜合效應，在未經分散相析出處理條件下，其 T6 抗拉強度高達 643 MPa，而未經分散相析出處理條件下，其 T6 抗拉強度也有 608 MPa。

### 誌謝

本研究獲得經濟部工業局之協助傳統產業技術開發計畫 E10200100-078 之經費補助，特此感謝。特此致上感謝之意。

### 參考文獻

- [1] Wang T, Yin Z. M. J Rare Met, 2006, (30) p.197
- [2] Wagner J A, Shenoy R N. Metall Trans, 1991, 22A p.2809
- [3] Dai X Y, Xia C Q, Wu A R, Wang J W, Li Y Y. Mater Rev, 2006, 20(5), p.104
- [4] 葉秉洋，鋁鈦二元合金與含鈦 7050 鋁合金之析出研究，大同大學碩士論文，2008，頁 26，39，84，85