

LAZ661 鎂合金之機械性質和時效硬化效果  
**Study on mechanical properties and aging strengthening of LAZ661 alloy**

林士超      王建義\*

Shih Chao Lin      J. Y. Wang

國立東華大學材料科學與工程學系

**摘要**

本研究選用 LAZ661 鎂合金作為研究對象。利用半固態成型法製成鑄態鎂合金，經過均質化處理後進行時效處理，利用析出強化來提升機械性質。

均質化 LAZ661 鎂合金經不同溫度下軋延後再固溶處理，在不同溫度的單階段時效下發現，皆有 AlLi 析出相使其造成析出強化。在各時效曲線圖中發現，會有兩次時效尖峰，推測可能有不同析出相析出造成。期望利用預先冷加工時效處理使其增加異質成核點並讓第二析出相更快析出，使機械性質再次提升。並用 OM、XRD、SEM 鑑定兩種不同析出相對 LAZ661 合金的機械性質的影響和分析其機械性質的變化。

關鍵詞: 鎂合金 析出硬化 冷加工 時效處理

**Abstract**

The mechanical properties of LAZ661 (Mg-6wt% Al-6wt% Li) alloy was investigated. Precipitation strengthening after homogenization treatment was adopted for increasing the strengths of LAZ661. The results show that the rolled at different temperatures following the solid solution treatment, the AlLi precipitates and increases the strengths of alloy. According to the aging curves, there are two peaks aging. That is due to the different precipitates occur at different aging temperature. The microstructures of aged alloy were investigated by using the optical microscope, X-ray diffractometer, and scanning electron microscope. The strengthening mechanism was discussed.

Keywords: magnesium alloy, precipitation hardening, cold rolling, aging treatment

**前言**

鎂合金是最輕的結構用材料，具有高比強度、比剛性，低比重等特性，且符合環保趨勢，因為其具有可回收性，在石化燃料逐漸不敷使用的情形下，開發鎂合金並提升鎂合金的機械性質為目前主要研究之一。然而，目前鎂合金仍無法完全取代鋁合金，乃鍛造型鎂合金因為其鎂的 HCP 結構，滑移系統不足導致鎂合

金在室溫下成型性差<sup>(1)</sup>。

大部分鎂合金製程，多採用壓鑄或鑄造來成型，約佔所有成型法的 93%左右<sup>(2)</sup>。鎂合金之強度容易受到晶粒尺寸影響，若使用高溫加工，會將好不容易細化之晶粒因高溫而粗大化，材料強度因此而降低、造成高溫加工之前的晶粒細化失去作用，若要擴大應用在運輸、航太工業之輕量化，鎂合金強度的提升是必要的。

對輕金屬而言，析出硬化是相當重要的一項強化方式，要改善鎂合金之時效硬化能力，最有效的方法是增加析出時之成核點(nucleation sites)，藉由此方法可以提高析出物之密度、析出相的形貌大小以及分布均勻性<sup>(3)</sup>。一般常使用的方法有 2 種：(1)時效處理前預先塑性加工<sup>(4)</sup>，(2)添加微量元素之微合金化(micro alloying)<sup>(6-10)</sup>。

本研究選用 LAZ661 鎂合金，希望藉由添加微量 Al，Li 元素使其強化並輕量化，再藉由後續的時效處理使其提升強度。

## 實驗方法與步驟

將鎂,鋰,鋁,鋅 依比例用半固態成型法製成鑄態 LAZ661 鎂合金。接著將鑄態 LAZ661 鎂合金進行 450°C 下,持溫 12hrs,並以 Ar 氣體保護之均質化處理，爐冷至室溫。再利用滾軋機分別滾軋 10%冷軋(室溫),100°C 溫軋；將未滾軋，冷軋 10%，100°C 溫軋 10% 試片均進行 400°C 固溶處理(持溫 1hr,以 Ar 氣體保護)後，進行 T4，T6(160°C)熱處理。此外，將均質化後未加工試片固溶處理(400°C 1hr)進行 T3(預冷加工 10%後，進行自然時效處理。)，T8 熱處理(預冷加工 10%後，進行人工 160°C 時效處理。)。再利用 XRD SEM 分析其變化情形。

硬度則使用維克氏硬度機(Akashi MVK-H11)在試片上任取 7 點，去除最大值和最小值後，取剩下 5 個數據的平均數。

晶相觀察的部分，利用光學顯微鏡(OLYMPUS BX41M)、SEM 觀察顯微組織，以了解晶粒大小及可能之析出物。

機械性質的變化利用 SHIMANO AG-I 100KN 拉伸試驗機進行測試。

## 結果與討論

### 1. 鑄態，均質化 LAZ661 鎂合金比較

Fig.1 金相圖可發現，鑄態 LAZ661 鎂合金有偏析現象。利用均質化處理(持溫 12hrs 450°C)使偏析現象消除，開始出現細緻均勻的層狀組織。

Fig.2 拉伸測試發現均質化後的 LAZ661 合金和鑄態相比發現：其延伸率從 8.2%上伸至 11.5%，推測為偏析現象消除，材料能均勻承受拉力，而使延伸率上升。最大抗拉強度也從 245MPa 上伸至 270.3MPa，降伏強度並無明顯變化。均質化處理可使機械性質提升。Fig.3 為鑄態和均質化 LAZ661 的 XRD 曲線圖，其組成皆為 AlLi 相和  $\alpha$ -Mg(Li<sub>0.92</sub>Mg<sub>4.08</sub>)相。

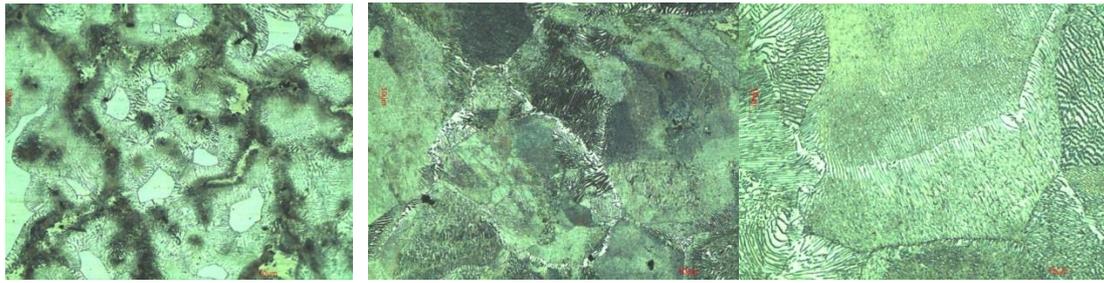


Fig.1 Microstructure of LAZ661 alloy (a) as-cast, 200X (b) Homogenized at 450<sup>0</sup>C-12h, 200X (c) Homogenized at 450<sup>0</sup>C-12h, 500X

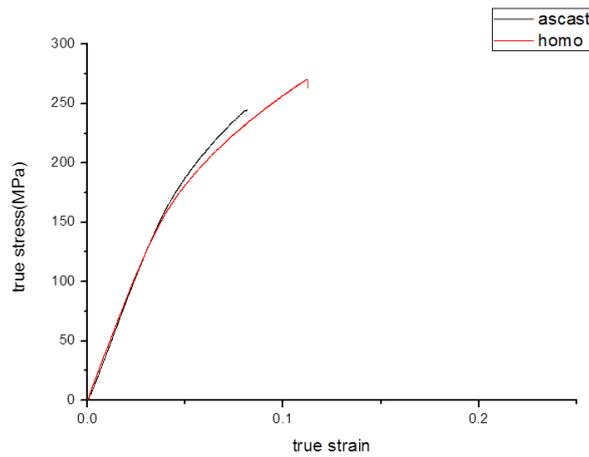


Fig.2 True stress vs. true strain curves of the As-cast and Homogenized LAZ661

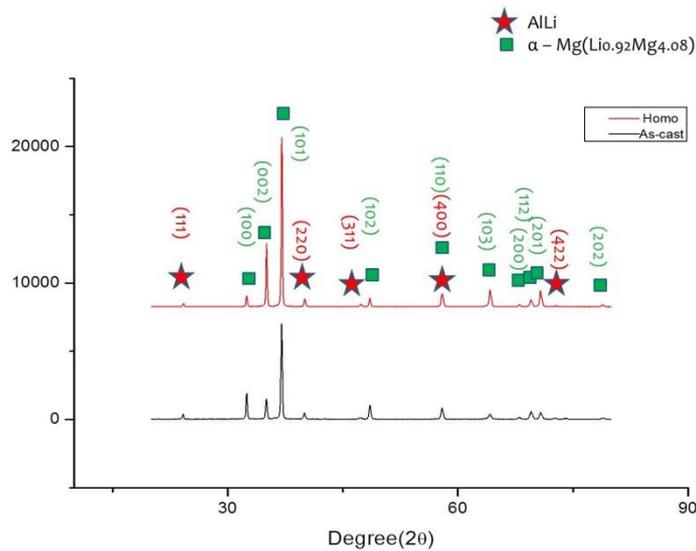


Fig.3 XRD patterns of the As-cast and Homogenized LAZ661

2. 均質化後未加工固溶處理(代號 A)，冷軋 10%固溶處理(代號 B)，溫軋 -100°C-10%固溶處理(代號 C)，之時效曲線比較

比較 Fig.4 均質化後，未加工直接固溶處理(A)，冷軋 10%後固溶處理(B)和溫軋 100°C 10%後固溶處理(C)之顯微組織發現，其層狀組織皆消失，轉變為均勻的晶粒。A 的平均晶粒尺寸為 160um，B 為 103um，C 為 98um；隨著加工量和溫度的上升，晶粒尺寸逐漸縮小。A 初始硬度為 78HV，B 初始硬度為 80HV，C 的初始硬度為 81HV，造成他們初始硬度有所不同的原因為晶粒尺寸的不同，其晶粒尺寸愈小，硬度值略微提升。

從 Fig.5 時效曲線圖來看，A 自然時效 peak1 硬度為 85.7HV(24hr)，peak2 為 85.3HV(60hr)，A 人工時效 peak1 硬度為 92.3HV(5hr)，peak2 為 87HV(40hr)；B 自然時效 peak1 硬度為 85.9HV(20hr)，peak2 為 85.4HV(48hr)，B 人工時效 peak1 硬度為 85.1HV(4hr)，peak2 為 86.8HV(36hr)；C 自然時效 peak1 硬度為 96.4HV(2hr)，peak2 為 91.3HV(20hr)，C 人工時效 peak1 硬度為 89.1HV(2hr)，peak2 為 86.7HV(20hr)。在加工過程中提供大量差排，使得固溶處理後異質成核點變多而使得人工時效時間大幅縮短。

比較各機械性質發現，固溶處理後其延伸率和鑄態，均質化後材料相比皆大幅提伸，從 11%提升至約 21%。最大抗拉強度也從 270MPa 提伸至 300~350MPa；經過 T6 處理的試片發現其延伸率和固溶處理的試片相比卻些許下降至 13%，從拉伸破段圖觀察，推測經過 T6 處理後材料內部孔洞增加，可能為析出物析出過快造成，導致在拉伸過程中皆由析出物承受拉伸應力，使其身長率和抗拉強度下降。從 XRD 分析圖發現，析出物為 AlLi 相。

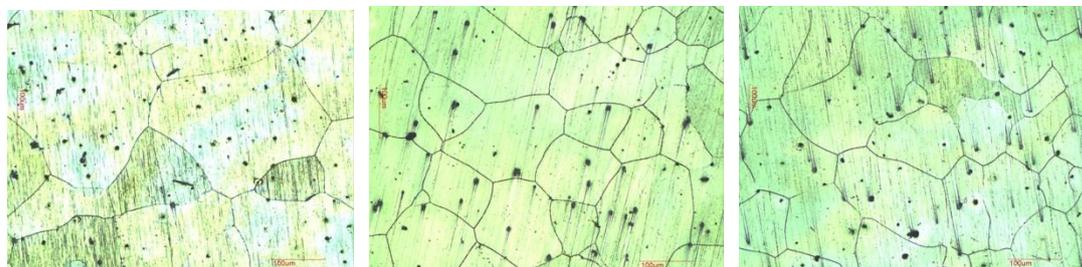


Fig.4 Microstructures of LAZ661 (a) A, 100X (b) B, 100X (c) C, 100X (A: homogenized-solution treated, B: homogenized-cold rolled-solution treated, C: homogenized-100°C rolled-solution treated)

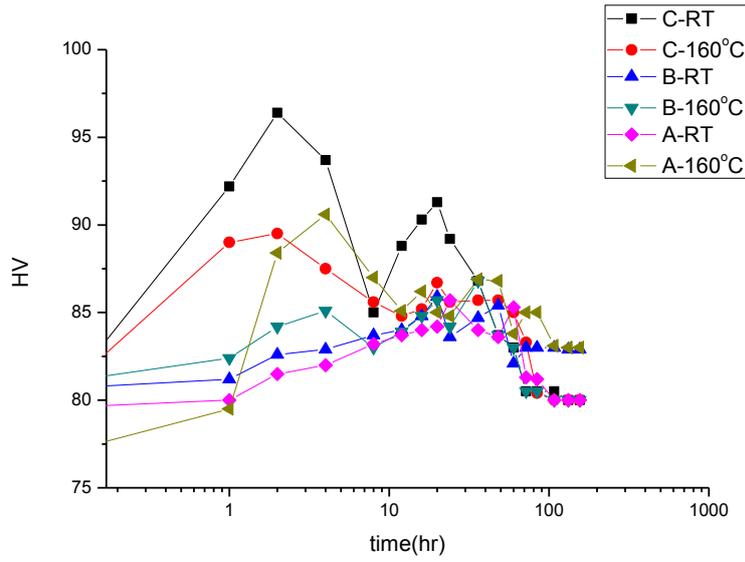


Fig.5 Variation of hardness vs. aging time for T4 and T6-ed LAZ661

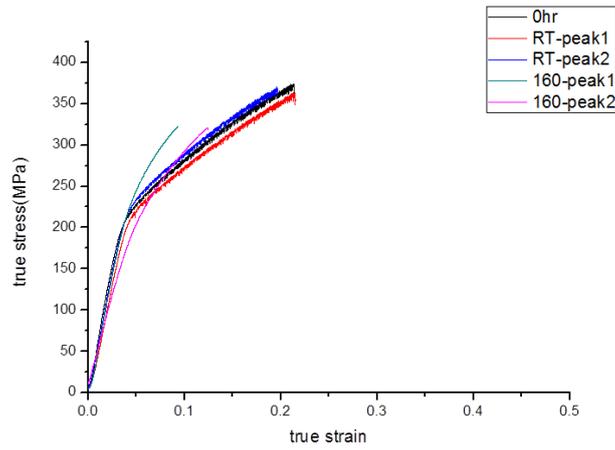


Fig.6 True stress vs. true strain curves of RT and 160°C aged LAZ661 after homogenized-solution treated

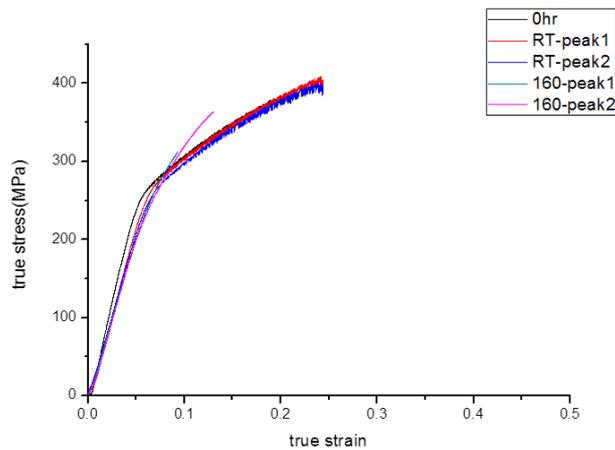


Fig.7 True stress vs. true strain curves of RT and 160°C aged LAZ661 after homogenized-100°C rolled-solution treated

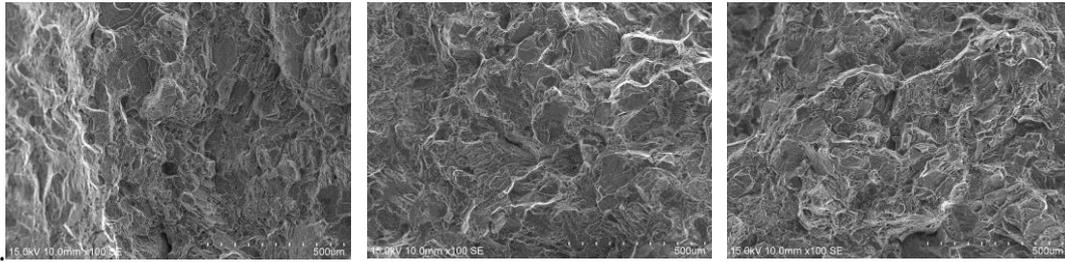


Fig.8 SEM images of fracture surface of tensile test specimens (a) A (b) A-peak1 (c) A-peak2 (A: homogenized-solution treated)

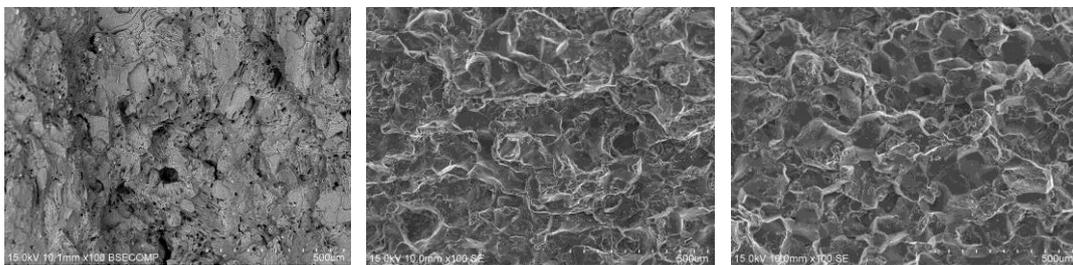


Fig.9 SEM images of fracture surface of tensile test specimens (a) C (b) C-peak1 (c) C-peak2 (C: homogenized-100°C rolled-solution treated)

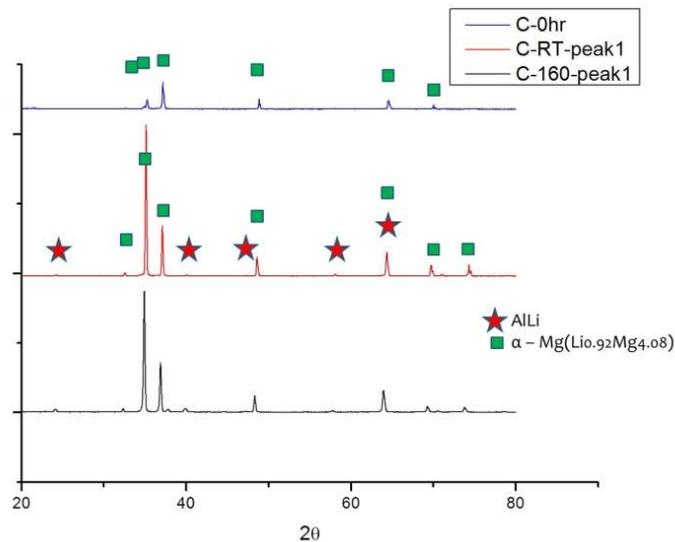


Fig.10 XRD patterns of (a) C (b) C-peak1 aged (c) C-peak2 aged (C: homogenized-100°C rolled-solution treated)

### 3. 均質化未加工直接固溶處理後 T3(代號 D) , T8-160°C(代號 E)熱處理比較

從 Fig.11 各金相圖觀察可發現，時效前預加工(T3,T8)的顯微晶粒結構沿軋延方向稍微變形，並有許多雙晶結構的產生。

T3, T8 熱處理之初始硬度和均質化後未加工直接固溶處理之初始硬度值相比發現；從原本的 79HV 提升至 95.7HV，推測造成初始硬度大幅上升的原因為，時效前預冷加工處理使材料內部產生大量的塑性變形並有大量的差排生成，造成雙晶現象的產生，而使材料的硬度提升。從 T3 和 T8 處理的時效曲線圖來看可發現，在第一個時效尖峰期硬度值為 102.3HV(24hr)，和 T8 處理的第一個時效尖峰硬度值 102.5HV(2hr) 並無太大差異，但其尖峰時效所需的時間縮減至 2hr，所以進行 T8 處理可以有效地縮短時效時間，也可達到最大硬度值(102.5HV)。

經時效前預冷加工處理(T3, T8)和均質化後未加工直接固溶處理之拉伸性質比較發現；其最大抗拉強度可由 374MPa 提升至 391.3MPa，降伏強度由 190MPa 大幅提升至 300.6MPa，但延伸率卻從 21% 下降至 10.8%。推測時效前預冷加工處理產生大量差排，使得材料降伏強度上升，但也因為材料經軋沿過後，晶粒產生雙晶讓材料無法承受過多的形變量而使其延伸率下降。

經 XRD 分析，可以發現在第一個尖峰時效會產生 AlLi 析出相，這是造成攜出強化的原因，而第二個尖峰時效的析出相推測為 MgZn<sub>2</sub> 相。

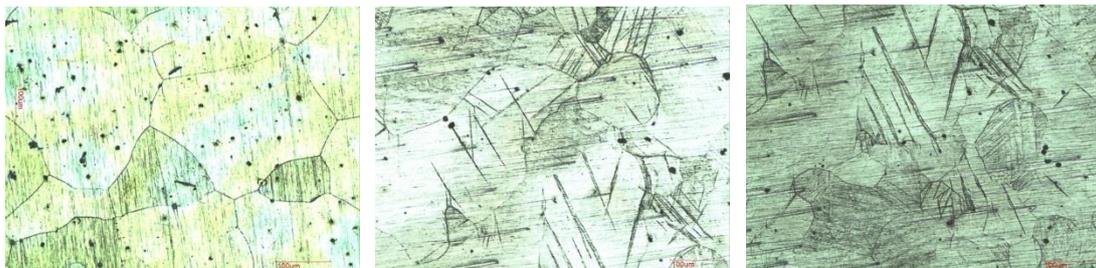


Fig.11 Microstructure of LAZ661 (a) A, 100X (b) .D, 100X (c) E, 100X (A: homogenized-solution treated, D: T3, E: T8)

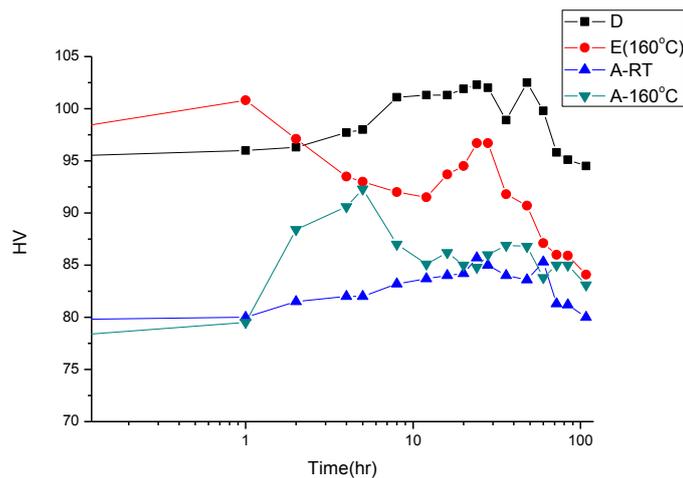


Fig.12 Variation of hardness vs. aging time for T3 and T8-ed LAZ661

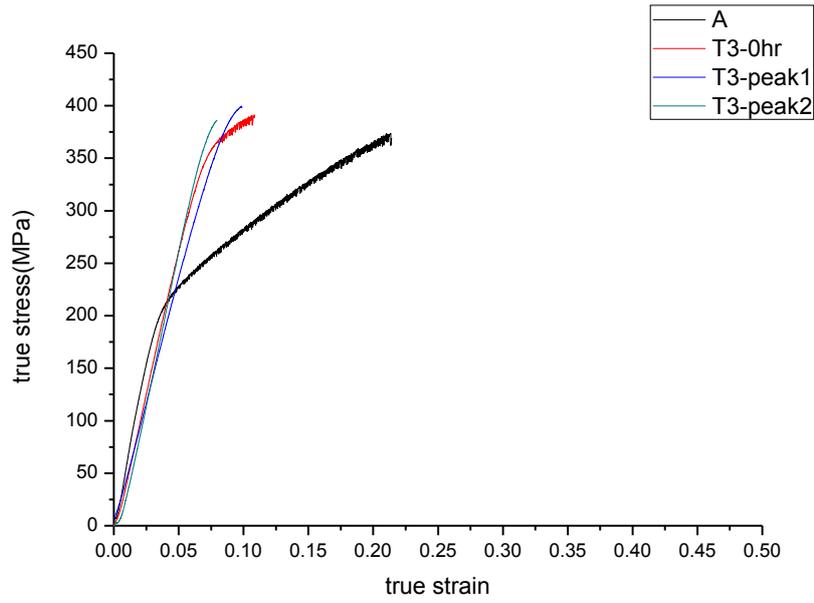


Fig.13 True stress vs. true strain curves of T3 treatment and homogenized-solution treated(A).

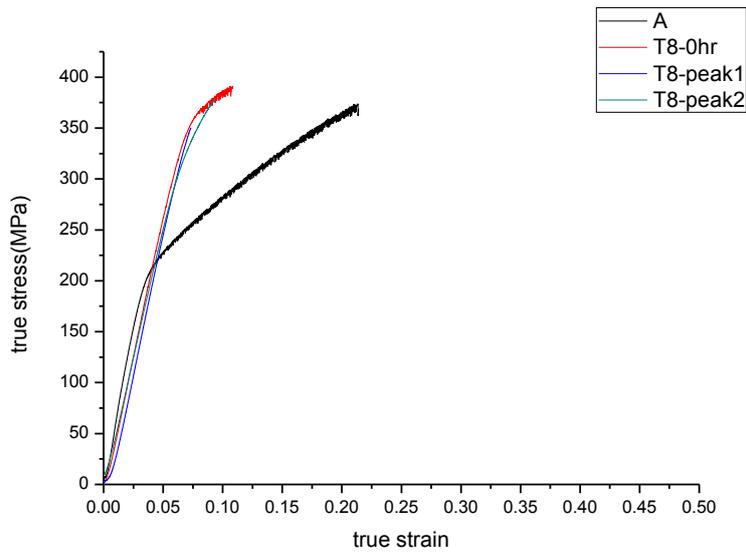


Fig.13 True stress vs. true strain curves of T8 treatment and homogenized-solution treated(A).

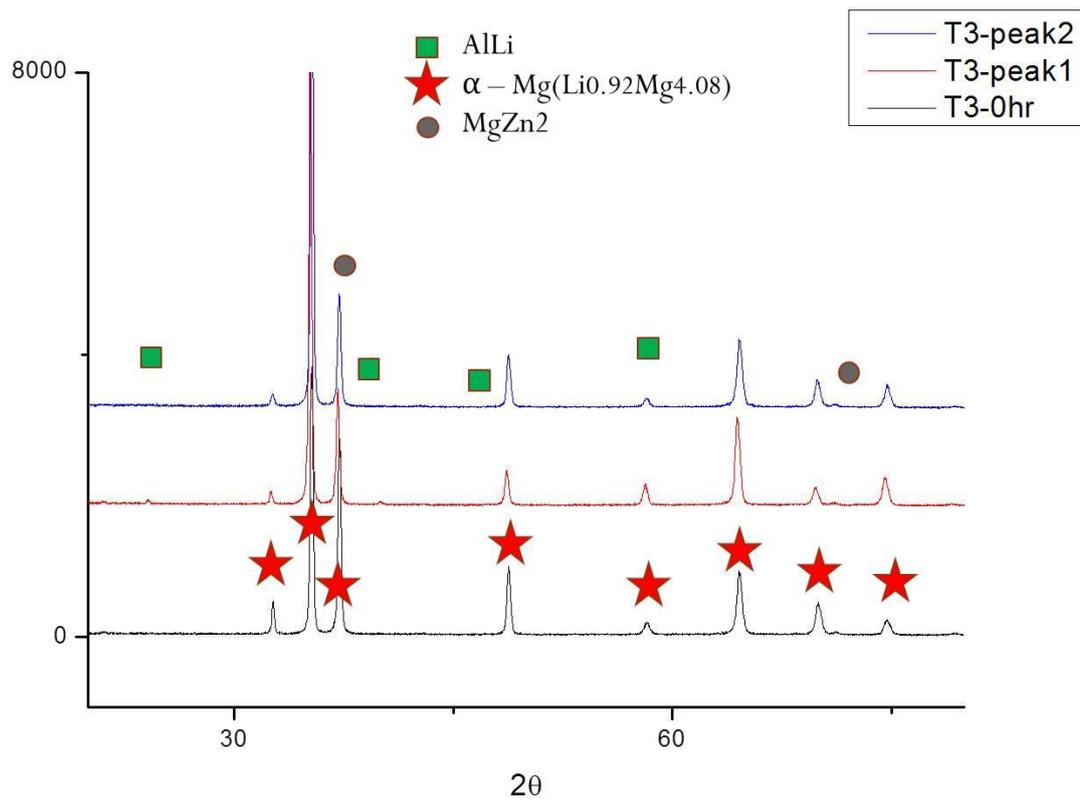


Fig.14 XRD patterns of the T3 treatment

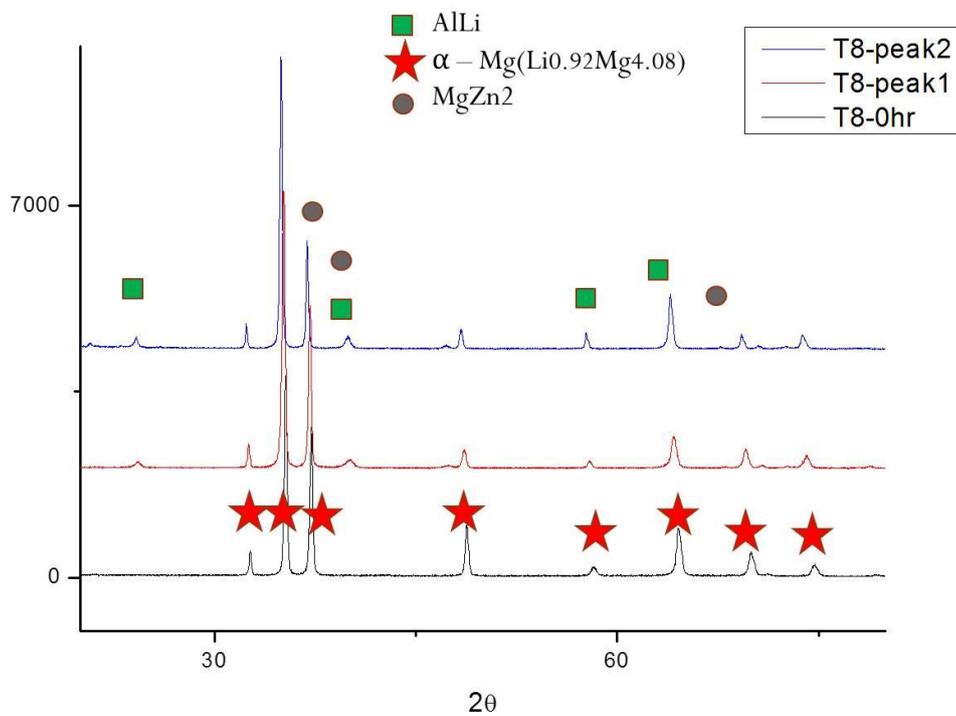


Fig.15 XRD patterns of the T8 treatment

## 結論

1. 鑄態 LAZ661 經均質化處理後偏析現象消除，並出現均勻地層狀組織。均質化 LAZ661 之最大抗拉強度上升至 270.3MPa，其延伸率也上升至 11.5%。XRD 曲線圖鑑定鑄態和均質化 LAZ661 由  $\alpha$ -Mg(Li<sub>0.92</sub>Mg<sub>4.08</sub>) 和 AlLi 相組成。
2. 均質化後施予軋延再固溶處理可使晶粒尺寸縮小，推測這是使初始硬度比均質化後直接固溶處理是偏高的原因。固溶處理後材料延伸率上升約 2 倍，其最大抗拉強度也上升至 300~350MPa。進行 T6 處理可有效減少時效尖峰所需時間，但會使其延伸率和最大強度略為下降，推測是析出物析出而讓析出物承受大部分應力造成。均質化後經溫軋(100°C)10%後固溶處理，再進行 T6 處理(160°C)在第一尖峰有最大的硬度值 96.4HV(2hr)。
3. 時效前預冷加工 10%會使晶粒組織內部產生許多雙晶結構，並沿著軋延方向稍微變形。進行預冷加工後會使初始硬度提升至 95.7HV。T8 處理可使時效尖峰所需時間縮短，也有最大硬度值 102.5HV(2hr)。時效前預冷加工處理會使降伏強度，最大抗拉強度上升，但其延伸率卻下降至 10.8%。經 XRD 分析其析出相為 AlLi 相和 MgZn<sub>2</sub> 相。

## 參考文獻

- [1] I.J.Polmear, "Magnesium alloys and applications", Materials science and technology, 10(1), 1994, pp.1-16.
- [2] 寶野和博, Mendis, C.L., 鎌土重晴, 本間智之, 時效析出型高強度展伸用鎂合金之開發, NIMS, 2009.4.
- [3] Nie, J.F., Effects of precipitate shape and orientation on dispersion strengthening in magnesium alloys, Scripta Mater, 2003. 48: p. 1009-1015.
- [4] Hildrith, T., Nie, J.F, Muddl, B.C., Magnesium Alloys and Their Applications, ed. B.L. Mordike, Kainer, K.U., 1998: Wiley-VCH. 339.
- [5] Oh-ishi, K., Hono, K., Shin, K.S., Effect of pre-aging and Al addition on age-hardening and microstructure in Mg-6wt%Zn alloys, Materials Science and Engineering: A, 2008. 496: p.425.
- [6] Mukai, T., Higashi, K., Deformation mechanism in a coarse-grained Mg-AL-Zn alloy at elevated temperatures, Scripta Mater, 2001. 44: p. 1493.
- [7] Wyrzykowski, J.W., Grabski, M. W., The Hall-Petch relation in aluminium and its dependence on the grain boundary structure Phil Mag A, 1986. 53: p.505.
- [8] Bohlen, J., Dobron, p., Garcia, E.M., Chmelik, F., Lukac, P., Letzig, D., Kainer, K.U., Materials Science Forum, 2007. 1:p.546-549.
- [9] Somekawa, H., Osawa, Y., Singh, A., Mukai, T., Effect of solid-solution strengthening on fracture toughness in extruded Mg-Zn alloys, Scripta Mater, 2009. 61:p.705.

- [10] Singh, A., Watnabe, M., Kato, A., Tsai, A.P., Microstructure and strength of quasicrystal containing extruded Mg-Zn-Y alloys for elevated temperature application, *Materials Science and Engineering:A*,2004.385: p.382.
- [11] Hono, K., Mendis, C.L., T.T., Oh-ishi, K., Towards the development of heat-treatable high-strength wrought Mg alloys, *Scripta Materialia*, 2010.63: p.710-715.
- [12] D.K.Xu, L.Liu, Y.B.Xu, E.H.Han., The effect of precipitates on the mechanical properties of ZK60-Y alloy, *Materials Science and Engineering:A*,2006.420: p.322-332.