

退火處理對輕量化 Mg-Li 合金振動破壞性質影響探討

The effect of annealing on the vibration fracture properties of light weight Mg-Li alloys

*林逸華 宋振銘 王建義

Yi-Hua Li Jenn-Ming Song Jian-Yih Wang

國立東華大學 材料科學與工程學系

(NSC96-2815-C-259 -005 -E)

摘要

本研究探討添加少量Al、Zn元素之Mg-11Li冷軋板材機械性質表現，並與低Li含量LA60合金進行比較，其中退火處理的效應為調查重點。結果顯示因合金元素影響，Mg-11Li合金並未擁有預期中良好制振性，但其變形阻抗與加工硬化率較Mg-6Li合金有大幅度改善。250°C熱處理造成散佈於BCC基地中之部份HCP富Mg相分解，導致基地Al固溶上升，強度進一步提升但延伸率與振動破壞阻抗明顯劣化。

關鍵字：Mg-Li、振動破壞阻抗、制振性、裂縫傳播。

Abstract

This study investigated the damping capacity and vibration fracture resistance of light weight Mg-Li (LA60) and Mg-Li-Al-Zn (LAZ1110) alloys under resonant conditions. The effect of annealing was also explored. Results show that the LAZ1110 comprising BCC β matrix and HCP α particles exhibited inferior damping capacity and thus a higher deflection amplitude under a constant push force compared to LA60. As for LAZ1110, alloying with Al and Zn significantly improved the work hardening ability and deformation resistance. Moreover, annealing at 250°C resulted in the dissolution of intergranular α and might thus an increased Al concentration of the matrix, which led to greater strength and lower ductility. Interestingly, the degraded vibration deformation resistance of the annealed LAZ1110 might result from a lack of intergranular α phase.

Keywords: Mg-Li, vibration fracture resistance, damping capacity, crack propagation.

一、前言

Mg 合金因具有較低比重、高制振性及高比強度等優異特性，故為目前廣泛使用於 3C 及汽車工業等之結構材料[1]，因此 Mg 及 Mg 合金於新一代輕量化用材扮演重要角色。然而由於 Mg 合金為 HCP 結構，其 c/a 值為 1.624，於常溫下滑移系統有限，冷加工性不佳，因此有製造性上的問題，對於應用推廣上具有一定影響。其解決方案除細化晶粒、提高加工溫度外，合金改質亦為重要對策之一。

文獻中指出於 Mg 合金中添加 Li [2,3]，除可進一步降低其密度外，亦可改善其成形性。當 Li 添加量在約 5~12wt%之間時，於常溫組織為 α (HCP)Mg-rich 及 β (BCC)Li-rich 雙相並存，當 Li 含量達 11.5wt%以上則轉變為 full β 基 [2]。此外，Mg-XLi-1Zn 合金拉伸性質相關報導指出[2]，Li 含量由 6wt%升至 12wt%，延伸率可由 32%進一步增加至 56%。值得注意的是因 Li 含量提升，使得原本 $\alpha+\beta$ 兩相組織中比例大幅增加，導致試料加工硬化率(n)由 0.15 大幅下降至接近 0，因而降伏強度雖隨 Li 升高略有上升，但拉伸強度卻由 155MPa 下降至 125MPa。為兼顧良好成形性與適當強度，往往選用 Al、Zn 及 Ag 等元素進行合金改質。其中 Al 與 Zn 均具固溶強化效果，亦可經適當时效析出，強化第二相[4]。

本研究針對添加約 1wt%Al 及 0.5wt%Zn 之高 Li 組成 Mg-Li 合金進行組織觀察與機械性質測試，包括制振性與振動破壞阻抗為調查要項。此外亦選用 Li 含量於兩相區內富 Mg 端之低 Li 組成 Mg-6Li 合金，分別獲得兩種不同組織形態之 Mg-Li 合金，包括(1)高 Li 合金：富 Li β 相基地，含少量 α 富 Mg 顆粒；以及

(2)低 Li 合金：富 Mg α 相基地，散佈少量 β 顆粒。除比較兩者之振動性質包括共振頻率、制振性以及振動破壞阻抗等差異外，亦對基地以及第二相顆粒差異對裂縫傳播的影響進行探討。

二、實驗方法

本實驗材料鎂合金板材成份示於表 1。兩試料根據其組成分別以 LA60 及 LAZ1110 表示。As received 試片經冷軋至 3.3mm 形成 F 材(滾輪加熱至 150°C)。LA60-F 及 LAZ1110-F 分別經 350°C 退火 3 小時以及 250°C 退火 1.5 小時形成 O 材。之後延 TD 方向以放電加工截取拉伸試片以及振動試片。

本研究以 X 光繞射分析儀分析各試料組織結構相，測量面為軋延平面。並且探討經過退火熱處理後，晶粒方位之轉變。

本研究針對各試料進行拉伸試驗(應變速率為 1mm/min)及 Micro Vickers 微硬度測試，並以奈米壓痕試驗機(應變速率 5nm/s)，對各試料基地以及第二相進行測試，以了解其基本機械性質。

振動試驗設備如圖 1(a)所示，將板型試片一端固定於試片夾持裝置，另一端裝配振幅感應器。試片尺寸為 80mm x 15mm x 3mm，試片兩側於近振動台夾持端 25mm 距離處，開 V 型凹槽(notch)，如圖 1(b)。使振動頻率由低頻掃描至高頻(10~300Hz)，對應末端的位移量最大者即為試片的共振頻率。將振動器頻率固定於共振頻率下，進行等出力值條件之振動試驗量測(9.8m/sec²)，記錄試片之末端偏移量與振動次數關係(D-N Curve)，當偏移量明顯下降即表示共振頻率因裂縫生成傳播而導致下降 [5]，本研究定義 0.95Dmax(Dmax 最大偏移量)對應之振動次數稱為振動壽命。此外本實驗亦量測各試料之對數衰減率(δ)以評估制振性，其定義如下[6]：

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \frac{A_i}{A_{i+n}}$$

A_i 為原振幅， A_{i+n} 為移去出力後 n 次振動之振幅(本實驗取 n 為 10)。

三、結果與討論

圖2所示為本實驗兩種試料F材和O材組織，圖2(a)

為LA60-F，晶界分佈BCC富Li顆粒，組織中亦觀察到雙晶。圖2(b)為LA60-O，顯示經退火後晶粒變大，雙晶明顯變少。圖2(c)和圖2(d)則為 LAZ1110 F及O材，F材組織存在相當比例 α 富Mg相，部份為細長條狀沿晶界分佈，部份呈顆粒狀散佈於晶粒內。經退火後基地晶粒變大且圓鈍， α 相比比例降低，晶界 α 完全分解。

圖3為各試料軋延及退火材X-ray繞射分析結果。顯示Mg-XLi合金中(X=6、11)，6Li試片主要為富Mg α 相，11Li者則轉為 β 富Li相為主。各試片軋延後具明顯纖維特徵，優選平面擁有較強的峰值，退火後經再結晶與晶粒成長，結晶面成長亂度高，優選平面峰值強度大幅減小，其他平面強度增加，晶粒方位較為均向。

表2為各試料基地微硬度測試，LA60-F與 LAZ1110-F硬度幾乎相同。LA60退火後硬度明顯下降，但LAZ1110驅勢恰相反，退火後基地硬度大幅上昇。本研究亦對各試料F材和O材之基地及第二相進行奈米壓痕測試，結果顯示如表3。LA60-F材經退火 β 相及 α 基地硬度值與楊氏模數下降，LAZ1110退火後 α 相及 β 基地硬度及楊氏模數則上升。

圖4顯示各試片拉伸曲線，發現四者應力應變曲線在超過降伏點以後均呈現因動態應變時效所造成之鋸齒狀跳動。LAZ1110強度較高且較早發生頸縮，經熱處理後更為明顯。由圖4所獲得之拉伸性質列於表4。LAZ1110強度均較LA60試片高，於F材狀態下 LAZ1110延性亦較佳，經退火後LAZ1110大幅下降。

表5顯示該二試料之F材之共振頻率差異不大，約在84~85Hz左右，各試料退火後共振頻率均略微下降。對數衰減率方面，各試料退火後 β 值上昇，制振性變佳，LA60-O對數衰減率較LAZ1110-O高。

圖5為本實驗試料於等出力值(1G, G=9.8m/sec²) 條件之D-N曲線。各試料退火後制振性變佳，由於各O材初始偏移量下降。尤其以LA60-O初始偏移量最低。由D-N曲線數據計算獲得知臨界破壞振動次數(即振動壽命)，LAZ1110退火後振動壽命略下降，LA60-O因制振性最佳，初始偏移量低且塑性變形量小，壽命為各試料最佳(圖6)。

圖7(a)(b)為LAZ1110-F裂縫傳播特徵，觀察到裂縫幾乎為直線傳播。圖7(c)為LAZ1110-O裂縫形態，主要為穿晶傳播。與F材相比，轉折及分歧明顯增加，

與裂縫沿著或穿越富Mg相顆粒成長有關。值得注意的是，LAZ1110沿晶界分佈的 α 富Mg相顆粒似乎具延遲裂縫傳播的能力，而退火後此種 α 富Mg相顆粒大量減少，導致振動壽命略為下降。圖8為LA60-F裂縫傳播，圖8(a)顯示裂縫傳播為部分沿晶、部分穿晶模式，且出現分歧。圖8(b)可判斷裂縫受晶界及原變形雙晶影響，造成分歧與轉折。此外，裂縫未有沿富Li相顆粒傳播的傾向。退火後因雙晶消失且晶粒粗大、晶界密度降低，LA60-O裂縫成長相對筆直，仍可見部份穿晶特徵(圖8(c))。

根據 Mg-Li 二元合金制振性相關研究指出[7]，Mg-10.5Li 的制振能力優於 Mg-6Li。但於本研究中，LAZ1110 的制振性質並未較 LA60 佳的結果看來，合金元素添加，尤其是 Al，對制振性有顯著負面效果[9]。至於 LAZ1110 經 250°C 退火處理機械強度大幅上升的原因可推測與部份 α 溶解，基地中 Al 固溶量可能增至 0.35wt%造成固溶強化所導致(圖 9)，此現象亦可能是造成 LAZ1110 經退火後制振性未明顯上升的原因。

四、結論

1. X-ray 證實，Mg-Li 合金鋰含量 6~11wt%成份變化，的確會使基地相由 α (HCP)富 Mg 相，轉為 β (BCC)富 Li 相。LA60 與 LAZ1110 退火後，晶粒方位較為均向。
2. LAZ1110-F 的降伏強度、拉伸強度、伸長量、加工硬化率皆較 LA60 大，機械性質表現優異。但該試料經 250°C 退火後強度不降反增，延性亦下降，經推測與基地 Al 固溶量增加有關。
3. LA60 與 LAZ1110 F 材退火後共振頻率均略為下降，制振性變佳。其中 LA60-O，其制振性及等出力值條件下振動壽命最為優異。
4. LAZ1110-F 經退火後 α 相與 β 基地強度大增，裂縫沿未溶解之 α 相顆粒傳播傾向，但退火後沿晶界分佈的 α 相大量減少，導致振動壽命略下降。

五、致謝

本研究蒙行政院國家科學委員會經費贊助(NSC96-2815-C-259 -005 -E)，作者深表謝忱。

六、參考文獻

- [1] Magnesium and Magnesium Alloys, (ASM International, Materials Park, OH, USA, 1999) p. 51.
- [2] H. Takuda, H. Matsusaka, S. Kikuchi and K. Kubota, J. Mater. Sci. 37 (2002) 51.
- [3] Z. Drozd, Z. Trojanová and S. Kúdela, J. Alloy. Comp. 378 (2004) 192.
- [4] H. Zhong, P. Liu, T. Zhou and H. Li, J. Univ. Sci. Tech. Beijing, 12(2005) 182.
- [5] J. M. Song, T. S. Lui, G. F. Lan, L. H. Chen, J. Alloy. Comp. 374 (2004) 233.
- [6] R. F. Steidel, Jr., An Introduction to Mechanical Vibrations, Third ed., John Wiley & Sons Comp. (1989) p. 169.
- [7] 周鼎堯 吳錫侃 張世航 童山，中華民國 2006 年材料年會。
- [8] J. M. Song, T. S. Lui, H. W. Chang and L. H. Chen: Scripta Mater., 54 (2006)399.

表 1 試片成份 (wt%)

	Li	Al	Zn	Mg
LAZ1110	11.2	0.95	0.43	Bal.
LA60	5.71	0.11	0.01	Bal.

表2 微硬度測試

	Hardness(HV)
LAZ1110-F	55.97
LAZ1110-O	70.72
LA60-F	56.10
LA60-O	46.75

表3 實驗材料基地奈米壓痕測試結果(GPa) (H：硬度；E：楊氏係數)。

	α phase		β matrix	
	H	E	H	E
LAZ1110-F	1.64±0.03	60.25±3.14	0.94±0.01	47.06±0.52
LAZ1110-O	2.04±0.02	70.07±4.32	1.13±0.02	51.88±1.45

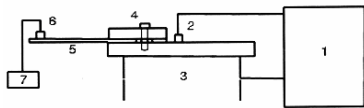
	α matrix		β phase	
	H	M	H	M
LA60-F	1.02±0.02	51.16±0.8	1.7±0.01	55.7±1.37
LA60-O	0.66±0.01	39.4±2.1	0.94±0.03	41.6±0.45

表4 拉伸試驗結果

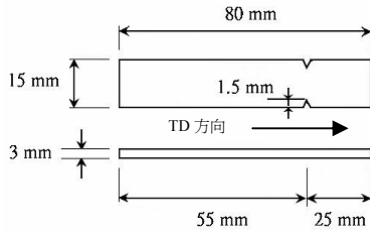
	YS (MPa)	UTS (MPa)	EL (%)
LAZ1110-F	120.75	148.80	56.87
LAZ1110-O	128.55	192.83	28.92
LA60-F	86.88	130.11	34.83
LA60-O	39.51	124.43	38.63

表 5 振動性質

	Resonant frequency (Hz)	Logarithmic decrement (δ)
LAZ1110-F	85 $\pm$ 1	0.0085
LAZ1110-O	83 $\pm$ 1	0.0102
LA60-F	84 $\pm$ 1	0.0084
LA60-O	81 $\pm$ 1	0.0111

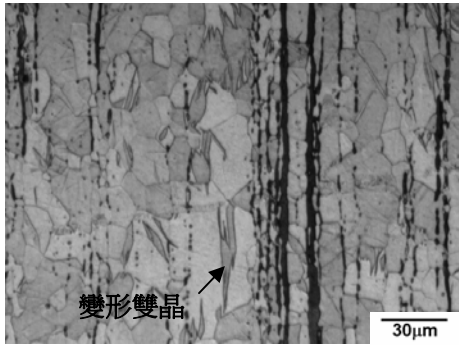


(a)

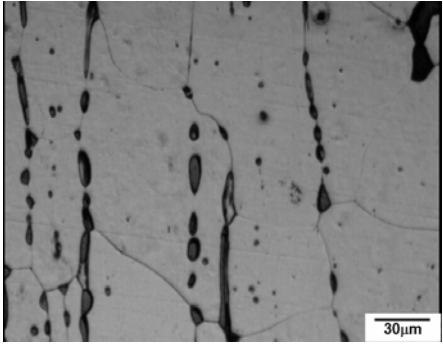


(b)

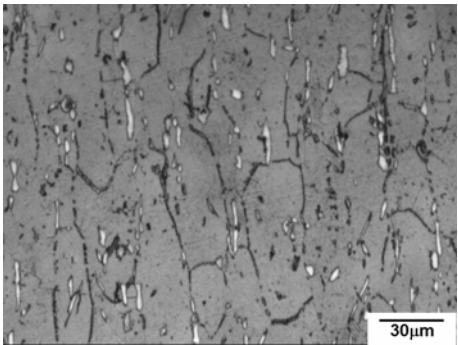
圖1 (a)振動試驗機示意圖。(1. vibration controller; 2. acceleration sensor; 3. vibration shaker; 4. specimen clamp; 5. specimen; 6. deflection sensor; 7. recorder.)
(b)the dimension of test specimens (unit : mm)



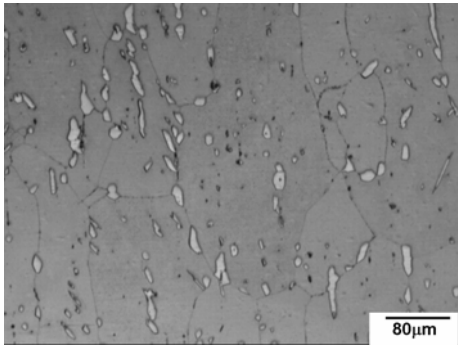
(a)



(b)

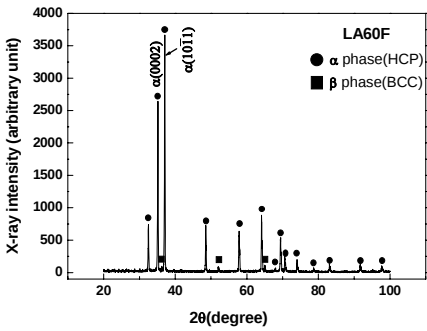


(c)

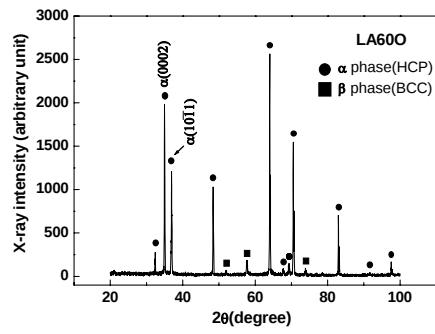


(d)

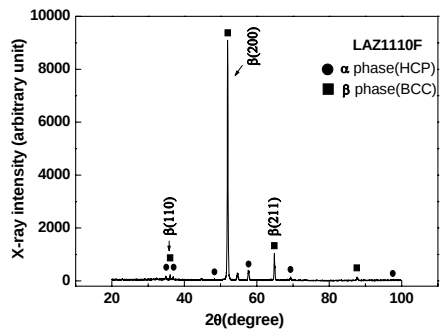
圖2 試片金相組織(a)LA60-F；(b)LA60-O；
(c)LAZ1110-F；(d)LAZ1110-O。(RD為法線方向)



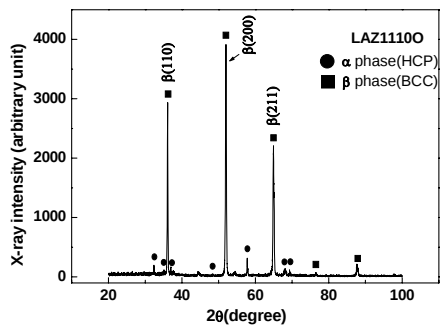
(a)



(b)



(c)



(d)

圖3 X-ray繞射圖形(a)LA60-F；(b)LA60-O；
(c)LAZ1110-F；(d)LAZ1110-O。

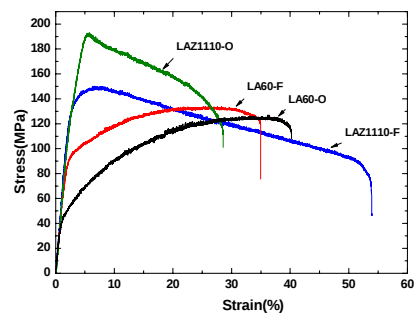


圖4 各試料拉伸曲線圖

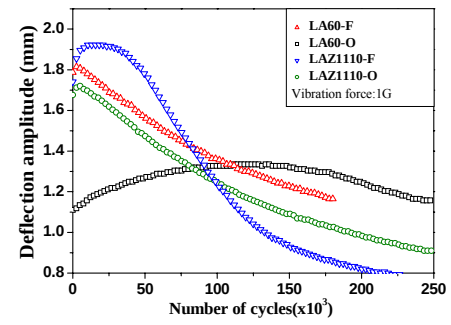


圖5 D-N 曲線圖

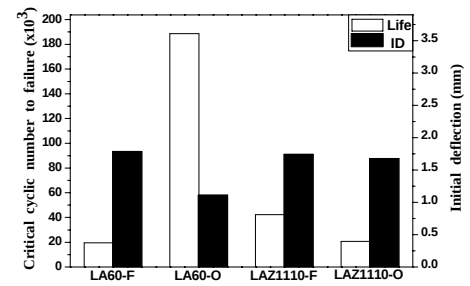
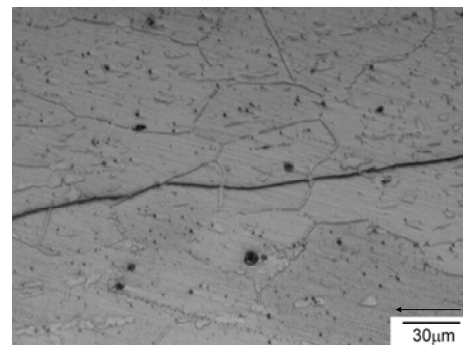
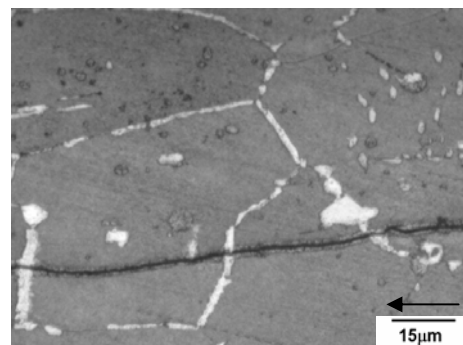


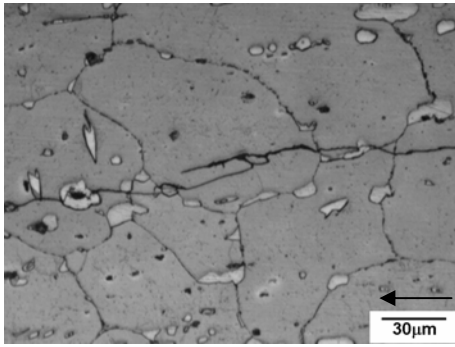
圖6 實驗材料之振動壽命與初始偏移量



(a)



(b)



(c)

圖7 (a)(b)LAZ1110-F；(c)LAZ1110-O之裂縫傳播形態(← 指向為裂縫傳播方向)

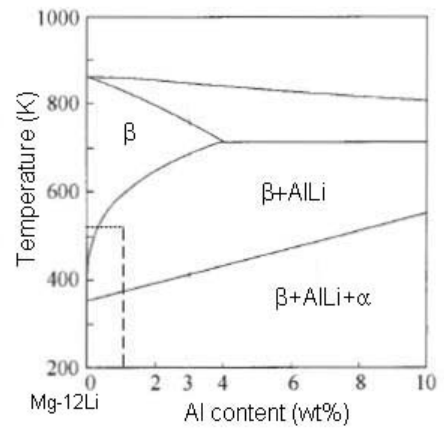
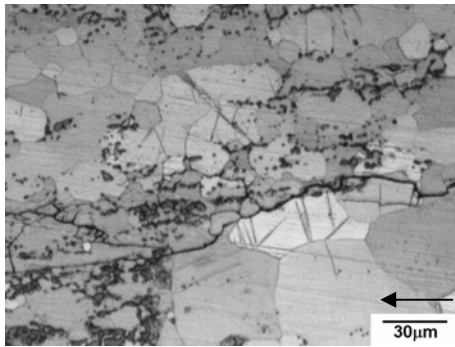
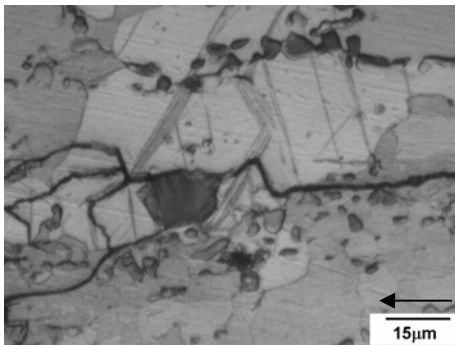


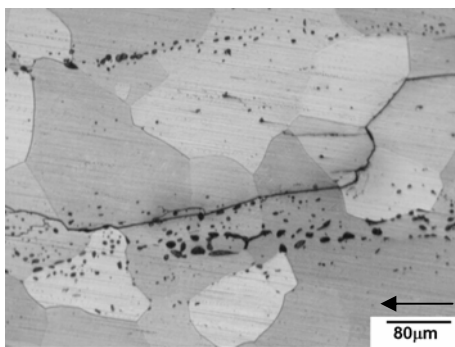
圖9 Mg-12wt%Li-XAl擬二元相圖(重繪自文獻[4])



(a)



(b)



(c)

圖8 (a)(b)LA60-F；(c)LA60-O之裂縫傳播形態(← 指向為裂縫傳播方向)