

## 鋁鋰合金之擠型製程與性質

PROCESSING AND PERFORMANCE OF  
ALUMINUM-LITHIUM ALLOY EXTRUSIONS

楊梓群

國立勤益技術學院機械工程系

## 摘要

在幾種輕元素中，鋰元素是唯一可溶於鋁合金中並獲得減輕重量之金屬。鋁鋰合金 (Aluminum-Lithium Alloy) 的性質較傳統的鋁合金擁有低密度、高強度、高剛性、高抗疲勞性之優點，為近年來除複合材料外亦較熱門之航空材料，1982 年已有商業化產品問世，且引起全世界航空製造界的重視。而目前鋁鋰合金之成型技術及製程可分擠型 (Extrusion)、機製加工、熱處理、鑄造、鍛造 (Forging)、銲接、滾壓 (Rolling)、化學蝕刻、表面處理、超塑成型 (Superplastic forming) 等方式，本文乃針對鋁鋰合金的擠製成型加工的方式及特性作一深入探討，希望能提供讀者對鋁鋰合金擠型製程有一概略性的瞭解，並能在機構零件設計時應用參考。

關鍵辭：鋁鋰合金、擠型製程

## 一、前言

目前世界各國所使用的航空器，在其結構件上所用之材料，鋁合金約佔 70%-80%，佔有極大之份量，因此如何將航空器之重量減輕且又能改善結構件之機械性質，莫不從鋁合金方面著手改進，在幾種輕元素中，鋰元素是唯一可溶於鋁合金中，並可獲得減輕重量效果之金屬；而在此前提下，鋁鋰合金 (Aluminum-Lithium Alloy) 因而成爲最被積極研究之對象。

鋁鋰合金較傳統之鋁合金更具有質輕 (因加入鋰之故)、強度高、高剛性 (High stiffness)、抗疲勞性高等諸項性能，所以此材料是目前航太空界最熱門之材料；但目前卻尚未能夠大量地使用於工業上，原因是有些性質還需做點改進，如破裂韌性 (Fracture toughness)、S-T 沿伸率、回收技術等，但最大問題是在鋰元素本身價格太高，而間接促成鋁鋰合金價格亦高之情況，但不管其價位如何，依鋁鋰合金本身的特性，在航空器上的應用仍具有相當大的發展空間。

鋁鋰合金的發展，從 1924 年到現在，已有七種商用合金在美國鋁學會註冊，有分別爲 2090 合金，2091 合金，8090 合金，8090A 合金，8091 合金，X8092 合金，X8192

合金，其中 2090 合金、2091 合金、8090 合金、8091 合金等四項較受航空工業重視。

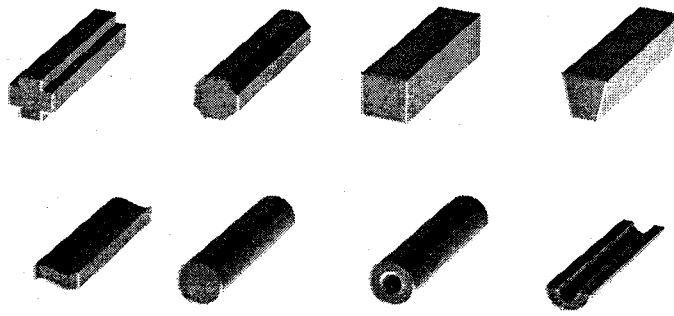
表一 美鋁協會註冊之商用鋁鋰合金之化學成份

Element	2090 Alcoa August 6,1984	2091 C.Pechiney April 1985	8090 Alcan and C.Pechiney May 1985	8090A Alcoa Late 1985	8091 Alcan March 29,1985	X8092 Alcoa May 1985	X8192 Alcoa August 1985
Si	0.10	0.20	0.20	0.10	0.30	0.10	0.10
Fe	0.12	0.30	0.30	0.15	0.50	0.15	0.15
Cu	2.4-3.0	1.8-2.5	1.0-1.6	1.1-1.6	1.8-2.2	0.5-0.8	0.4-0.7
Mn	0.05	0.10	0.10	0.05	0.10	0.05	0.05
Mg	0.25	1.1-1.9	0.6-1.3	0.8-1.4	0.5-1.2	0.9-1.4	0.9-1.4
Cr	0.05	0.10	0.10	0.05	0.10	0.05	0.05
Ni	-	-	-	-	-	-	-
Zn	0.10	0.25	0.25	0.10	0.25	0.10	0.10
Ti	0.15	0.10	0.10	0.15	0.10	0.15	0.15
Li	1.9-2.6	1.7-2.3	2.2-2.7	2.1-2.7	2.4-2.8	2.1-2.7	2.3-2.9
Zr	0.08-0.15	0.04-0.16	0.04-0.16	0.08-0.15	0.08-0.16	0.08-1.5	0.08-1.5
Other : each	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
total	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

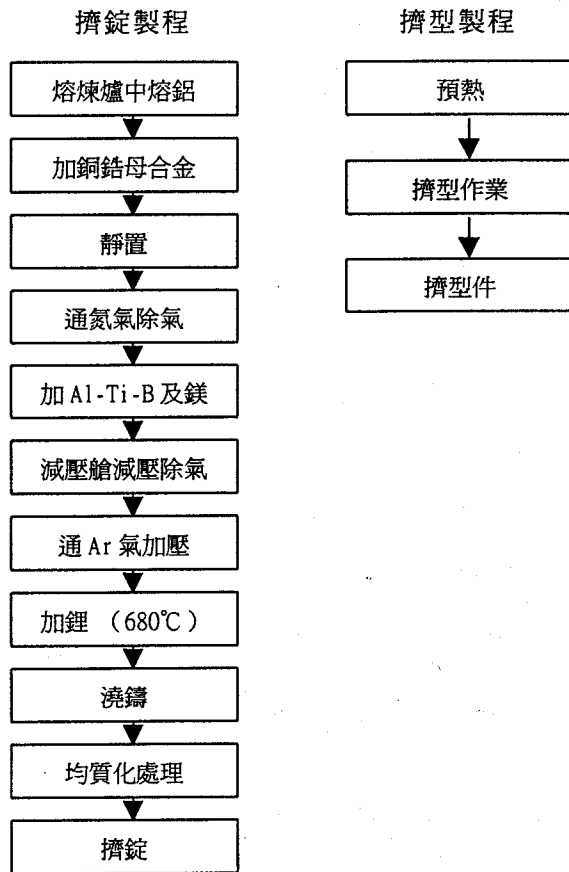
針對航空器零件特性所需，鋁鋰合金之成型技術及製程可分擠型 (Extrusion)、機製加工、熱處理、鑄造、鍛造、銲接、滾壓、化學蝕刻、表面處理、超塑性成型 (Superplastic forming) 等十項，本篇主要在說明鋁鋰合金之擠型製程及其特性。圖一所示為各種擠型件之形狀。

表二 鋁鋰合金發展上之重要事項

1980'S	New Alcoa, Alcan, Pechiney Alloys Introduced Unprecedented Expansion of R&D Activities Navy/Alcoa Ingot Al-Li Casting And Alloys
1982	Development AFWAL/Boeing P/M Al-Li Alloys Development
1978	DARDA/AFWAL/Lockheed, P/M R&D Navy/Reynolds, Al-Li I/M R&D
1976	Navy/Alcoa Al-Li Fracture Toughness Studies
1974	Withdrawal of 2020 Navy/Alcoa, Al-Mg-Li Alloys Development
1972	Fulmer Research Inst., patent on Al-Mg-Li Alloys
1971	Fulmer Research Inst., R&D studies began on Al-Mg-Li Alloys
1969	Soviet Patent on Al-Mg-Li Alloy 01420
1960's	Soviet Reports on Al-Mg-Li Research
1961	Soviet Studies on Al-Cu-Li-Mg-Cd Alloys, VAD23 introduced
1958	Introduction of X2020 (Alcoa), Use on RA-5C Vigilante Patent, Melting Al-Li Alloys (Pechiney)
1950's	Phase Diagram Studies on Al-Li Alloys (Great Britain)
1942	U.S. Patent Application Al-Cu-Li-X Alloys (Alcoa/Le Baron)
1927	U.S. Patents, Al-Li Alloys (Al- <40% Li & Al <0.5% Li)
1924	Small Amounts of Li Added to Al-Zn-Cu Alloys (Germany)



圖一 各式各樣擠型件形狀



圖二 鋁鋰合金擠型加工之製程

## 二、擠型製程

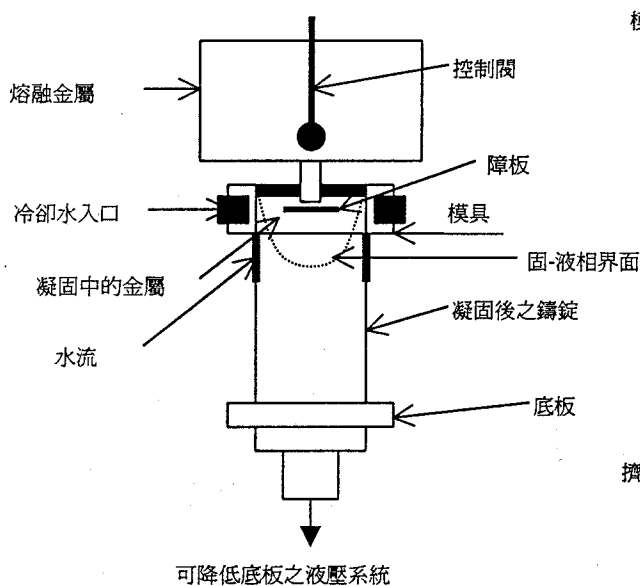
所謂擠型是指在高壓下將金屬塊擠壓流經模具之開口，而使金屬塊截面積變小之一種加工法；一般鋁鎂合金之擠型製作過程如圖二所示，各項說明於後。

### ①熔煉：

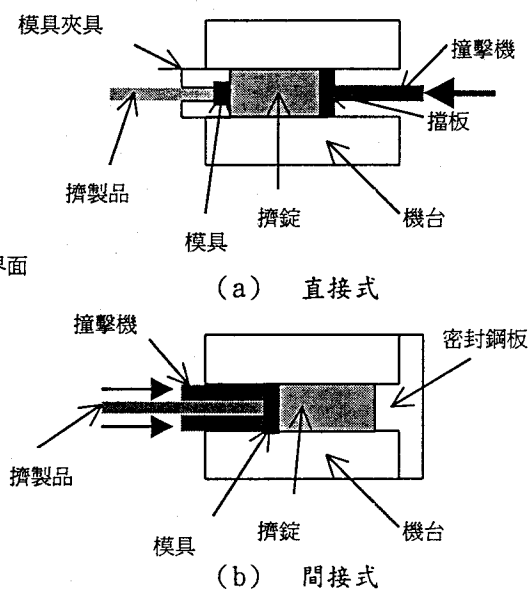
熔煉目地是要將鋁基材料中添加部份元素，而調合出所要之材質。因單獨元素無法溶解於鋁材中，故須使用母合金，這裡我們使用銅鋁母合金來調出鋁銅合金，並於 750℃ 下靜置一段時間使其能充份均勻分佈，且須通氮氣來除去鋁熔液中之氫氣，氫氣是造成擠錠上有針孔之主要原因，故極須將它除去；通氮氣除氣後接著加 Al-Ti-B 及 Mg，有接種之效果，使晶粒細化。熔煉所使用的爐具較常用的有電阻爐、高週波感應電爐、燃油爐、反射爐等，其中以高週波感應電爐為佳，因其加熱速度快可減少加熱時間及氧化問題。

### ②擠錠鑄造：

將上述之鋁熔液移至減壓艙中減壓除氣（真空除氣），並通入 Ar 氣加壓使成為惰性氣氛來保護鋁液；於 680℃ 時加入鎂合金，充份融解後倒入鐵模中，而成擠錠；或者使用直接冷卻連續鑄造法，（如圖三所示）鑄造出我們所要之擠錠。擠錠規格大部份須視擠型壓力大小來作調整，較常用者為  $\phi 10 \times L40\text{cm}$ 、 $\phi 7.5 \times L23\text{cm}$ 。一般所常使用之材料有 2090 (Al-Cu-Li) 合金、8090 及 8091 (Al-Li-Cu-Mg) 等合金。



圖三 直接冷卻連續鑄造法



圖四 兩種基本型態的擠製方法

### ③擠錠均質化處理：

主要目地是要減少 Al-Li 合金在凝固時所產生之偏析現象，以增加加工性（擠型性）、改善擠錠表面狀況及機械性質。均質化處理溫度一般為低於材料溶解溫度約 15—

50°C 之間，2090 合金及 8090 合金均質化溫度為 541°C，2091 合金及 8091 合金均質化溫度為 532°C，均質化處理時間為 24 小時。

#### ④擠錠預熱：

一般較常採用的加熱方式有燃氣式、高週波加熱、電阻式加熱、燃油式等；預熱溫度為 524°C-537°C。

#### ⑤擠型作業：

圖四可說明擠型作業之模具機構及方法。擠型作業可分直接擠型及間接擠型兩種方式，間接擠型摩擦阻力較小，擠型作業時能量可減小，通常擠型壓力在 640TON 左右，行程為 8.25cm；擠型比為 10：1 及 64：1，擠型速率為每分鐘 15—56cm，擠型作業時需有冷卻裝置。擠型方式又可分為向前擠型（Ahead extrusion）及向後擠型（Back extrusion）兩種，擠壓件方向與施壓方向相同者稱為向前擠型；擠壓件方向與施壓方向相反者稱為向後擠型。

#### ⑥校直：

擠型件可能受到模具、壓力、溫度等因素而會有受變形情況發生，故須將擠型件校正成直。

#### ⑦熱處理：

一般擠件須作時效熱處理，即 T6 或是 T651 (T8) 處理，2090、8090 合金加熱至 541°C 保持 60 分鐘，8091 為 532°C 保持 30 分鐘，後水淬於 20°C，最後作人工時效處理，於 190°C 維持 36 小時；或是先作塑性變形（將擠型件拉伸變形 1%-2%）再作人工時效處理，於 190°C 維持 6-7 小時。

### 三、影響擠型作業的因素

影響擠型作業的變數甚多，如下說明：

- ①擠錠的性質：受擠錠的成份、鑄造組織等的影響。
- ②擠型模具：舉凡模孔位置、模孔形狀、擠型模承面（Bearing）等，模具設計不當，易造成流線不平順，阻礙擠型作業。
- ③擠錠溫度：一般來說擠錠溫度高可降低使用能量，縮短加工時間。
- ④擠錠筒溫度：擠錠筒溫度一般設定在比擠錠溫度低約 50°C，因在擠型作業時擠錠筒溫度會再提升與擠錠溫度相同。
- ⑤擠錠之長度：擠錠的長短直接影響到擠型壓力，擠錠長者所須壓力則大，且推桿行程亦長，所費能量亦高，擠型作業時間亦增長。
- ⑥擠速：擠速與擠型壓力亦成一正比方式，壓力使用愈高則擠速愈快，反之則愈慢。

表三 各種鋁合金之擠溫及擠速

合金	1050	1100	2011	2014	2017	2024	3003	4032	4043	5052	5056
擠出速率 (m/min)	100	90	8	6	6	4	60	6	30	20	7
擠型溫度 °C	400-480	400-480	435-500	375-430	375-430	365-420	400-480	390-410	420-470	400-500	420-480
合金	5083	6063	6061	6101	6151	6351	6463	7003	7N01	7075	
擠出速率 (m/min)	3	70	40	50	40	40	60	40	25	2	
擠型溫度 °C	420-480	430-520	430-500	430-500	430-480	430-500	430-500	430-500	430-480	360-400	

①擠型比 (Extrusion ratio)：所謂擠型比是指擠錠截面積與擠件截面積之一比值，如下式所示：

$$R = A_0 / A_f \dots\dots\dots (1)$$

- R : 擠型比
- A<sub>0</sub> : 擠錠截面積
- A<sub>f</sub> : 擠件截面積

一般鋁合金之擠型比約在 8~30 之間，當擠型比若小於 8 時較難消除擠錠上之空孔、偏析、晶粒粗大等缺失，擠件難有較大之強度。圖五為擠型加工率對擠型件機械性質之影響；

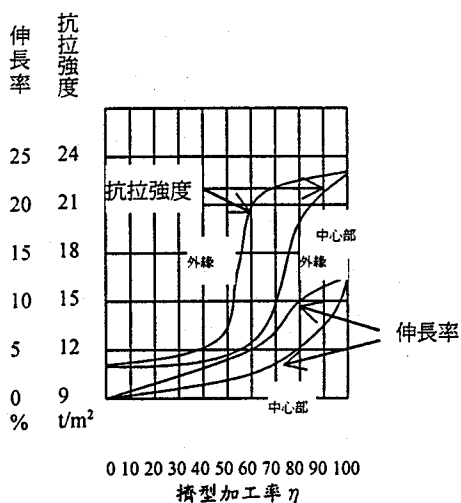
$$\eta = (A_0 - A_f) / A_0 \dots\dots\dots (2)$$

η : 擠型加工率

當 η = 90% 時，A<sub>0</sub> - A<sub>f</sub> = 0.9 A<sub>0</sub>，A<sub>f</sub> = 0.1 A<sub>0</sub>  
 R = A<sub>0</sub> / A<sub>f</sub> = A<sub>0</sub> / 0.1 A<sub>0</sub> = 10

當 η = 50% 時，A<sub>0</sub> - A<sub>f</sub> = 0.5 A<sub>0</sub>，A<sub>0</sub> = 0.5 A<sub>0</sub>  
 R = A<sub>0</sub> / A<sub>f</sub> = A<sub>0</sub> / 0.5 A<sub>0</sub> = 2

由此可知擠型比大於 10 時，擠件會具有較大之強度。



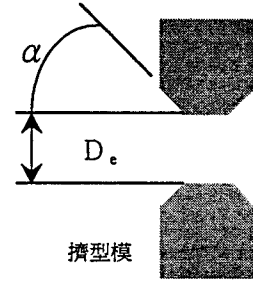
圖五 擠型加工率對擠件機械性能影響

⑧擠型性：所謂擠型性是指材料接受擠型製程之難易程度，指數愈高表示愈好擠，反之則愈難擠；擠型性主要是受到擠型壓力、擠型溫度範圍、推桿之擠速、最大擠型比等因素支配。

⑨變形率 (Strain rate)：變形量是指在擠型作業時，擠錠受到壓力往前擠壓，通過模孔成為擠件之變形速率。

$$\varepsilon = \frac{6vD_b^2 \ln R \tan \alpha}{D_b^3 - D_e^3} \dots\dots\dots (3)$$

- $\varepsilon$  : 擠件之變形速率
- $R$  : 擠型比,  $= A_0 / A_f = D_b^2 / D_e^2$
- $v$  : 擠型推桿速度 (Extrusion speed)
- $D_b$  : 擠錠筒直徑 (Dia. of billet)
- $D_e$  : 擠型件直徑 (Dia. of Extrusion)
- $\alpha$  : 半模角 (Semidie angle)



圖六 擠型模示意圖

當  $\alpha = 45^\circ$  時

則

$$\varepsilon = \frac{6vR^{3/2} \ln R}{(R^{3/2} - 1)D_b} \dots\dots\dots (4)$$

當在擠型作業時，鋁鎂合金之晶粒會因受擠壓而沿變形方向伸長，其所沿生之次晶粒大小為：

$$d^{-m} = a + b \ln \left[ \varepsilon \exp(Q/RT) \right] \dots\dots\dots (5)$$

- $a, b, m$  : 常數
- $Q$  : 擴散活化能
- $R$  : 氣體常數
- $T$  : 絕對溫度

其補償變形量 (Compensated strain rate, Zener-Holloman parameter) 為：

將 (5) 式及 (4) 式整理後得到

$$d^{-m} = a + b \ln Z \dots\dots\dots (6)$$

當在室溫下沿變形方向之強度 (Strength) 為：

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-p} \dots\dots\dots (7)$$

- $\sigma_0, k, p$  : 常數

⑩擠型壓力 (Extrusion Pressure)：

一般在擠型作業時，要特別留意擠型比、變形量、擠錠之預熱溫度 (Billet temp) 這三個參數，因為這些參數會影響到加工硬化速率 (Strain hardening rate; Work hardening

rate)、擠件的變形大小 (Strain hardening) 及微結構的改變, 這些都會影響到最後擠型件的性質; 從實驗上可證明擠型溫度及擠型比影響到擠型能力及擠型件之性能, 尤其是擠錠之預熱溫度會影響到擠型作業時所產生之動態現象, 會改變回復 (Recovery) 及再結晶 (Recrystallized) 之速率, 由以上之參數最後決定了我們最大的擠型壓力 (Max. Extrusion Pressure)。依據滑線場理論 (Slip-line field theory) 可得到

$$P = a + b \ln R \dots\dots\dots (8)$$

P : 最大擠型壓力  
a, b : 擠型常數  
R : 擠型比

或是由 Thermally Activated Process 亦可得到

$$P = \frac{1}{\alpha n} \left( a + b \ln R + c \ln \frac{Z}{A} \right) \dots\dots\dots (9)$$

P : 最大擠型壓力  
a, b, c : 擠型常數  
R : 擠型比  
Z : 補償變形量 (Compensated strain rate)  
 $\alpha, n, A$  : 組成常數 (Constitutive constant)

#### 四、擠型作業之重要特性

在高銅含量的 Al-Li-Cu 合金及 Al-Li-Cu-Mg 合金, 當其材料成份若增加鎂元素的含量時, Mg 會抑制  $\theta'$  相 ( $\text{CuAl}_2$ ) 的形成, 而產生 S' 相 ( $\text{Al}_2\text{CuMg}$ ),  $\delta'$  相 ( $\text{Al}_3\text{Li}$ ) 並不會很顯著地受到影響; 在高鋰低銅含量的 Al-Li-Cu 合金及 Al-Li-Cu-Mg 合金, Mg 增加會將  $T_1$  相 ( $\text{Al}_2\text{CuLi}$ ) 完全抑制住。鋯在合金含量中主要是扮演控制晶粒結構的角色, 鋯與鋁會形成一細小的  $\text{Al}_3\text{Zr}$  散播物 (Dispersoid), 此細小的  $\text{Al}_3\text{Zr}$  散播物可阻擋晶界的移動, 而抑制晶粒成長。

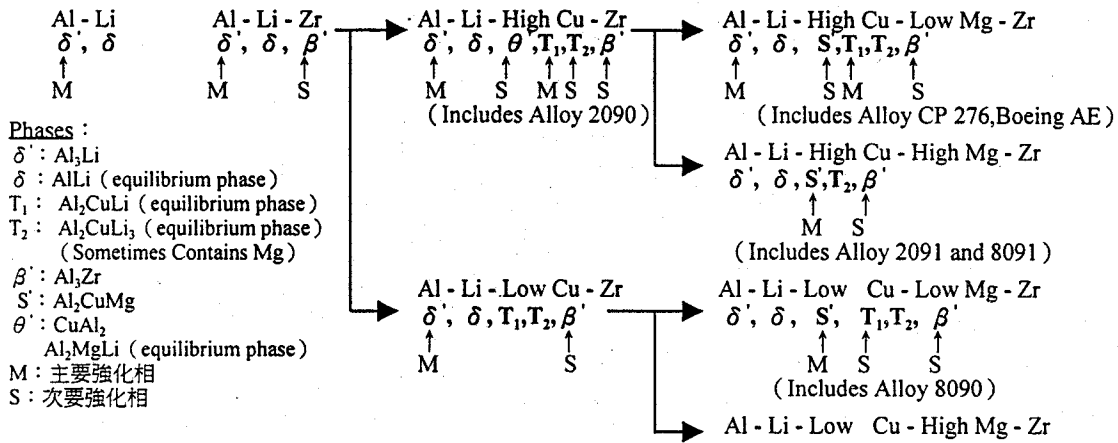
在 Al-Li-Cu 合金及 Al-Li-Cu-Mg 合金在擠型時, 當其材料成份若增加 Mg、Cu、Zr 元素時, 可以增加合金中的強度及韌性的相配合性, 但若 Mg 元素的含量過多時, 將會降低其擠型之工作範圍, 且會影響到擠型材料在流動時之強度, 更會使材料在開始熔解時有較高之表面撕裂性, 且會有些微減低彈性係數須特別注意。

顯微組織之檢查是評估其合金之重要方法, 由顯微組織來判定擠型能力、擠型件性能及熱處理之效果, 可作為失敗之原因分析及一新製程之成效評估。如圖八所示, 說明當擠型溫度在  $350^\circ\text{C}$  擠型比 10:1 時, 擠件沿擠型方向變形, 其晶粒亦是沿變形方向伸長形成長條晶粒, 同時會因有回復現象而有次晶粒形成。當擠型溫度在  $350^\circ\text{C}$  擠型比改成 17:1 時, 同樣是長條晶粒, 但其組織會變的較細長, 次晶粒也會減少; 由此可知, 當擠型比越大時其晶粒就越細長。再結晶之晶粒是長條形, 當塑性變形量增加時其再結晶粒會較小, 反之則較粗。若材料中含有 Mg、Cr、Zr 也會影響到再結晶粒之形狀, 溫度亦會影響到再結晶之成長。顯微組織影響擠型件之機械性質甚大, 當

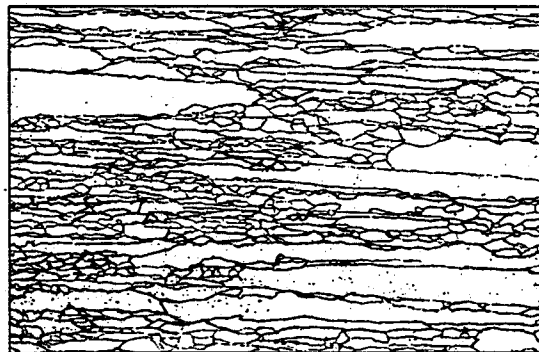


有較細長之結晶粒時，擠型件在縱向之抗拉強度及降伏強度要比橫向面要來的高，約是大於 600Mpa。

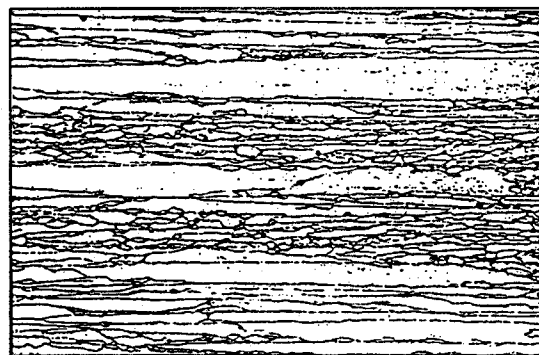
Al-Li-Cu 合金及 Al-Li-Cu-Mg 合金在擠型時，我們通常會將擠型材料在流動時之強度增加，降低 Mg 的含量，減少在熔化時之表面撕裂性；也可藉著擠型比的調高及預熱溫度的增加，來改變顯微組織，增加擠型件之機械性質。2090 合金與 6061 的擠型速度及擠型性能相似，將來必會逐漸發展 2xxx 及 7xxx 等之高強度合金之擠型加工。



圖七 鋁鋰合金系統中成份與相之關係

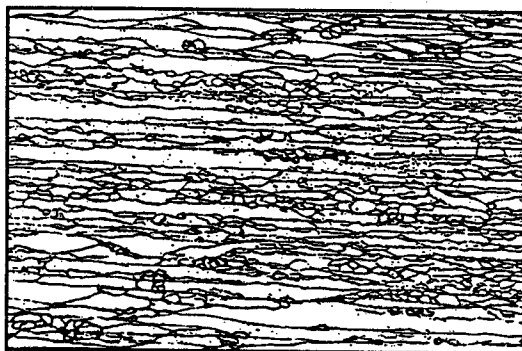
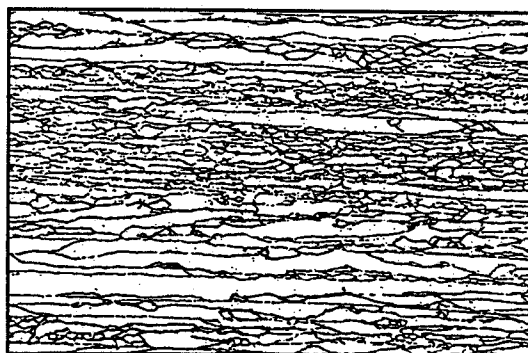


(a) T=350°C , R=10 : 1



(b) T=350°C , R=17 : 1

圖八 2090 擠件熱處理後沿擠型方向之金相組織

(c)  $T=450^{\circ}\text{C}$  ,  $R=10:1$ (d)  $T=450^{\circ}\text{C}$  ,  $R=17:1$ 

圖八 2090 擠件熱處理後沿擠型方向之金相組織 (續)

## 五、結語

由於鋁鋰合金擁有較大之剛性，相對的對彎曲時之材料的沿展性會較差，並且會有較大的回復量存在，此項缺點現可藉著熱處理來改善，由實際上的製造經驗告訴我們，若原料先經退火處理，再預擠成型，再作固溶熱處理，再擠製完全成型，最後作時效處理，此製程可避免因成型時之脆裂及回復量過大的情況，同時還能保持材料原有的機械性質。依照目前市場的需求及鋁鋰合金的開發狀況，擠型零件因有高的材料使用率（亦即低的 Buy To-Fly 比例）、以及有較低的製造成本及高的結構完整性，相信將來必成為鋁鋰合金製造上的主要加工法。與複合材料相比較，Al-Li 合金的製造成本較為低廉，是為其競爭上最大之有利因素。基本上 Al-Li 合金可沿用傳統鋁合金之加工機具、技術及觀念來生產零件，但因材料特性關係，須將部份的製造條件加以修改，以能有較順利的製程；其中以擠型加工法最適合於 Al-Li 合金的零件製作，雖製作成本較傳統鋁合金的數倍，但在生產成本增加有限下，要比複合材料更有所發展。

## 六、參考文獻

1. John E. Hatch, Aluminum: Properties and Physical Metallurgy, ASM 1984
2. A.K. Vasudevan and R.D. Doherty, Aluminum Alloy-Contemporary Research and

Applications, Treatise on Materials Science and Technology Vol.31 Academic Press, INC. 1989

3. E.A. Starke Jr. and T.H. Sonders Jr., Proceedings of the Second International Aluminum-Lithium Alloys Conference, The Metallurgical Society of AIME, 1984, USA, p1
4. C. Baker, P.J. Gregson, S.J. Harris, And C.J. Ped, Proceedings of the Third International Aluminum-Lithium Alloys Conference, Institute of Metals, London, 1986
5. George Krauss, Deformation, Processing and Structure, Presented at the 1982 ASM Materials Science Seminar, ASM 1984
6. J.M. Howe, J. of Metals, vol.39, 1987, p13
7. B. Noble and G.E. Thompson, Met. Sci. J. vol.8 (1972), p167
8. T. H. Starke Jr., T. H. Sonders Jr. and I. G. Palmer, J. of Metals, vol. 33, 1984, p24
9. 潘毅宏, 先進鋁鋰合金於飛機結構應用之簡介, 薪薪季刊, 1992, 第20卷第三期, p58~p70