

鋁基複合材料擠製件的時效硬化特徵探討

Study of Aging Characteristics of Extrusion Component Materials of Aluminum Matrix Composite

劉秋霖* 蔡顯榮*

Chiou-Lin Liou Hsien-Lung Tsa

國立台灣科技大學機械工程學系

e-mail: cliou@mail.mit.edu.tw

摘要

本文所採用的試樣材料為鋁基複合材料，添加強化相 SiC 顆粒。而主要研究目的，是藉由過強化相的幾何參數及製程的燒結參數改變，對於時效曲線的影響，來找尋不同製程條件下試片之間，共有的時效特徵。但因為某些試樣的燒結參數，取值偏低的情況下，導致擠製加工後，試樣出現不正常的材料塑性變形現象--『異常心部』，以致必需要重新定義硬度量測點的區域。加上製程道次太多，試片顯微組織及基地成份過於複雜，最後尚需透過硬度量測值的極限落差，這個因子來分析時效曲線的波動原因。

試片經過時效處理及洛式硬度量測後，所得的龐大資料透過 Micro Excel 軟體的數據整理、繪圖分析，經過冷均壓力、燒結溫度、燒結時間三個參數的推導，可以定義出『燒結指標』，最後藉由『燒結指標』的分析探討，找到了鋁基複合材料擠製件之時效曲線的五個特徵；另外也證實了帶有『異常心部』的試片，其『異常心部』並沒有任何時效作用可言，而『環帶』區域依然保有良好的時效作用。

關鍵字：時效、強化相、鋁基複材

Abstract

In this research aluminum matrix composites with SiC as the enhanced particle were studied. The main purpose is to study the influence of the geometrical parameters of the

enhanced particles and the parameters of the sintering process on the aging curves of different specimen. The common characteristics of these aging curves were therefore reduced. The specimens were made under different sintering parameters, and some of the parameters (e.g. pressure for green compact, etc.) are relatively too low. As a result, "abnormal core" was presented in the specimens after the extrusion process. This metallographic phenomenon is the abnormal plastic deformation of materials. Therefore we must rearrange the region for the hardness testing. Moreover the manufacturing procedure was complex and included many steps. The microstructure of the specimens was so complicated that it was hard to define. So the registration of the limit difference of hardness testing was necessary to analyze the fluctuation of the aging curves.

Experiment data were sorted and analyzed by the software Microsoft Excel. Finally by studying and analyzing the "sintering indices", which was deducted from sintering parameters, we obtained five characteristics of the aging curves of the aluminum matrix composites. Besides we found that the "abnormal core" was not influenced by aging treatment, but the "annular zone" was normally aged by the heat treatment.

Keywords: aging、Component Materials、Precipitation

1. 前言

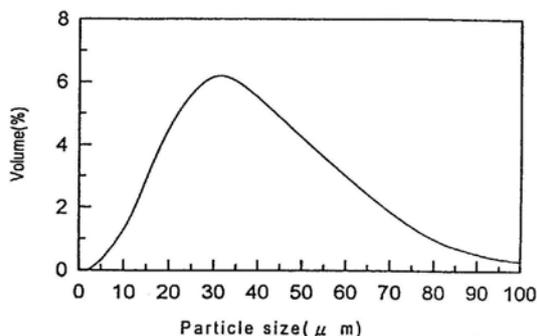
鋁基複合材料也是一種金屬基複合材料，通常有兩種製造方法，一種是採用混煉鑄造法，另一種是粉末冶金製程。混煉鑄造法是將鋁合金鑄錠及強化相顆粒同時置入高周波爐冶煉，爐外加裝超音波震盪器。由於強化相融點高出鋁合金非常高的溫度，因此鑄造後的材料，強化相與鋁基地的界面不是互融的合金成份，故稱為『不連續性強化相顆粒型的金屬基複合材料』；而粉末冶金製程後的材料，界面強度比混煉鑄造法低很多。

此類型之金屬基複合材料，其機械性質與物理性質佳，而且製程富有前瞻性的潛力，因此被受航太、國防及汽車業的重視，諸如機體結構中龍骨、縱樑、三叉戟飛彈的安定尾翼、汽車的活塞、保險桿等等均有運用此種材料製造。金屬基複合材料的性質由強化相及基地材料兩者搭配後，材料的顯微組織機構的組態所決定。由於強化相獨特的物理及機械性質，使金屬基複合材料比沒有添加強化相的基地母材，更有較優異的抗拉強度、比強度、耐磨耗、抗高溫潛變及低膨脹係數等特殊性質，這些性質在結構及非結構材料方面的運用，變得極為重要。

2. 實驗方法

2.1 實驗擠製成品試樣的選用材料

試樣是由 A6061 鋁合金粉末及碳化矽顆粒混合後，再經粉末冶金製程，製成擠錠。A6061 粉末平均粒徑為 100 μm ，而碳化矽顆粒



的平均直徑分別選用 3.5 μm 、20 μm 、40 μm ，

【圖 1】A6061 鋁合金粉末的顆粒直徑分佈曲線其成份如【表 1】及【表 2】所示。另外關於粉末的顆粒直徑分佈，可以參考【圖 1】。

【表 1】A6061 鋁合金粉末的元素成份

成份	Al	Mg	Si	Cu	Fe	Mn	Ni	Cr
Wt%	98.29	0.86	0.46	0.21	0.14	0.021	0.008	0.007

Source: ECKA

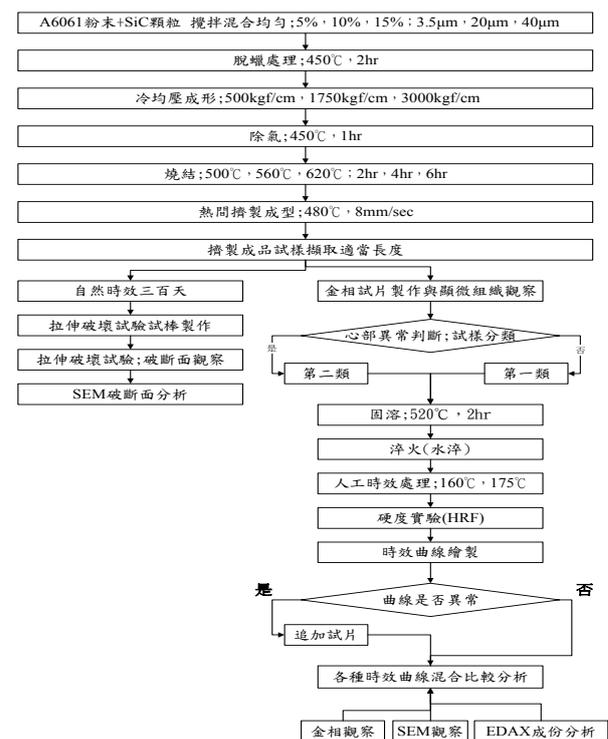
【表 2】碳化矽顆粒的元素成份

成份	SiC	Al	Fe	Ti	Ni	Ca	Cr	Mg	Mn
Wt%	99.4	0.2	0.15	0.12	0.03	0.03	0.01	0.00	0.00

Source: LOGITECH

2.2 實驗方法流程圖

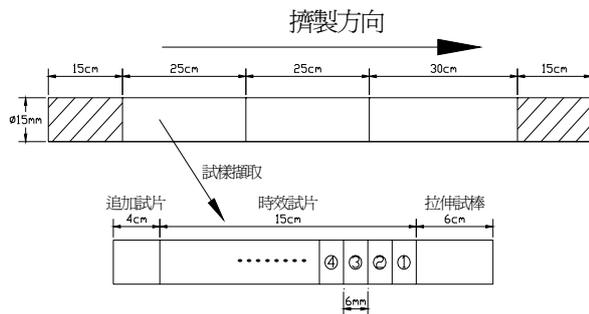
本實驗方法純粹屬於創新型，其中很多實驗輔助器材尚需自行設計與製作，其實驗方法流程圖如下：



2.3 擠製成品試樣擷取

將試樣前段及後段各切除 12-15cm，再將剩下試樣部份，分成三大部份，第一段作拉伸破壞實驗，主要研究方向為破斷面的觀察。第二段是擠製過程中，剛好接近製程中間時段的部份，是製程評估最佳的部份，保留作為其它重要試驗用，第三段是模具的溫度已降到某種

程度，然後再繼續完成擠製加工的部份。整個擠製成品試樣擷取試片的示意圖【2】。



【圖 2】擠製成品試樣擷取試片的示意圖

2.4 主要的實驗流程

本實驗主要是利用粉末冶金製程參數的改變，製作各種擠錠試樣，並在相同的擠製條件下，進行各擠錠試樣的擠製加工。然後再將擠製成品取樣切成金相試片，再進行兩面各取三個位置的洛氏硬度試驗，求取所要的實驗數據，詳細的實驗步驟流程述如下：

(1)混粉⇒(2)脫蠟⇒(3)冷均壓成形⇒(4)除氣與燒結⇒(5)熱間擠製成形⇒(6)擠製成品試樣擷取適當長度⇒(7)金相試片製作⇒(8)洛氏硬度試驗(H_RF)

2.5 主要的實驗設備

由於熱處理爐的熱電藕量測值與爐心的溫度實際值相差甚遠，因此必需重新架設溫度量測系統。



【圖 3】組裝後的熱處理實驗機台

由於試片種類高達 13 種，不能以傳統方式放置試片。傳統方式是將所有試片一個一個用細鐵絲綁好，集中於量測點下方，在按要求的時間一個一個拿出淬火。本實驗不能按此作法的原因是(一)爐心溫度會因開門次數太多，而回升溫度會偏差太多，有時差 2°C(二)其次是試片種類過多，爲了避免過於紛亂，所以必需要配位於載台上，同時載台每次放入爐心的位置亦要定位。所以就必需自製載台及載台定位組合基座。由於載台的試片座孔加工性質一樣，用 CNC 銑床製做，程式直接用單循環方式編寫。載台實際進爐定位如【圖 4】所示。

【圖 4】載台實際進爐定位



3. 結果與討論

3.1 時效試片的分區

因爲某些試片在核心地帶發生心部異常強化相與雜質聚集現象【1】，因此造成洛氏硬度 H_RF 量測有問題。爲了要明確地表達量測與核心地帶無關，所以將整個時效試片的斷面（垂直擠製方向）定義成三部份----(一)最外緣的邊界層(二)中間層的環帶(三)中央的『異常心部』或『心部』。

3.2 研究前的基礎參數定義

本實驗中，採用 A6061 鋁合金作爲基地材料，並搭配不同的碳化矽顆粒直徑及體積百分率作爲幾何參數。同時爲了形成各種不同的燒結強度，對每一種燒結參數均作三種尺度的變

(A)	無	無	46500	3000	620	2	C	O
-----	---	---	-------	------	-----	---	---	---

因，此為『第三時效特徵』。

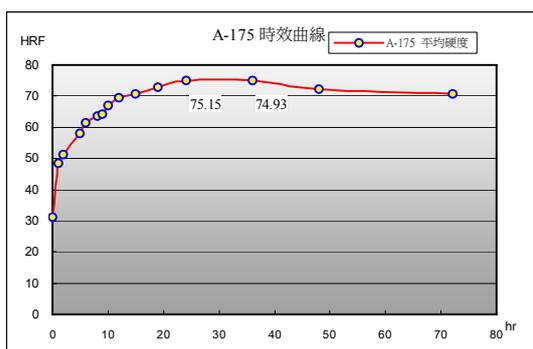
【表 5】試片 A，時效溫度 175°C 之硬度值

時效時間	位置一	位置二	位置三	位置四	位置五	位置六	平均硬度
0hr	29.9	34.1	35.4	25.9	31.7	29.6	31.10
1hr	53.6	48.4	49.3	47.1	47.7	45.3	48.57
2hr	50.9	55.6	51.3	48.8	51.5	49.9	51.33
5hr	59	59.2	60	55.9	55.9	57.7	57.95
8hr	62.5	61.8	60.9	59.9	61.5	61.6	61.37
9hr	64.6	64.3	64.8	63.5	62.4	61.9	63.58
10hr	66.4	67.3	65.8	62	62.5	61.7	64.28
11hr	67.2	68.5	69.1	65.3	65.9	66.8	67.13
12hr	70.6	70	70.1	68.8	69.1	68.9	69.58
15hr	71.5	72.5	72.8	69.5	68.5	70.1	70.82
19hr	73.3	74.9	72.3	72	71.6	72.5	72.77
24hr	76.4	75.9	76.3	74.3	74.2	73.8	75.15
36hr	75.6	76.3	75.1	75	73.8	73.8	74.93
48hr	74.2	72.9	73.1	70.8	71.8	70.6	72.23
72hr	71.9	71.3	70.7	69.8	69.6	70.5	70.63

將實驗數據經過夠過 Micro Excel 軟體的整理，可繪製時效硬化曲線如【圖 5】所示。

3.5 『異相核心』沒有任何時效作用可言

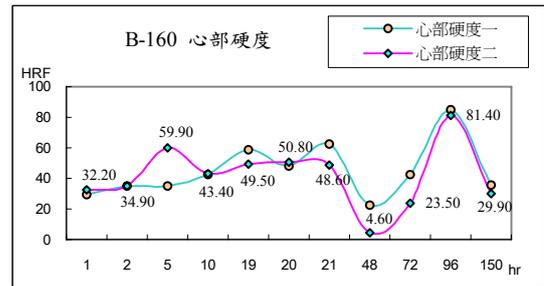
由於『異相核心』的出現，因此必需針對它的時效硬化加以研究及探討。根據 B 試片的時效硬化實驗結果，很顯然『異相核心』沒有任何時效作用可言。



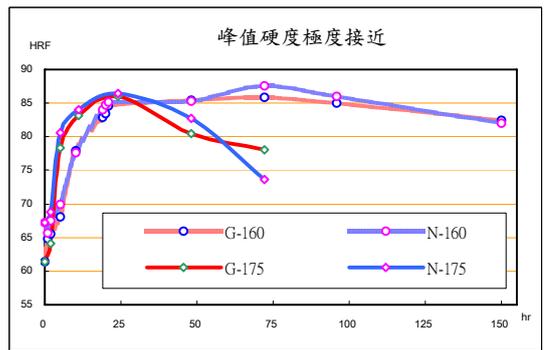
【圖 5】A 試片高溫 175°C 的時效硬化曲線

3.6 高溫與低溫的峰值硬度幾乎一樣的試片

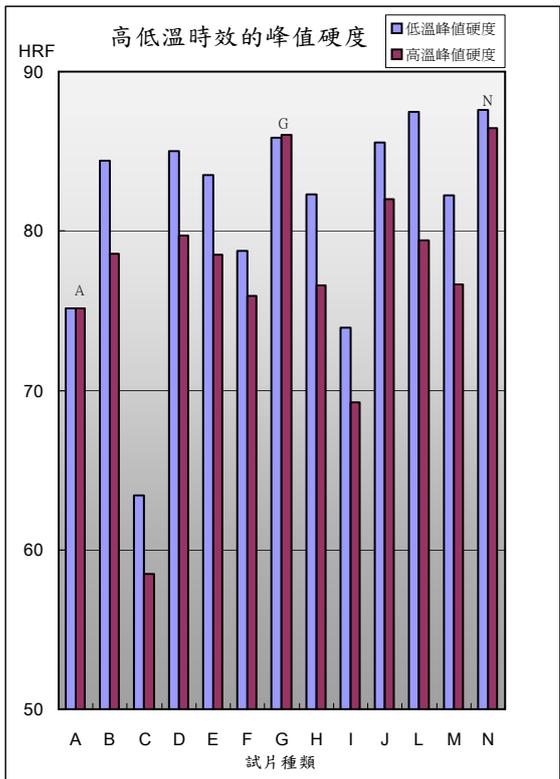
所有試片的硬度數據與時效硬化曲線求得之後，經過交叉比對後。從 Excel 的長條圖不難看出發現試片 A、試片 G、試片 N 的高溫峰值硬度與低溫峰值硬度幾乎一樣，其推測原



【圖 6】試片 B 的『異常核心』之加熱曲線



【圖 7】試片 N、試片 G 的時效硬化曲線

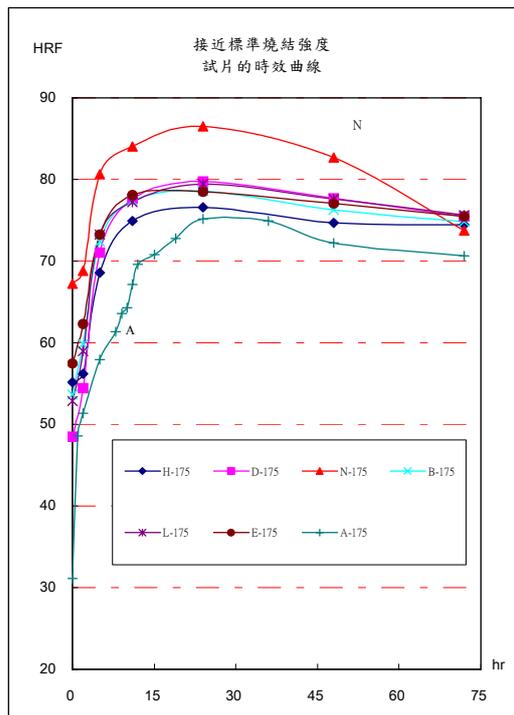


【圖 8】試片 A、N、G 的高低溫峰值硬度

3.7 人工時效硬化曲線的五種特徵

3.7.1 第一時效特徵：當試片的燒結強度接近

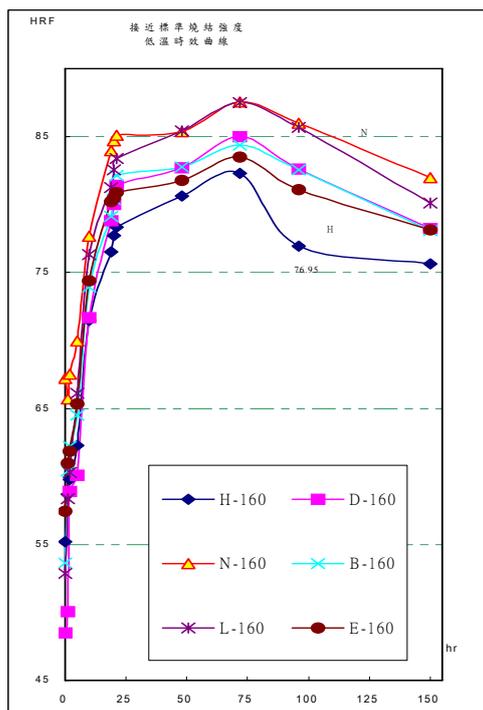
標準燒結指標 46500 的時候，曲線會完全落在標準燒結時效曲線地帶。



【圖 8】接近標準燒結強度的高溫時效曲線

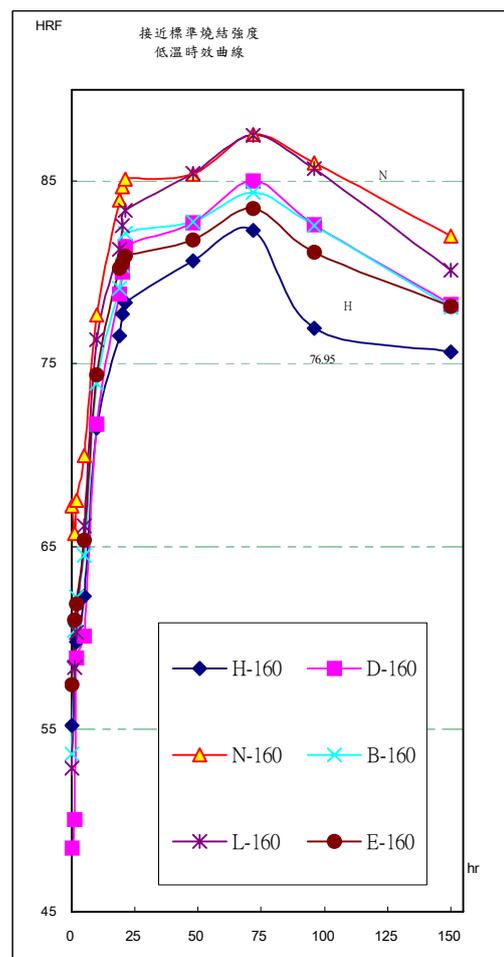
3.7.2 第二時效特徵：當人工時效溫度在 160 °C~175°C 的範圍內時，接近標準燒結強度的試片，其時效曲線均保有第一特徵，而落在標準燒結時效曲線地帶。

【圖 9】接近標準燒結強度的低溫時效曲線



3.7.3 第三時效特徵：在標準燒結溫度 620°C 及標準燒結時間 2hr 的燒結條件下，以標準冷均壓力 3000kgf/mm² 或著極低值 500kgf/mm² 的壓結成品，進行『液相燒結』，其製程後的燒結成品，會得絕佳的材料顯微組織；經過適當的擠型加工後，其擠型加工件的高溫時效峰值硬度逼近低溫時效峰值硬度。

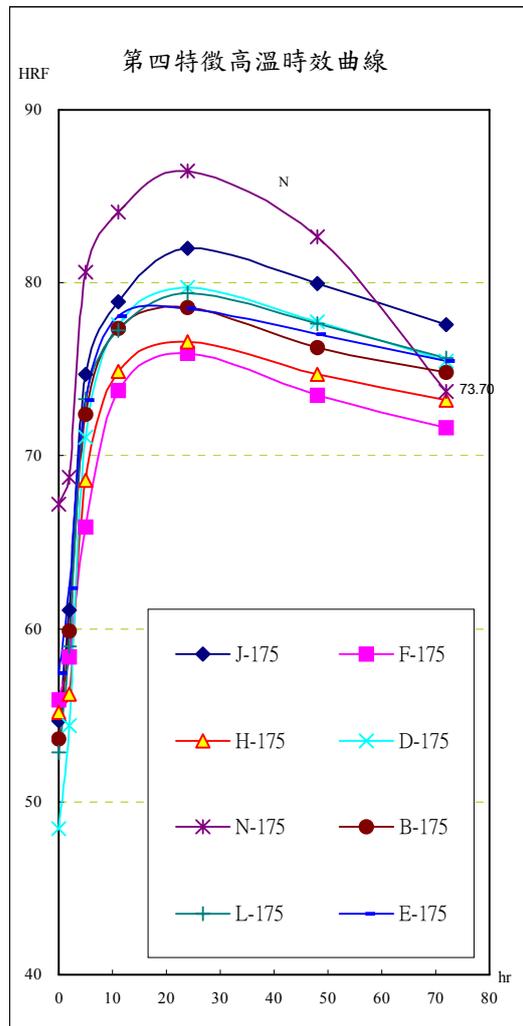
3.7.3 第四時效特徵：當試片的燒結指數達到標準值(目前看來應該是 42000)，其擠型加工後的材料組織，帶有龐大的塑性變形能量。(這種能量以兩種方式來儲存，第一是藉由塑變行為後的晶格扭曲，原子之間力量不平衡來儲存；第二是當塑變能量太大時，會造成晶粒的滑移，產生大量的剪應力，分佈在晶粒的界面間。)當時效進行後，試片會因為大量的能量釋放，而使得整個時效曲線的走向趨勢邁向標準化→陡昇期、爬昇期、穩健期、巔峰期



【圖 10】接近標準燒結強度的低溫時效曲線

3.7.3 第五時效特徵：當人工時效溫度在 160°C~175°C 的範圍內時，試片的時效曲線均保有第四特徵的走向趨勢。

【圖 10】接近標準燒結強度的高溫時效曲線

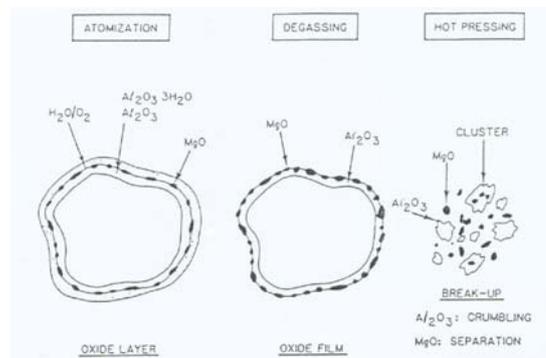


3.8 強化相 SiC 顆粒在時效過程中的作用

強化相(SiC)提供了時效曲線的基底強度，是對時效曲線的主要作用。致於後來對於時效曲線的爬昇速度(曲線斜率)、時效曲線的位置高低、隨著時效溫度提高時效曲線往下移動的距離、時效曲線巔峰期的滑落快慢，變得較難界定，到底強化相(SiC)添加量的多寡，究竟是加強時效過程中這些效應，還是反而減少？而難以界定的原因是，強化相與鋁合金基地之間的界面，存在太多的雜質成份及影響結合強度的界面生成物。

這些氧化層之組成物質是非結晶 Al_2O_3 和

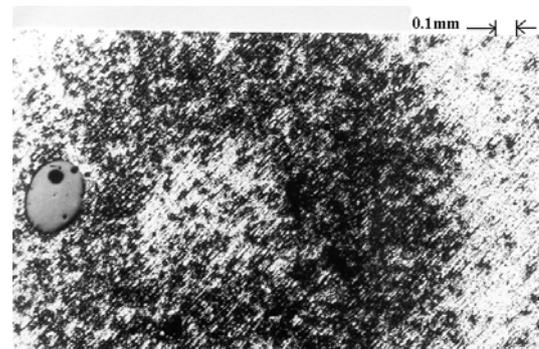
$Al_2O_3 \cdot H_2O$ 水合物，其上則鑲嵌一些合金化合物，最外層則吸附水份子和氧氣。其結構組態示意如圖【11】所示。



【圖 11】接鋁合金粉末表面氧化物示意圖



【圖 12】因冷均壓力太小，造成『異常心部』



【圖 13】『異常心部』金相觀察

4 結論

(01) 鋁基複合材料的時效曲線，因為製程過於複雜，導致時效初期的顯微組織機構不斷微動，因此伴隨大量的極限落差。【2】

(02) 鋁基複合材料的時效曲線，由於基地的大量析出物及熱能導入後均質化效應，使得峰後時間以後的極限落差，變得極少。

(03) 鋁基複合材料的時效曲線，由於基地的

析出物達到飽和狀態。因此造成大部份的時效曲線的最小極限落差，恰巧落在峰值硬度上。

(04)『異相核心』的區域沒有任何的時效硬化效應，而『環帶』仍然保有良好的時效硬化作用。

(05)即使鋁基複合材料試片並沒有發生『異相核心』，『環帶』的時效曲線依然會略高於『心部』的時效曲線。

(06)鋁基複合材料的時效曲線，發生的波動的原因是大量的極限落差，引起硬度量測值的跳動，連帶造成時效曲線波動。

(07)鋁基複合材料的時效曲線，若不論發生波動的曲線，高溫時效曲線會有『陡昇期、爬昇期、穩健期、巔峰期』等四期的標準化走向趨勢。

(08)鋁基複合材料的時效曲線，時效初期的析出速度（曲線斜率），會因基地的高密度差排及殘留應力場的效應而加速，不過當強化相體積百分率增高時，基地的『顯微組態強度因子』蓋略強化相的幾何參數影響。所以析出反應的加速效果，變得不明顯。

(09)在強化相 SiC 顆粒的直徑相同的條件下，除非試片燒結強度接近標準燒結強度 46500，不然的話，體積百分率越高，時效平均硬度越低，時效曲線越往下方平移。

(10)時效溫度對時效曲線的影響，從圖【14】的曲線看來，可以得到幾個重要的結果，將其整理列出如下：

①峰值時間提前，由低溫時效的 72hr 變成高溫時效的 24hr。

②峰值硬度會隨時效溫度而下降，不過每種試片的下降程度不一樣。

③滿足第二時效特徵的試片 A、G、N，峰值硬度幾乎不變。

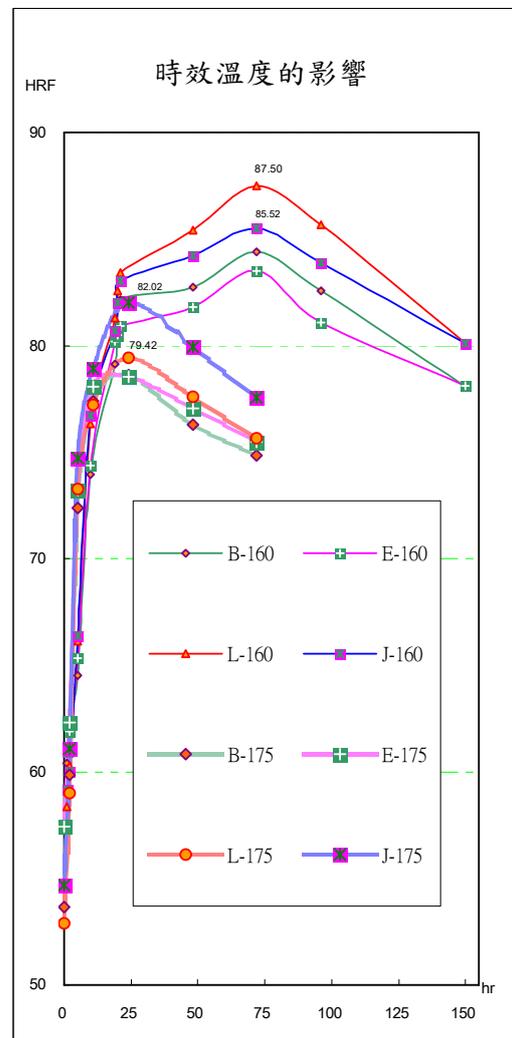
④因為峰值時間縮短，高溫時效的穩健期會消失，除了基礎曲線例外。

⑤高溫時效陡昇期的斜率高於低溫時效的陡昇期，爬昇期也一樣。

⑥高溫時效巔峰期的滑落速度，遠較低溫時效的巔峰期快很多。

⑦高溫時效曲線的位置，峰值時間之前高於低溫時效曲線，峰值時間之後剛好相反。

【圖 14】時效溫度對時效曲線的影響



5 參考文獻

- 【1】劉秋霖，「鋁基複合材料經燒結後之擠製加工特性探討」，第十八屆機械工程研討會論文集
- 【2】劉秋霖，「鋁基複合材料擠製件的洛氏硬度量測特徵」，2007 年材料科學學會年會論文集
- 【3】李輝隆，「鋁基複合材料製程及性質的研究」，台灣大學材料科學與工程學研究所，博士論文 (1993)
- 【4】A.Guinier, "The Precipitate Order in Al-4% Wt Cu Alloy", Solid State Physic, 9(1989), P.293
- 【5】.Zhong Lijun,Wu Jinbo,Qin Jiting,Ning Qiu and Qi Peixiang, "Interfaces in Metal-Ceramics Composites", ed.by R.Y. Lin,R.J.Arsenault,G.P.Martins and S.G.Fishman,The Minerals,Metal & Materials Society ,1989,p.231