不同熱處理與人工時效條件影響6061鋁合金機械性質之研究

許松山*

摘　　要

本研究係針對6061鋁合金選取試樣實施530℃淬火後176℃、186℃、196℃及206℃四種不同溫度人工時效(回火)的熱處理。共選取拉力用試桿432支；衝擊用試桿432支；硬度用試片288塊。分別實施前述四類共144種不同條件的熱處理。經熱處理後的試樣再分別測試其抗拉強度、硬度及衝擊值等力性特性。研究不同熱處理條件所得的各種力性特性及其相互間之關係特性。

研究結果得到不同人工時效溫度與6061鋁合金之強度、硬度及韌性值之相互影響曲線，時效時間不同影響材料力性特性的情形，鋁合金抗拉強度、硬度與韌性間相互關係等。前述各種關係特性及材料所具各種力性特性、可供航空、造船、車輛、材料工程及熱處理操作等工程設計之參考。

*許松山：國立彰化師範大學工業教育系教授

壹、前　　言

鋁及鋁合金爲主要的輕金屬，鋁的工業生產雖早在 1830 年間即已開始，直到 1886 年美國 Hall 氏及法國 Heroult 氏同時發明電解法煉鋁後，才開始大量生產。目前鋁及鋁合金大量使用於航空、太空、造船、車輛、電信、家用器具及建築等工業，其質量輕、耐蝕、強度優良、易實施表面處理及在地球上存量極爲豐富（金屬元素中佔第一位），將成爲最具潛力的金屬材料。

純鋁比重輕、強度不優良且不容易鑄造及鍛造，若添加各種合金元素而形成各類合金，則其強度、硬度及其他機械特性將大幅增加，且易於加工成形。6061 鋁合金極易加工，熔接性及耐蝕性均良好，擠延速度可三、四倍於含 Mg5% 之 5056(56S) 合金。

6061 鋁合金經過固溶體化處理 (Solution heat treatment) 可得到特殊之機械性質。它爲構造材料中質量輕、耐蝕性良好和機械強度良好之合金材料。構造材料之機械性質以抗拉強度、硬度及韌性（耐衝擊性）爲最重要。因此，6061 鋁合金在何種熱處理條件下可得到最佳的各種機械性質，是非常值得咱們共同去探討研究的問題。

本研究係針對 6061 鋁合金，選取拉力試桿、衝擊試片和硬度試片三類，首先分別實施加熱至 530℃保持時間分別爲 50、60、70、80、90 及 100 分鐘的常溫水冷淬火處理。經過淬火後的試樣再分別實施溫度 176℃、186℃、196℃及 206℃；時效時間分別 3 小時、4 小時、5 小時、6 小時、7 小時、8 小時的人工時效（回火）處理。經過上述熱處理後的試樣再分別實施抗拉強度、硬度及耐衝擊值測試。

各類試樣之力性測試結果再依據統計學原理（註 1），求其平均值，藉以代表各該類試樣之力性特性。各種力性特性及其與熱處理條件相互間之關係均以圖表示出。

貳、研究目的

抗拉強度、硬度及耐衝擊性等力性特性爲構造用鋁合金極爲重要之性質。亦爲工程設計上重要的依據。6061 鋁合金爲構造用鋁合金的主要材料，其機械特性受熱處理的影響很大。因此，筆者針對 6061 鋁合金做不同條件的熱處理操作，研究其所得的各種力性特性。本研究的主要目的爲：

㈠研究溶體化處理（淬火），加熱達淬火溫度保持時間不同影響 6061 鋁合金力性的情形。

㈡測試不同回火溫度影響時效效果的情形。

㈢研究不同時效時間所得的力性特性。

㈣由實驗測試結果，求出欲獲得 6061 鋁合金最佳抗拉強度、良好的硬度及耐衝擊性等特性所需的熱處理條件，以提供學術界做深入研究及工業界改進鋁合金品質的參政。

參、名詞解釋

一、機械性質 (Mechanical properties)

材料或構造物承受外力作用，材料內部抵抗外力作用所顯現出的各種特性，叫做材料的機械性質。材料的機械性質有抗拉伸強度、抗壓力強度、抗彎曲或剪斷強度、硬度強度、耐衝擊強度、耐疲勞限強度及潛變等特性。（註 2）

二、6061 鋁合金 (Aluminum 6061 alloy)

6061 鋁合金爲 Al-Mg_2Si 系鋁合金，含 Mg1.0%，Si0.6%，Cu0.25%，Cr0.25%。此類合金極易加工，經由適當的熱處理，可以得到良好的機械性質，爲構造用輕質材料的重要材料。(註 3)

三、溶體化處理 (Solution treatment)

將 Al-Cu 合金加熱到高溫 (450～530℃) 使已析出的金屬間化合物如 $CuAl_2$、Mg_2Si、AgAl 等再度溶解於 Al 內，然後急冷而得到過飽和固溶體的處理，叫做溶體化處理。（註 4）

四、時效處理 (Aging treatment)

經過溶體化處理之鋁合金，在室溫下會有金屬間化合物從固溶體內呈微細而均勻的析出，結果使強度與硬度大增。但這種析出的速度甚緩，有時需數月或數年，時效作用不藉外力在室溫下緩緩進行者稱爲「自然時效」。若將材料加熱至 150～210℃的溫度，則析出作用將被加速完成，這種效應，稱爲「人工時效」。（註 5）

五、T4 和 T6

T4 與 T6 爲鋁合金性狀命名 (Alcoa,1974)，它們代表：

T4：表示溶體化處理後常溫時效至安定狀態的鋁合金。

T6：表示溶體化處理後再經人工時效(回火)處理者。

肆、實驗方法與步驟

一、試樣之選取

㈠抗拉試驗使用試樣

本研究取用直徑 ϕ =7.5 mm之圓形鋁條做試樣，每組三支共準備 432 支，供本項試驗測試使用。

㈡衝擊值測試使用試樣

本項測試係選用橫斷面爲 10 mm× 10 mm長 55 mm之鋁桿，並在試片中央部分使用銑刀銑深 2.5 mm、寬 2 mm之U形凹槽，每組三支共準備 432 支，供本項測試使用。

㈢硬度值測試試樣

本項硬度測試使用試樣選用厚度 7.5 mm長 40 mm寬 20 mm之鋁板，每組取用二塊，本項測試共使用 288 塊試樣。

以上所選用之三類所需試樣係由利奇工業公司所提供(該公司曾經是腳踏車剎車器零件世界上最大生產公司，材料大部分使用 6061 鋁合金)。

二、溶體化(淬火)處理 (Solution treatment)

將三類試樣置於溫度達 530℃± 5℃之鹽浴爐中，分六組分別在爐中保持時間 50 分、60 分、70 分、80 分、90 分及 100 分鐘。每組拉力試桿 72 支；硬度測試試片 48 塊。

三類六組試樣在鹽浴爐中保持時間到達後馬上取出實施水冷淬火(水溫爲室溫 20℃左右)。

三、時效硬化(回火)處理 (Artificaial Ageing)

將三類六組已實施同一溫度不同保持時間溶體化(淬火)處理後之試樣。分別將每組分成四小組(每小組拉力試桿 18 支、衝擊值測試試片 18 支，硬度測試試片 12 塊)。四小組則分別以 176℃；186℃；196℃及 206℃的溫度實施人工時效(回火)處理。再將每小組之試樣依時效時間 3 小時、4 小時、5 小時、6 小時、7 小時及 8 小時等六類分別實施人工時效。並將熱處理好之試樣依次編號。以備做抗拉強度、硬度和衝擊值之測試。

以上所實施的熱處理操作，係使用利奇工業公司熱處理工廠實施。

四、抗拉強度、硬度及衝擊值測試

㈠抗拉強度測試：

使用鋁銅材專用拉力試驗機，分別將上述經過熱處理程序的各組拉力試桿，測試其抗拉強度。抗拉強度係以試樣破斷時試驗機的荷重值除以試樣斷面積 44.1 mm²，抗拉強度值以 Kg/ mm²表示。三支試桿強度值之平均值代表該組之強度值。

㈡硬度值測試：

本研究硬度值測試係使用日本明石 (AKASHI) 製作所製作的自動式洛氏硬試驗機(儀器係筆者所負責的工程材料實驗室所新購置者)。硬度以 RHB(1/16 Ball 100kgf) 尺度量度。每個試片測試六點每組共測試 12 點，以平均值代表該組之硬度值。

㈢衝擊值測試：

衝擊值之測試係應用夏比氏 (Charpy) 衝擊試驗機測試，衝擊值以儀器所測知試片吸收的能量值除以試樣橫斷面積 (A=0.75 × 1.0=0.75c m²)。每組以三支試桿所測得的平均值代表該組之衝擊值，單位以kg -m/c m²表示。

五、實驗數據之處理

將每組所測得之數值分別填入記錄表中，以平均值代表該組之強度、硬度及衝擊值，並依據統計學原理，求出其相互間關係情形以得知 6061 鋁合金受各種不同熱處理條件所獲得的力性特性。

伍、實驗結果

本研究實驗所測得之結果述之如下：

一、各種不同熱處理條件所測得抗拉強度值，見表－1；表－2；表－3及表－4所示：

表－1　530℃淬火溫度176℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得抗拉強度表

拉力強度 \ 時效時間 / 淬火溫度保持時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50min.	27.90	28.32	28.85	29.18	30.01	30.86
60min.	27.26	28.08	28.40	28.41	28.58	29.98
70min.	28.25	28.59	29.00	29.11	29.25	30.56
80min.	27.55	27.95	28.68	29.14	29.57	30.46
90min.	27.75	27.88	28.14	28.77	29.56	30.72
100min.	27.71	27.71	27.76	28.26	29.54	31.05

（抗拉強度單位爲：kg /m m²）

表-2　530℃淬火溫度186℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得抗拉強度表

拉力強度 \ 時效時間 / 淬火溫度保持時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50min.	29.77	29.80	30.72	30.74	30.25	30.32
60min.	29.10	29.81	30.50	30.61	30.01	30.11
70min.	29.95	30.97	30.64	31.32	30.57	30.45
80min.	29.50	30.23	30.66	30.67	30.35	30.26
90min.	29.69	30.49	30.61	30.90	31.18	30.93
100min .	29.15	30.37	30.66	31.04	30.67	30.46

（抗拉強度單位爲：kg /m m²）

表－3　530℃淬火溫度196℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得抗拉強度表

拉力強度 \ 時效時間 / 淬火溫度保持時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50min.	31.76	29.57	30.64	31.20	30.34	30.87
60min.	29.51	30.07	29.81	29.89	29.86	30.75
70min.	30.30	31.03	31.68	30.86	30.57	30.41
80min.	29.80	30.70	31.46	31.11	30.47	30.11
90min.	30.36	30.36	30.82	30.04	30.01	30.56
100min.	30.19	31.53	30.92	30.28	30.59	30.74

（抗拉強度單位爲：kg /m m²）

表－4　530℃淬火溫度206℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得抗拉強度表

拉力強度 \ 時效時間 / 淬火溫度保持時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50min.	29.89	29.28	29.01	29.18	28.68	28.55
60min.	29.91	29.40	29.67	29.11	28.92	28.69
70min.	30.02	29.39	30.21	30.00	29.64	29.82
80min.	30.04	29.90	29.72	29.68	29.47	28.96
90min.	29.79	30.04	29.52	29.56	29.15	28.75
100min.	30.54	29.98	29.95	29.70	29.56	29.18

（抗拉強度單位爲：kg /m m²）

二、各種不同熱處理條件所測得硬度與衝擊值，見表－5；表－6；表-7及表-8所示：

表－5　530℃淬火溫度176℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得硬度與衝擊值強度表

淬火溫度保持時間	強度＼時效時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50 min.	硬　度	42.2	45.4	49.8	52.5	54.3	54.5
	衝擊值	5.62	5.25	4.94	4.36	3.95	3.86
60 min.	硬　度	46.8	46.9	50.2	54.0	54.4	55.6
	衝擊值	5.35	5.27	4.65	4.54	4.62	4.15
70 min.	硬　度	46.5	48.2	51.0	53.8	53.7	55.9
	衝擊值	5.78	5.02	4.90	4.68	4.72	4.26
80 min.	硬　度	46.6	46.0	48.5	49.6	53.4	56.3
	衝擊值	5.51	5.32	4.98	4.65	4.02	3.97
90 min.	硬　度	42.7	45.1	49.7	53.3	53.9	54.9
	衝擊值	5.79	4.98	4.76	4.20	4.14	3.86
100 min.	硬　度	42.8	43.1	51.4	55.8	55.3	56.5
	衝擊值	5.95	5.58	4.67	4.29	4.36	3.91

（硬度單位爲 HRB100kgf 尺量度；衝擊值單位爲 kg-m/c m²）

表－6　530℃淬火溫度186℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得硬度與衝擊值強度表

淬火溫度保持時間	強度＼時效時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50 min.	硬　度	51.8	54.1	55.0	56.8	59.2	59.3
	衝擊值	4.72	4.23	4.01	3.90	3.36	3.08
60 min.	硬　度	53.3	56.8	56.3	57.4	57.5	58.8
	衝擊值	4.49	4.09	4.15	3.79	3.72	3.21
70 min.	硬　度	54.9	58.1	58.8	58.9	58.7	60.4
	衝擊值	4.24	3.36	3.21	3.25	3.33	2.89
80 min.	硬　度	52.8	55.8	56.7	58.0	58.9	60.2
	衝擊值	4.24	4.02	3.89	3.21	3.45	3.04
90 min.	硬　度	54.1	55.6	55.4	56.6	57.1	57.4
	衝擊值	4.11	4.03	3.94	3.70	3.60	3.55
100 min.	硬　度	53.1	55.7	56.4	56.2	57.8	57.5
	衝擊值	4.48	4.21	3.86	3.94	3.42	3.62

（硬度單位 HRB 100kgf 尺量度；衝擊值單位爲 kg-m/c m²）

表－7　530℃淬火溫度196℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得硬度與衝擊值強度表

淬火溫度保持時間	強度＼時效時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50 min.	硬　度	50.7	53.7	52.5	54.9	56.8	57.0
	衝擊值	4.85	4.04	4.21	3.86	3.31	3.02
60 min.	硬　度	56.1	56.0	55.4	55.0	56.2	56.8
	衝擊值	3.75	3.80	4.12	4.09	3.65	3.31
70 min.	硬　度	55.7	55.7	56.1	55.4	55.2	55.3
	衝擊值	3.96	4.02	3.72	4.17	4.21	4.08
80 min.	硬　度	54.6	56.9	56.1	55.8	55.6	55.4
	衝擊值	4.09	3.62	3.67	3.91	3.87	3.92
90 min.	硬　度	54.9	55.1	55.2	54.8	54.4	53.7
	衝擊值	3.87	3.96	3.85	3.71	3.88	4.36
100 min.	硬　度	55.0	55.8	56.3	55.7	54.3	54.7
	衝擊值	4.01	3.90	3.20	3.98	4.34	4.43

（硬度單位爲 HRB 100kgf 尺量度；衝擊值單位爲 kg-m/c m²）

表－8　530℃淬火溫度206℃回火溫度不同淬火溫度保持時間與不同時效時間所得硬度與衝擊值強度表

淬火溫度保持時間	強度＼時效時間	3hr.	4hr.	5hr.	6hr.	7hr.	8hr.
50 min.	硬　度	54.6	56.8	55.3	55.2	54.3	53.7
	衝擊值	4.21	3.76	4.02	3.87	4.33	4.45
60 min.	硬　度	54.9	54.2	53.8	53.5	53.5	52.6
	衝擊值	4.07	4.12	4.36	4.72	4.41	4.75
70 min.	硬　度	55.1	55.4	56.0	55.6	54.9	55.0
	衝擊值	3.96	3.21	3.20	3.51	3.87	4.05
80 min.	硬　度	53.7	53.1	54.9	53.7	53.5	53.0
	衝擊值	4.21	4.53	4.02	4.27	4.65	4.45
90 min.	硬　度	54.8	51.7	52.9	50.9	48.1	50.6
	衝擊值	4.83	4.70	4.27	4.31	5.75	4.82
100 min.	硬　度	54.3	53.1	53.7	52.9	52.6	52.5
	衝擊值	4.74	4.36	4.07	4.54	4.72	4.05

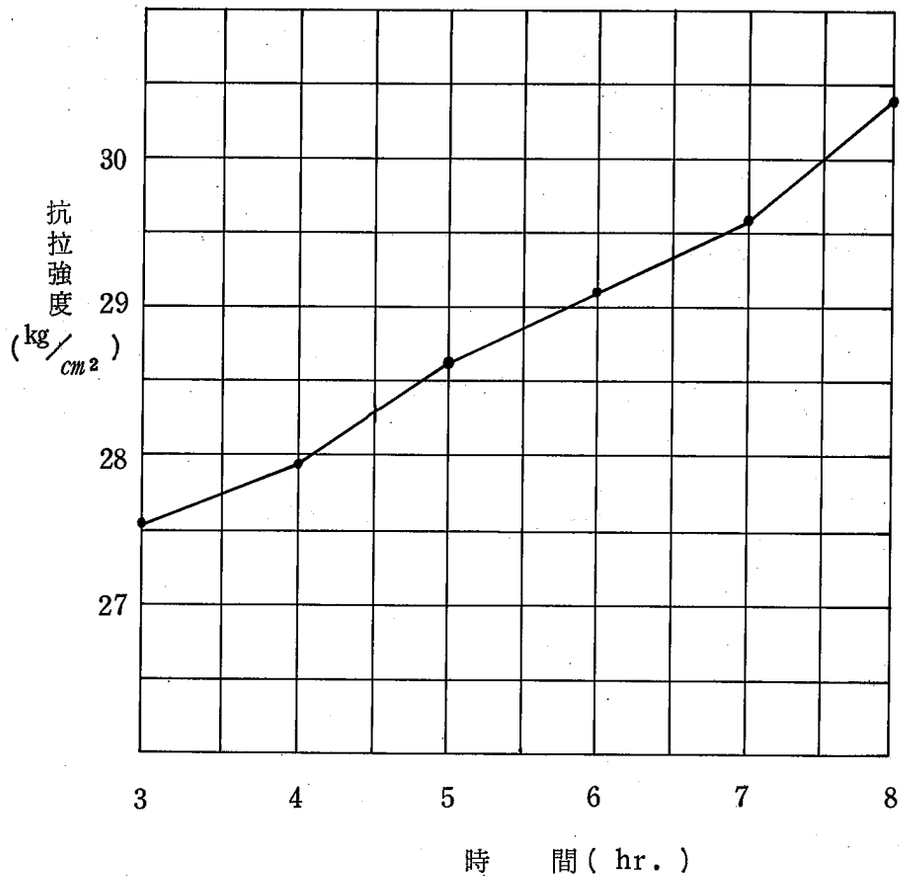
（硬度單位爲 HRB100kgf 尺量度；衝擊值單位爲 kg-m/c m²）

陸、討　　論

茲將表 -1 至表 -8 淬火溫度保持 80 分鐘不同回火溫度與不同時效時間所得力性特性提出討論如下：

㈠176℃回火溫度的人工時效曲線，如圖－1所示（由表－1所得）。

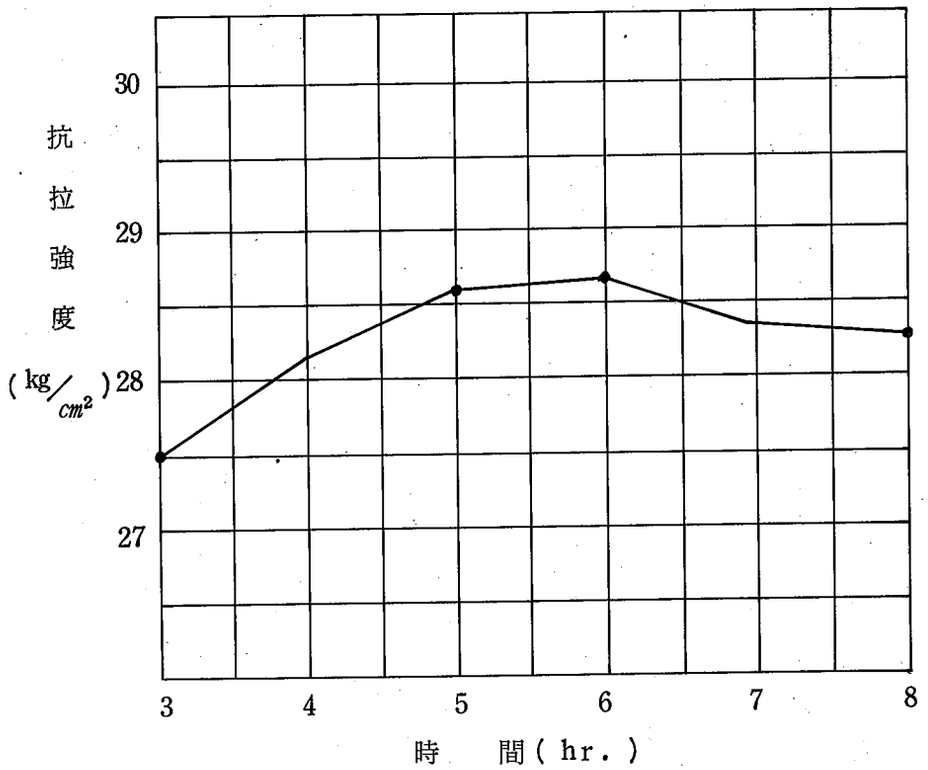
由圖－1可得知：176℃回火溫度 6061 鋁合金的強度隨時間增加而增大，而 以時效時間 8 小時所得強度最大。



圖－1　176°C人工時效曲線

㈡186℃回火溫度的人工時效曲線如圖－2所示（由表－2所得）。

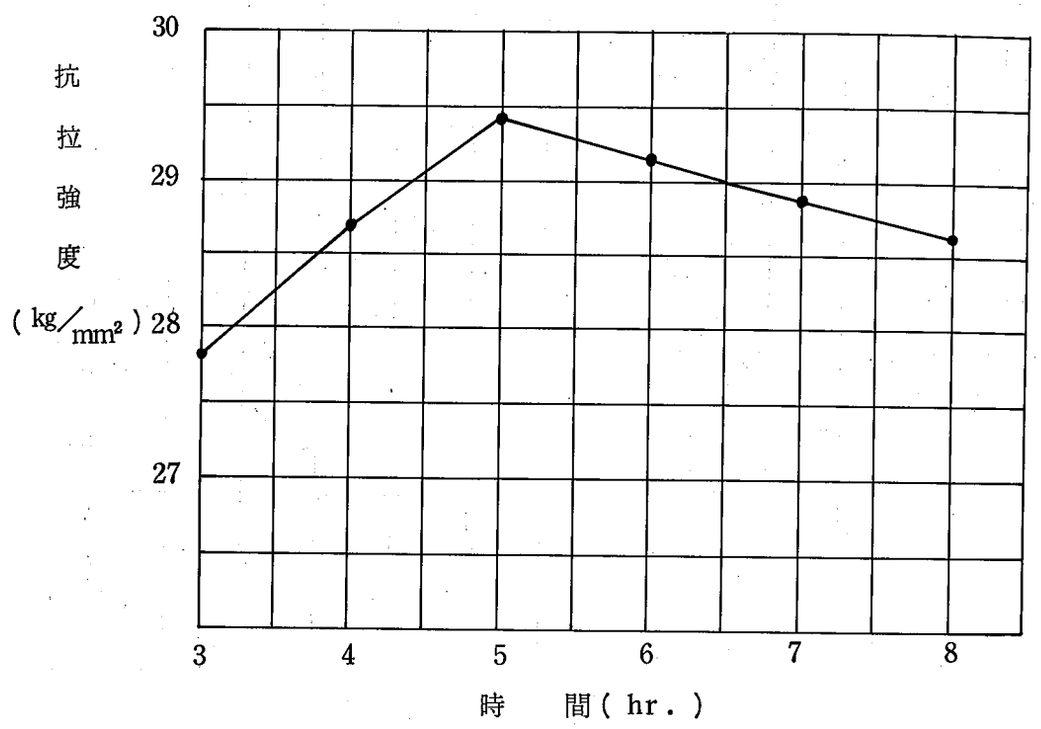
由圖中可得知 6061 鋁合金強度開始隨時效時間增加而增大但在 6 小時之後強度則減低。以介於 5 小時～6 小時之間的強度爲最佳。



圖－2　186°C人工時效曲線

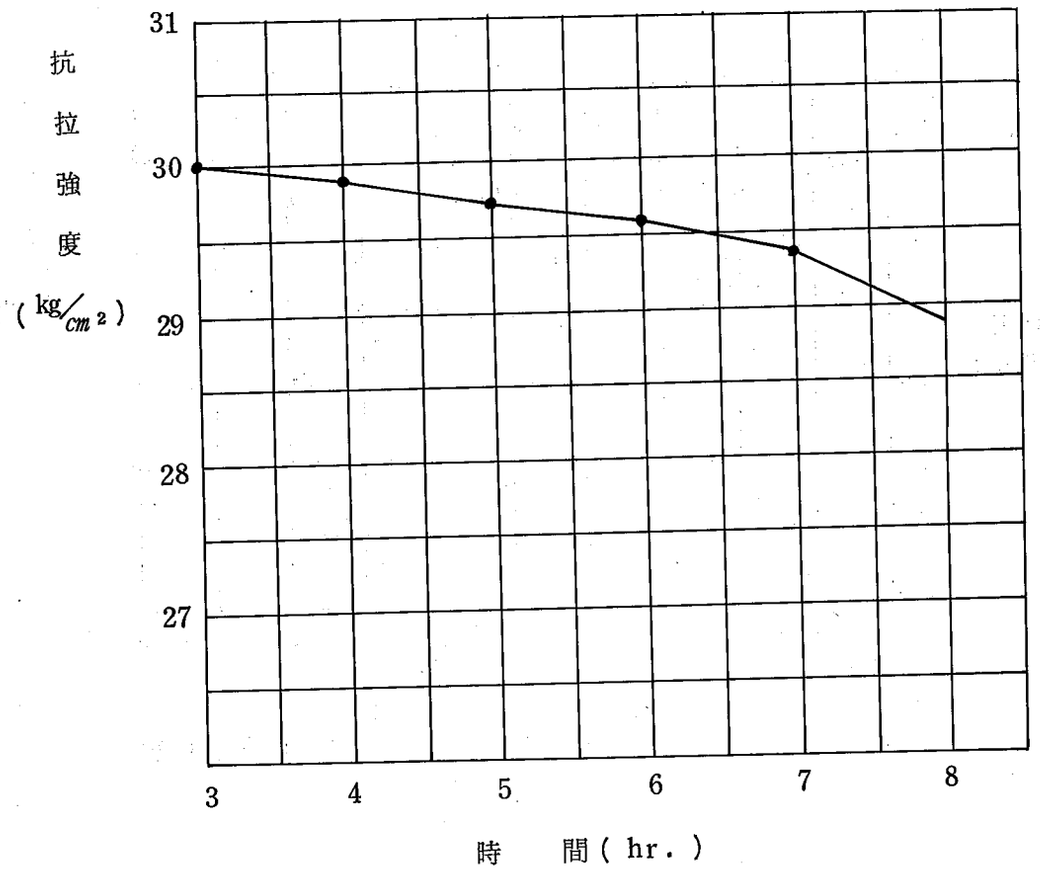
㈢196℃回火溫度的人工時效曲線，如圖－3所示(由表－3所得)。

由圖－3得知，6061鋁合金在196℃回火溫度的人工時效，強度在3～5小時間增加很快，5小時後則開始緩慢遞減。強度則在5小時時爲最大。



圖－3　196°C人工時效曲線

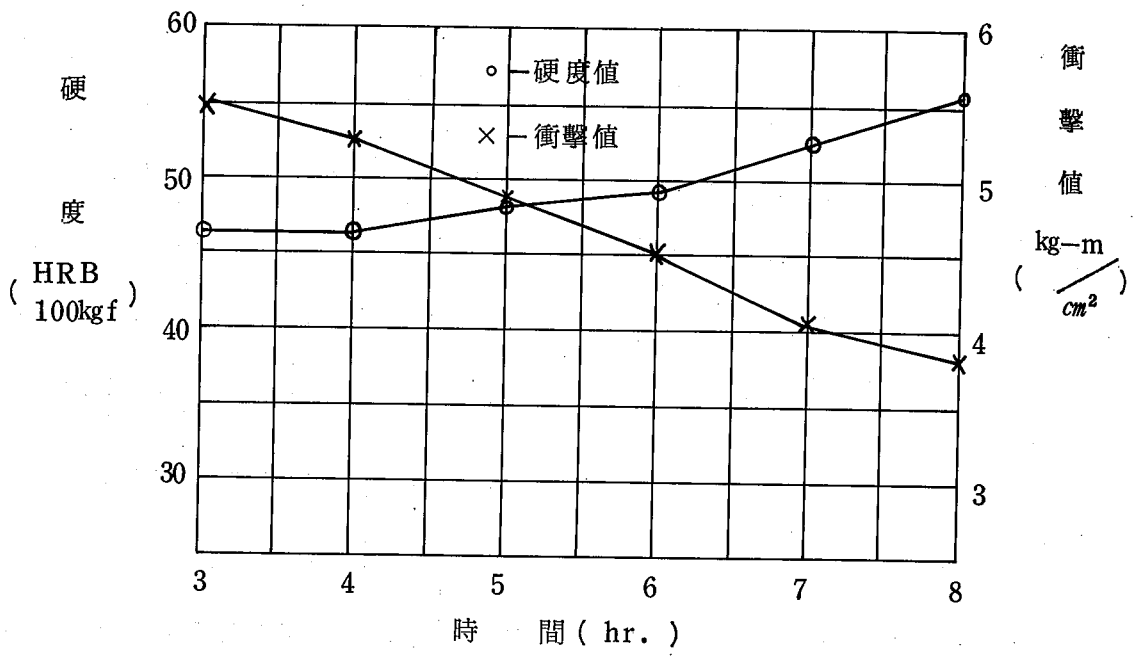
㈣206℃回火溫度的人工時效曲線，由圖－4得知：抗拉強度則隨時效時間增加而呈緩緩遞減現象。



圖－4　206°C人工時效曲線

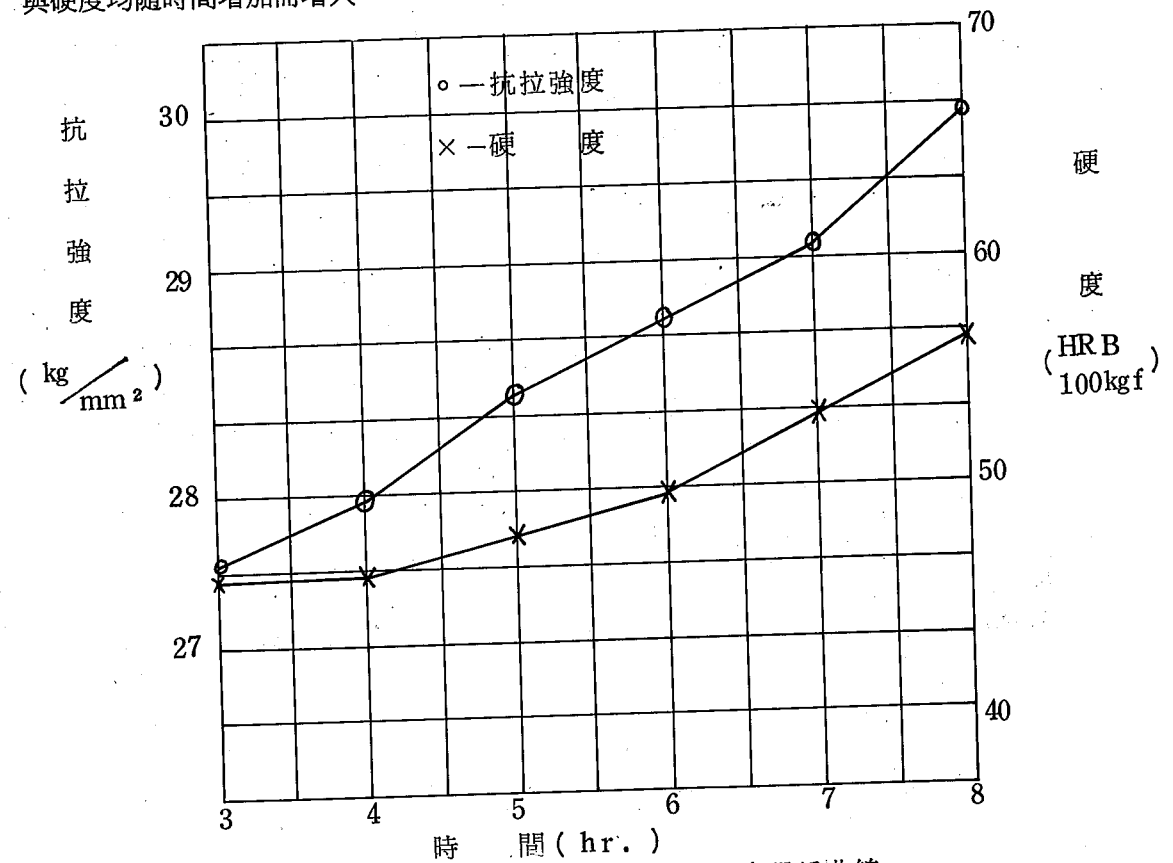
(五)176℃回火溫度人工時效硬度與韌性（衝擊值）特性及其關係曲線，如圖－5所示。

由圖－5可得知：硬度係隨時效時間增加而遞增，而衝擊值則隨時效時間增加而呈遞減現象。硬度值最高達到洛氏HRB尺56.3度。而韌性則由5.51 kg-m/cm²遞減到3.97 kg-m/cm²。



圖－5　176°C人工時效硬度與韌性關係曲線

(六)176℃人工時效抗拉強度與硬度特性關係曲線；如圖－6所示。由圖－6得知：抗拉強度與硬度均隨時間增加而增大。



圖－6　176°C人工時效抗拉強度與硬度關係曲線

(七)196℃人工時效其硬度變化亦隨抗拉強度的變化先增加然後依次遞減現象（由表－7可得知）；而206℃回火溫度人工時效其硬度值隨時效時間增加而呈緩緩遞減現象（由表-8可得知。）

柒、結論與建議

本文針對6061鋁合金實施530℃加熱淬火與176℃～206℃四種不同溫度的人工時效熱處理對其機械性質影響的實驗研究，得到表－1至表－8所示之結果，其所得力性特性關係如圖－1至圖－6所示。由其關係式可得到下列結論：

(一)176℃的人工時效不論在530℃淬火溫度保留時間增加多少，對其抗拉強度的影響很小其強度值差異亦很小（見表－1）。而206℃的人工時效亦然。176℃的人工時效其抗拉強度

隨時間增加而增大而 206℃人工時效則隨時效時間增加而減小。

㈠186℃與 196℃的人工時效則在 5～6 小時的時效時間內得到較高的強度（見圖－2 與圖－3）。

㈡由圖－3、196℃人工時效曲線，得知 3～5 小時斜率大即表示開始時強度增加很快，其時效良好。時效時間再增加時強度則呈緩慢降低現象。

㈢176℃的人工時效硬度值隨時間增長而增大，衝擊值（韌性）則隨時間之增長而減小（見圖－5）；而 206℃的人工時效硬度隨時間增長呈緩緩遞減現象，衝擊值（韌性）則呈緩緩遞增現象（見表－8）

㈣由表－1 與表－4 可得知在 206℃時效所得最高強度值小於在 176℃較低溫度所得之最高強度值。

㈤筆者針對 176℃實施人工時效後的試樣再測試經過二個月的時效延遲，則抗拉及硬度均未發現有增加的現象。

㈥由實驗結果與討論，吾人可得知 6061 鋁合金人工時效的熱處理操作以 176℃回火溫度 8 小時人工時效時間所得的強度最爲良好。

㈦由表－3 及表－4 數據顯示，若回火溫度增高而超過某特定時間則材料將產生過度時效而降低其拉力性質。

誌　謝

本研究承蒙利奇工業公司提供材料及熱處理設備，楊照明經理及多位工程人員協助熱處理實驗工作，系上助教劉敏亮先生幫助收集資料及協助力性測試工作，方能順利完成，作者謹此致最大謝意。

附　註

註 1：袁丕志編譯，Dr, Jerome C.R.Li 原著：統計推論，維新書局印行，民國 66 年 8 月 3 版。

註 2：呂璞石・黃振賢：金屬材料，文京圖書公司，民國 75 年 6 月，95～97 頁。

註 3：金重勳編著，機械材料，復文書局印行，民國 74 年 8 月。383～384 頁。

註 4：余煥騰編著，金屬熱處理學，六合出版社，民國 76 年 10 月。610～613 頁。

註 5：同註 4。

參考文獻

中文部份

㈠陸志鴻：金屬熱處理，中國機械工程學會，民國 58 年。

㈡呂璞石・黃振賢：金屬材料，文京圖書，民國 75 年 6 月。

㈢袁丕志。統計學推論，維新書局，民國 66 年 8 月 3 版。

㈣余煥騰：金屬熱處理學，六合出版社，民國 76 年 10 月。

㈤王正雄：材料試驗，大中國圖書公司，民國 66 年 4 月。

㈥賀　俊：材料科學與工程，東華書局，民國 65 年 4 月。

㈦許松山：工程材料試驗講義，彰化師大出版組，民國 79 年 10 月。

㈧金重勳：機械材料，復文書局印行。民國 74 年 8 月。

外文部份

㈠Franz, E. C. "Chemistry and Aging Behauior of 6063 Alloy Extrusions" , LIGHT METAL AGE, February,1985,p.5-6,28

㈡Franz,E.C. "Metallurgical Factors Affecting Finishing Characteristics of 6063 Alloy Extrusions", LIGHT METAL AGE August 1982, P6-8,10.

㈢Walters, V.R. and Franz, E.C. "Recent Developments in Intermediate and High Strength 6××× Series Alloys", ALUMINIUM, Vol 61, No 4, April, 1985, p.261-265

㈣Aluminum Standards and Data, Published by the Aluminum Association, 1984.

㈤P.R. CETLIN, A.S. AND R.E. REED-HILL: Serrated Flow in Aluminum 6061 Alloy, METALLURGTCAL TRANSACTIONS, Vol.4 FEBRUARY 1975-515。

㈥Busby A.K. and Martin J.W. "Effect of aging and dispersoid Content on tensile properties of Al-0.6Mg-lSi alloys" MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY April 1986, P.363.

㈦大堀紘一，渡邊英雄と竹內庸：Al-Mg-Si 系合金押出丸棒の機械的性質と微細組織について，輕金屬 p.718,1983。