

# 鐸後熱處理製程對 AA7005 鐸件機械性質之影響

## A Study for Postweld Heat Treatment on Mechanical Properties of AA7005 Weldment

吳翼貽<sup>1</sup> 林昆民<sup>2</sup> 賴昶頌<sup>2</sup>

Y.E. Wu K.M. Lin C.S. Lai

<sup>1</sup> 國立台灣科技大學機械學系副教授

<sup>2</sup> 前國立台灣科技大學機械學系研究生

### 摘要

本研究重點係針對AA7005-T1擠型材以ER5356鐸條以自動TIG鐸接後，進行自然時效（NA）、固溶（SS）、T6及T73等鐸後熱處理製程，探討鐸後熱處理製程對AA7005鋁合金鐸道機械性質的影響。

鐸件經固溶處理（470°C/40 min.）後，其母材與鐸道之鋅、鎂溶質原子可充分溶入基地，使得在後續時效處理中，具有可析出之強化相。鐸件經 T6 熱處理製程後，其母材具有 T6 頂時效之強度；鐸道部位之組織呈現出緻密的析出強化效果，強度明顯增加。鐸件經 T73 熱處理製程後，母材區具 T73 過時效之高抗應力腐蝕能力；鐸道則具有近於頂時效之強度，晶界析出物尺寸大且不連續，具無析出物區(PFZ)，亦呈現高抗應力腐蝕能力。

**關鍵字：**AA7005，ER5356鐸條，鐸後熱處理，T6，T73

### Abstract

The objective of this study is to find the best postweld heat-treatment for the weldment of AA7005 aluminum alloy welded by ER5356 filler.

Postweld heat-treatment processes, solid solution treatment, natural aging, artificial aging, T6 process and T73 process, are performed in this study. Optical metallography, micro-hardness test, tensile test, transmission electron microscopy (TEM) and SCC test were conducted to characterize the mechanical and stress corrosion properties of these heat-treated weldments.

Experimental results showed that any heat treatments conducted in this study can improve the strength of AA7005 weldments. After T6 heat treatment, the strength of weldments is slightly increased, but is much less than the strength required by the T6 temper. After T73 heat-treatment, the strength of weld is higher than the strength of base metal, while the grain boundary structure of the weld metal, which is similar to the grain boundary structure of T73 temper, is characterized by the presence of large and discontinuous precipitates, as well as a precipitation free zone(PFZ). Based on experimental findings, it can be concluded that T73 process is the most suitable postweld heat-treatment process for the weldments of AA7005 aluminum alloy.

**Keywords:** AA7005, ER5356 filler, Post-weld heat treatment, T6, T73

### 一、前言

由於中高強度AA7005 鋁合金係為改善高強度鋁合金易產生鐸道熱裂、淬火敏感性不佳等問題而研發，其Cu元素的含量極低(Cu <0.1%)，並添加了少量的Mn、Cr、Ti及Zr等合金元素。此型鋁合金在應用上有著令人滿意的特性：適中的強度、優異的破壞韌性，以及良好的加工性、成型性、鐸接性，如：AA7004、AA7005、AA7039 等。近年來，此類鋁合金之使用量有增加的趨勢，常常以擠製結構用件型態應用，如：軌道車輛、摩托車、自行車、船、汽車工業、卡車等運輸工具[1]。

由於AA7005(Al-Zn-Mg)與AA7075(Al-Zn-Mg-Cu)等合金主要都是靠過渡相 $\eta'$ (MgZn<sub>2</sub>)來強化，目前市場上AA7005所採用之T6 熱處理製程係參考AA7075鋁合金的T6製程，僅作小幅調整。唯AA7005因Cu含量較低，其析出強化能力較AA7075差[2-6]。且由於AA7005 鋁合金添加Mn、Cr、Ti及Zr等過渡元素，其析出強化機制也因此會與AA7075 不同，這將對被熱處理件的機械性質有影響。

由於AA7005鋁合金具低淬火敏感性，搭配高鎂(≥ 3 wt%)含量之鐸條，可得良好的鐸接性，其熱影響區(HAZ)的強度經自然時效後可回復到約80%的母材強度[7]；經人工時效後，亦可將鐸道強度提升到與母材強度相當[8,9]。由於先前改良的熱處理製程參數均與目前常用來進行AA7005鋁合金熱處理製程者有頗大的差異，故本研究將AA7005-T1鋁合金應用高鎂含量之ER5356鐸條進行鐸接後，進行各種不同熱處理，探討鐸後熱處理製程對鐸道機械性質之影響，藉以尋求熱處理製程對微觀結構與抗應力腐蝕性能之關係，並比較鐸道與母材經不同熱處理製程後微觀結構之異同處。

## 二、實驗方法與步驟

本研究所使用的材料為100mm×100mm厚4.5mm之AA7005-T1方型鋁擠型管。所用鐸條為ER5356鋁合金鐸條，經電子微探測儀(EPMA-WDS)分析後，成分如表1所示。固溶處理均於鹽浴爐(溫度差±2°C)中進行，而時效處理則在油浴爐(溫度差±2°C)中實施，所用淬火液為室溫之5%鹽水。

### 2.1 鐸後熱處理

將T1煉度(Temper)之AA7005鋁擠型材進行鐸接後，先施以表2所列之各項熱處理製程，並進行機械性質試驗及利用TEM觀察基地析出物的型態、大小、分佈情況和晶界上析出物的特徵。

### 2.2 微硬度實驗

在本研究應用微硬度來探討鐸道、熱影響區至母材的強度變化。本研究前已驗證維克氏微硬度(HV)與抗拉強度(UTS)呈現正比之關連性，列示於圖1，故在後續實驗中將以微硬度值來代表材料之抗拉強度。

將經過鐸後熱處理之鐸件，取其截面用320號砂紙依序至1500號砂紙研磨，然後以1 $\mu$ m氧化鋁粉拋光，最後使用keller腐蝕液浸蝕，並以Mitutoyo MVK-H微硬度試驗機作定點之微硬度量測。荷重及反應時間分別為300g及15秒，每隔0.5mm量測一點，範圍自鐸道中心線至熱影響區及母材，並繪出微硬度分佈曲線，觀察不同熱處理製程對鐸件之硬度影響。

### 2.3 拉伸試驗

將經過鐸後熱處理的鐸件以線切割方法，依照ASTM B557[10]次尺寸試片(Sub-size specimen)之規範取樣。鐸道部分位在拉伸試片之中央部位，實驗所得數據為最大拉伸強度(UTS)值。

## 2.4 穿透式電子顯微鏡 (TEM) 觀察

將欲觀察之材料以 240 號砂紙研磨至 0.3mm 厚，再以 1500 號砂紙研磨至 0.1mm。試片浸入丙酮中以超音波清洗後，再經噴射薄化(Jet Thinning)，腐蝕液為硝酸：甲醇=1：4 (體積比)。控制電壓為 15V，溫度為-15°C，直到試片穿孔，並使用乙醇將所得試片沖洗並予以乾燥，最後以穿透式電子顯微鏡觀察微觀組織結構。

## 2.5 應力腐蝕實驗

依據 ASTM G39-90[11] 規範 Three-Point Bent-Beam 法(圖 2(a)所示)進行應力腐蝕測試。試片中央處將承受最大應力，且中央至外部支撐點所承受之應力值會線性遞減至零，如圖 2(b)所示；針對試片中央部位(即銲道)，評估其抗應力腐蝕能力。Four-Point Bent-Beam(如圖 3(a)所示)法，試片內部兩支撐點所涵蓋的區域(包含銲道、熱影響區與母材三區)承受之應力為最大值且為定值，如圖 3(b)所示，可同時比較銲道、熱影響區與母材之抗應力腐蝕能力。測量施力點的總撓度使用公式(1)&(2)來計算外加的應力。

三點施力法： $\sigma = 6Ety / H^2$  .....(1)

四點施力法： $\sigma = 12Ety / (3H^2 - 4A^2)$ , where  $A = H/4$  .....(2)

t：試片厚度 (mm)

H：外部兩支持點之距離 (mm)

A：內部兩支持點之距離 (mm)

y：撓曲高度 (mm)

E：彈性模數 (71.0GPa)

測試環境及條件依照 ASTM G103 [12] 規範所規定之方法進行(如表 3 所示)，評比材料之抗應力腐蝕性能。

## 三、結果與討論

### 3.1 銲件橫斷面之微硬度變化

#### 3.1.1 自然時效 (NA)

圖 4 所示為銲件橫斷面經銲後自然時效後之微硬度分佈圖。由圖中可看出銲件在銲後第一天因銲接熱循環之作用，導致銲道、熱影響區有析出物溶解現象，使微硬度大幅度降低；在 18 天內銲件因自然時效逐漸析出強化相，致使熱影響區之微硬度逐漸增加至 HV 105，銲道亦增加到 HV 90，到 18 天後已無明顯變化。此實驗結果與文獻[7]之結果相同。

#### 3.1.2 固溶處理 (SS)

銲件經固溶熱處理 (SS) 後所得之橫斷面微硬度分佈圖列示於圖 5，熱影響區與未受影響區並無明顯分界之現象，經二週自然時效後微硬度之變化趨於穩定，僅銲道之微硬度值有略微再提升之現象。此乃因銲件經固溶熱處理，能有效使銲道之鋅與鎂元素擴散，改善偏析，增加時效硬化效果。

#### 3.1.3 AA 與 TAA 熱處理製程

銲件經 AA 與 TAA 熱處理製程之橫斷面微硬度分佈如圖 6 所示，圖中熱影響區與母材區之硬度均有所提升，但銲道微硬度值僅略微增加。顯示銲件經此二種銲後熱處理製程雖能增加銲道強化相的析出，但均無法有效的提升銲道的強度。

#### 3.1.4 ST、T6 與 T73 熱處理製程

圖 7 所示為銲件經過 ST、T6、T73 處理製程之橫斷面微硬度分佈圖。由圖中銲件微

硬度變化曲線得知，經 T6 與 T73 熱處理製程之鋁件除母材區微硬度值有改善外，其鋁道微硬度值均大幅增加。鋁道區經過 T6 熱處理製程，微硬度值可提升到 HV110，若是鋁道經 T73 熱處理製程，微硬度值可增加至 HV120（近於 AA7005-T6 強度要求）。此因 ST、T6、T73 製程中有固溶與水淬之製程，使鋁道內鋅與鎂元素產生均質化，形成過飽和固溶體與足夠之空孔密度，能在後續時效處理中產生強化相；惟鋁道與母材間因合金元素成分上的差異，造成析出強化能力不一，影響析出物之大小、析出能力與分佈密度，因而造成微硬度值之差異。導致鋁件經 T6 熱處理製程後，AA7005 母材具 T6 頂時效效果，但鋁道強度僅略微增加；而鋁件經 T73 熱處理製程後，其鋁道之微硬度值高於母材之現象。

### 3.2 拉伸試驗

鋁件經鋁後熱處理所得拉伸試片之拉伸測試結果列示於表 4。經鋁後 NA、ST、AA、TAA、T6 與 T73 熱處理所得之拉伸試片均斷裂於鋁道，此乃因鋁後熱處理製程雖能有效改善母材與熱影響區之微硬度值，唯由於鋁道因合金成分的影響，無法同時與母材析出緻密之強化相，對鋁道硬度之提升效果有限，且均低於母材之強度，故所有拉伸試片均斷裂於鋁道，與 Klukun[8]等人之研究結果相符，表示 Al-Zn-Mg 鋁合金鋁件必須能有效地改善鋁道之強度，才能提升鋁件整體之抗拉強度。

經 T73 熱處理製程之拉伸試片，鋁道呈現近於頂時效 T6 之強度，其強度高於母材區，導致拉伸試片在母材處發生斷裂，顯示經鋁後 T73 熱處理鋁件之鋁道具較高之抗拉強度。由於 T73 熱處理製程在固溶熱處理中使鋁道之鋅與鎂元素能有效地擴散均質化，形成過飽和固溶體，在後續時效處理中達到析出強化效果，故經 T73 鋁後熱處理的鋁件之拉伸試片具有最佳的抗拉強度，此拉伸測試結果與圖 7 微硬度實驗結果相符，顯示經 T73 鋁後熱處理製程之試片具有最高的強度值，為本實驗中最佳鋁後熱處理製程。

### 3.3 應力腐蝕實驗

將經過 T6 與 T73 熱處理製程之鋁件，加工製成 Bent-Beam 試片，對試片施加 248MPa(約為 T73 抗拉強度值之 80%)，其結果如表 5 所示。鋁件經 T6 鋁後熱處理製程所得試片，以三點施力法在鋁道施加應力，並未發生裂縫。但若以四點施力法進行測試，同時觀察鋁道、熱影響區與母材之抗應力腐蝕能力，在母材區僅 72 小時就產生裂縫。應是母材為 T6 頂時效煉度，其抗應力腐蝕能力差，故裂縫起使時間較短。

鋁件經 T73 熱處理製程後，以三點施力法對鋁道施加應力，鋁道並無裂縫發生，顯示鋁道抗應力腐蝕性佳，雖為近於 T6 頂時效之強度，但是其鋅/鎂比值低，晶界上析出物粗大，故無應力腐蝕裂縫產生。以四點施力法對鋁道、熱影響區與母材同時施加應力，進行應力腐蝕測試。因母材為 T73 過時效煉度，其抗應力腐蝕能力佳，相較而言，鋁道之抗應力腐蝕性較差，故在實驗觀察末期，於第 132 小時產生裂縫，顯示出鋁道之抗應力腐蝕能力比母材區之抗應力腐蝕能力為低。

### 3.4 TEM 觀察

由前述研究結果顯示，鋁後 T6 與 T73 熱處理製程，均能有效改善鋁道強度；由於強度改變係由於其微觀組織中析出物之大小、數量與分佈狀態改變而導致，故由已完成 T6 與 T73 鋁後熱處理鋁件之鋁道與母材處製作 TEM 試片，觀察其微觀結構對強度之影響，觀察結果均列示於圖 8(a)~(d)中。

圖 8(a)所示為 AA7005 鋁件經 T6 時效處理後母材之 TEM 明視野圖，其母材基地佈

滿著細小析出物，晶界則散佈著較為粗大之析出物，與文獻[13,14]結果相近；鋁道經 T6 熱處理製程後，基地內形成的微細析出物並不多，晶界內析出物間距也較遠，如圖 8(b) 所示，應是熱處理時效時間過短，造成析出物之數量稀少且不明顯。圖 8(c)所示為鋁件經 T73 時效之母材的 TEM 明視野圖，與圖 8(a)相比，晶界析出物的尺寸較大且數量較多，並呈現無析出物區(Precipitation Free Zone,PFZ)。圖 8(d)所示為鋁道經 T73 熱處理製程後之 TEM 圖，基地內佈滿了細小的析出物，近似於母材經 T6 熱處理後所得之微觀結構(圖 8(a))，唯晶界結構係由粗大且不連續之析出物所組成，亦具無析出物區(PFZ)，近於 T73 的晶界結構(圖 8(c))；此乃因其時效時間較 T6 製程長，使析出物的數目持續增加，因而增加材料的強度，且使晶界處之析出物粗大化呈不連續的結構。

#### 四、結論

本研究結果可得以下諸項結論：

1. AA7005 鋁合金鋁件經任一熱處理製程均可改善鋁件強度，唯強度之回復量與所用之熱處理製程有極大的影響。
2. 鋁件經固溶處理 (470°C/40mins) 後，其母材與鋁道之鋅、鎂溶質原子可充分溶入基地，使得在後續時效處理中，具有可析出之強化相。鋁件經 T6 熱處理製程後，其母材具有 T6 頂時效之強度；鋁道部位之組織呈現出緻密的析出強化效果，強度明顯增加。
3. 經不同鋁後熱處理之拉伸試片，除經 T73 熱處理製程之拉伸試片斷裂在母材區外，其它拉伸試片破斷處均在鋁道。
4. 以三點施力法及四點施力法所進行之應力腐蝕實驗，顯示鋁件經 T73 製程後，其鋁道具高抗應力腐蝕性。
5. 鋁件經 T73 熱處理製程後，其鋁道之微觀組織為基地佈滿緻密細小之析出物，與頂時效之微觀組織相似；其晶界結構係由粗大且不連續之析出物所組成，並具有無析出物區(PFZ)與 T73 的晶界結構相似。

#### 五、參考文獻

1. T. H. Sanders, Jr. and E. A. Starke, Jr., "The Relationship of Microstructure to Monotonic and Cyclic Straining of Two Age Hardening Aluminum Alloys", Metall. Trans., Vol. 7A, pp. 1047-1418, 1976.
2. T. Engdahl, V. Hansen, P.J. Warren, K. Stiller, "Investigation of Fine Scale Precipitates in Al-Zn-Mg Alloys after Various Heat Treatments", Mater. Sci. and Eng., A327, 2002, pp. 59-64.
3. 陳志毅，周長彬，"析出硬化型鋁合金 2219 與 7003 鋁接之機械性質研究"，鋁接論文發表會，第 B17-B21 頁，民國 86 年。
4. 吳翼貽，高全盛，林昆民，"析出強化機制對 AA7005 鋁擠型合金熱處理後製程之影響"，金屬熱處理 84 期，第 13-19 頁，民國 94 年。
5. 吳翼貽，黃清添，林昆民，"AA7005 鋁合金抗應力腐蝕製程之研究"，金屬熱處理 30 卷增刊，第 8-12 頁，民國 94 年。
6. T. Engdahl, V. Hansen, P.J. Warren, K. Stiller, "Investigation of fine scale precipitates in Al-Zn-Mg alloys after various heat treatments", Mater. Sci. and Eng. A, Vol. A327, pp.59-64, 2002.
7. T. Ma and G. Den Ouden, "Softening behaviour of Al-Zn-Mg alloys due to welding", Mater. Sci. and Eng., A266, pp.198-204, 1999.
8. A. O. Kluken and B. Bjorneklepp, "A study of Mechanical Properties for Aluminum GMA Weldments", Welding J., pp. 39-44, 1997.

9. S. Kou, "Welding Metallurgy", Wiley -Interscience , pp. 289-293, 1987.
10. ASTM Standards B557-94, "Standard Test Methods of Tension Testing Wrought and Cast Aluminum and Magnesium Alloy Products", pp. 411-423, 1994.
11. ASTM Standards G39-90, "Standard Practice for Preparation and Use of Bent-Beam Stress-Corrosion Test Specimens", 1994.
12. ASTM Standards G103-89, "Standard Test Method for Performing a Stress-Corrosion Test of Low Copper Containing Al-Zn-Mg Alloys in Boiling 6% Sodium Chloride Solution", Mater. Sci. and Eng. A, Vol. A293, pp.267-274, 1994.
13. J.K. Park and A.J. Ardell, "Microstructures of the Commercial 7075 Al Alloys in the T651 and T7 Tempers", Metall. Trans. A, Vol. 14A, pp.1957-1965, 1983.
14. 黃清添, "析出製程參數對AA7005鋁擠型合金機械性質與抗應力腐蝕性之影響", 碩士論文, 國立台灣科技大學, 2003。

#### 六、致謝

感謝國科會計畫NSC-93-2212-E-011-028經費支持, 使本研究得以完成。

Table 1. Compositions of AA7005 and ER5356 filler ( wt% )

Composition	AA7005		ER5356	
	Specification	Actual value	Specification	Actual value
Zn	4.0-5.0	4.58	—	—
Mg	1.0-1.8	1.43	4.5-5.5	4.6
Mn	0.2-0.7	0.38	0.05-0.20	0.1
Zr	0.08-0.2	0.19	—	—
Fe	0.4-Max	0.14	—	—
Cr	0.06-0.2	0.13	0.05-0.20	0.06

Si	0.35-Max	0.06	—	—
Ti	0.01-0.06	0.03	0.06-0.20	0.02
Cu	0.1-Max	0.01	—	—
Al	Bal.	93.05	Bal.	94.6

Table 2. Process Parameters for Heat Treatments

Code Name	Heat Treatment Process
NA (Natural Aging)	Natural aging 18 days
SS (Solid Solution)	470°C/40 min.+W.Q.
ST (Solution Treatment)	SS+NA
AA (Artificial Aging)	NA+ 120°C/40 hr.
TAA (Two Step Artificial Aging)	NA+ 107°C/8 hr. +168°C/19hr.
T6	ST+120°C/40hr.
T73	ST+ 107°C/8 hr.+168°C/19 hr.

Table 3. Conditions for Stress Corrosion Test

Test liquid composition	6.0% NaCl ( $\pm 0.1\%$ ) and 94.0% water
Test liquid PH value	PH6.4~7.2,use HCl or NaOH to adjust
Soaked form	Continuously soaking
Soaked area	20mL/in <sup>2</sup> at least
Temperature	Keep boiling

Table 4. Results of Tensile Tests after Different Heat Treatment Process

Process	UTS ( MPa)	Crack position
NA	276.1(+4.6,-3.8)	weldment
ST	297.8(+3,-2.5)	weldment
AA	295.8(+2.3,-2.4)	weldment
TAA	295.5(+5.5,-4.5)	weldment
T6	311.9(+4.2,-3.5)	weldment
T73	325.7(+6,-4.5)	base metal

Table 5. Crack Initiation Time for SCC Test

H.T. process	Specimen thickness (mm)	Loaded form	Apply load	Deflection (mm)	Crack position	Fracture Initiation Time(hrs.)
T6	3.48	*3 point	248 MPa	1.6	None	×
	3.45	4 point	248 MPa	2.4	Base metal	72
T73	3.56	*3 point	256 MPa	1.7	None	×
	3.41	4 point	256 MPa	2.4	weld	132

Note : × : no crack occurs after process in 168 hours

\* : maximum load was applied on weld

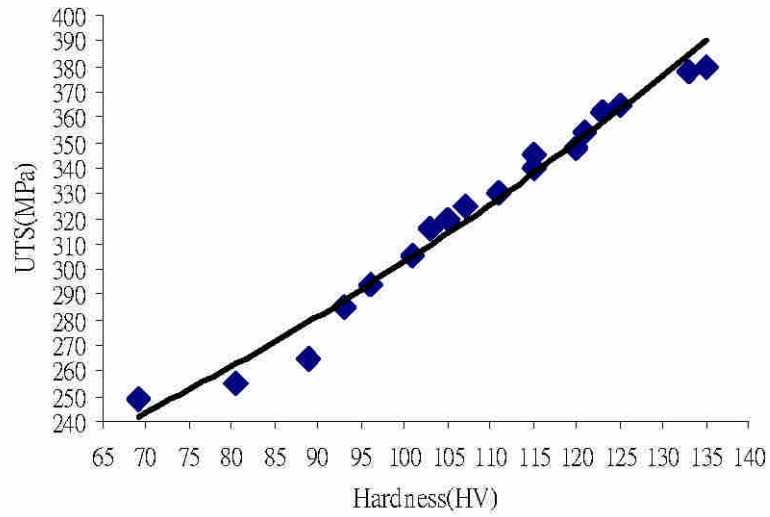


Fig. 1. Relationship between tensile stress and microhardness.

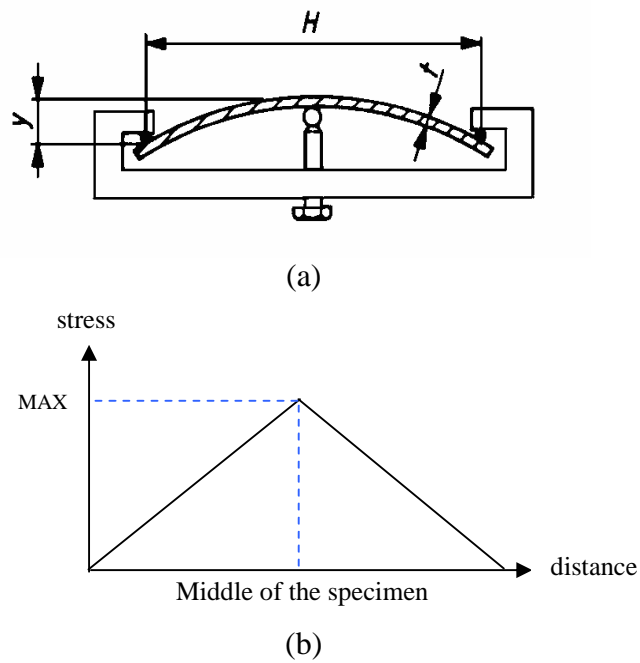
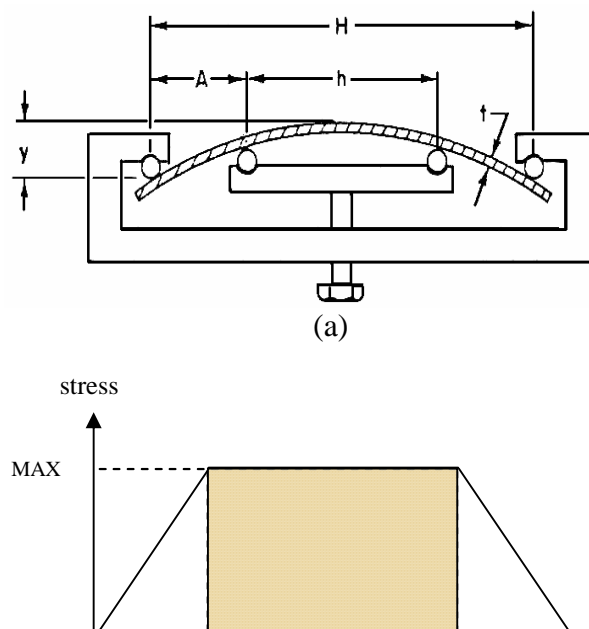


Fig. 2. Schematic illustration of three-point bent-beam SCC test  
(a) configuration for three-point bent-beam, (b) stress distribution.





Area of the inner supports

distance

(b)

Fig. 3. Schematic illustration of four-point bent-beam SCC test  
(a) configuration for four-point bent-beam, (b) stress distribution.

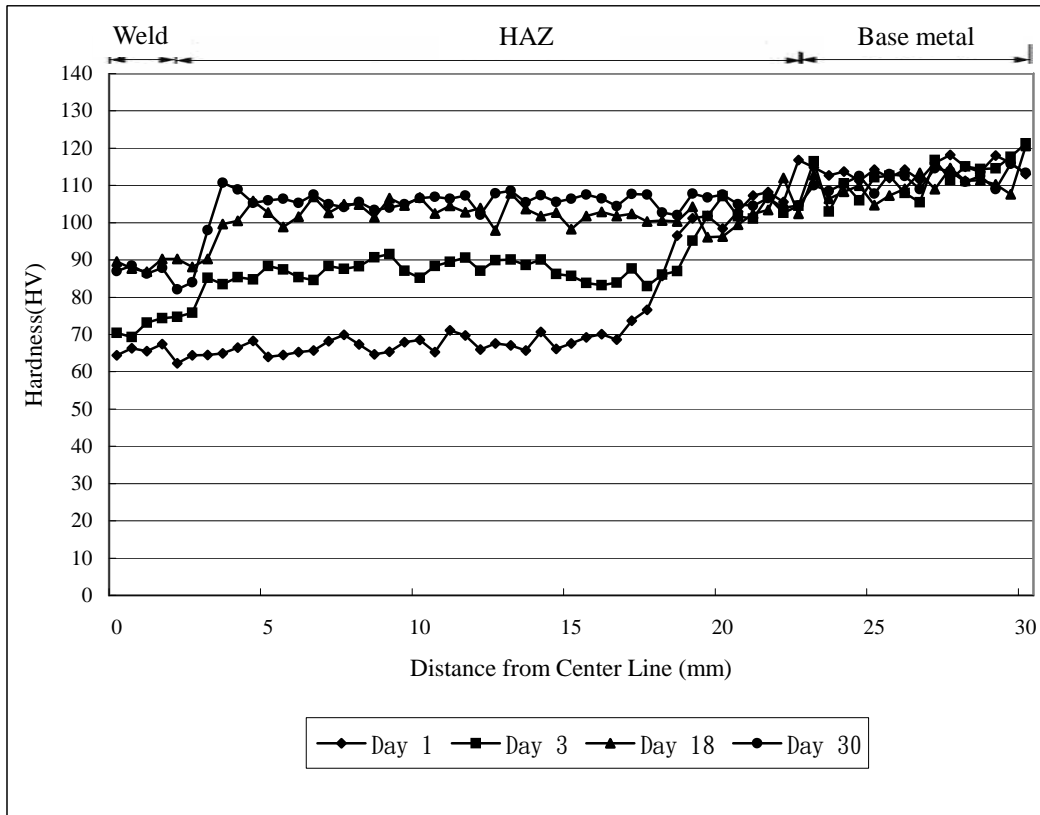


Fig. 4. Microhardness distribution of weldment after NA treatment(N.A./1~30 days).

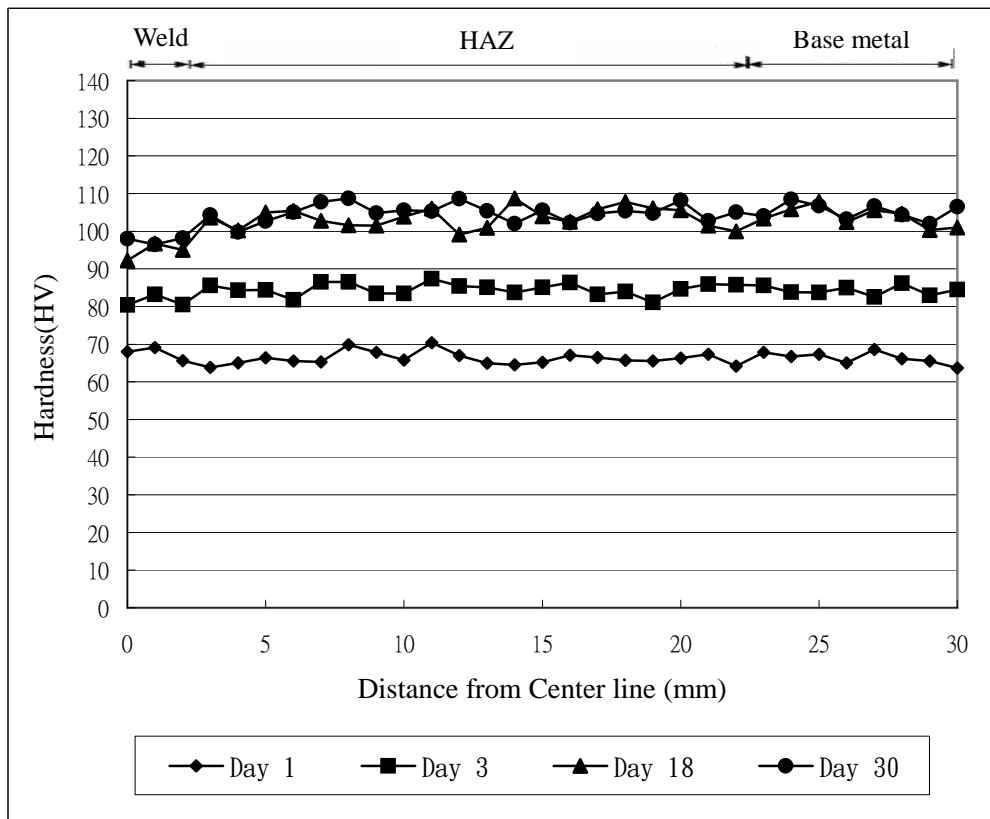


Fig. 5. Microhardness distributions of weldments after solid solution treatments.

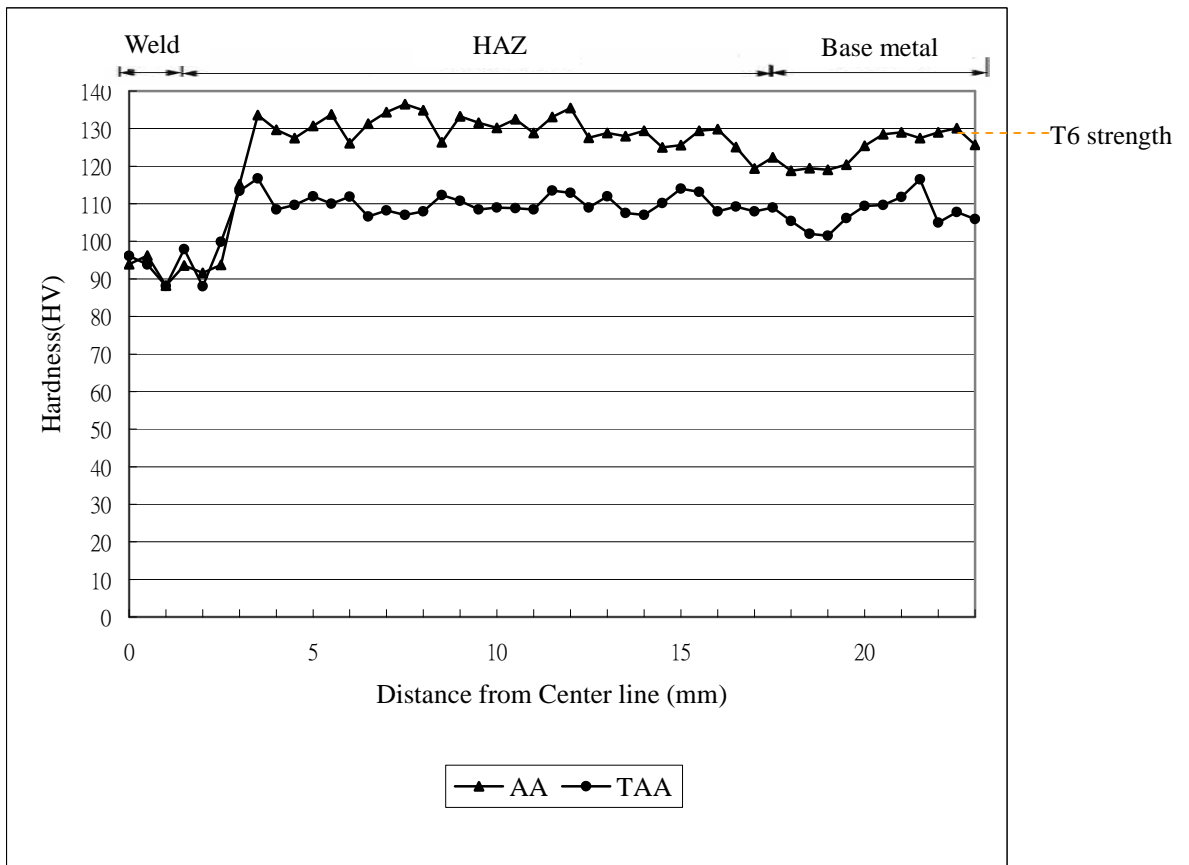


Fig. 6. Microhardness distributions of weldments after AA and TAA treatments.

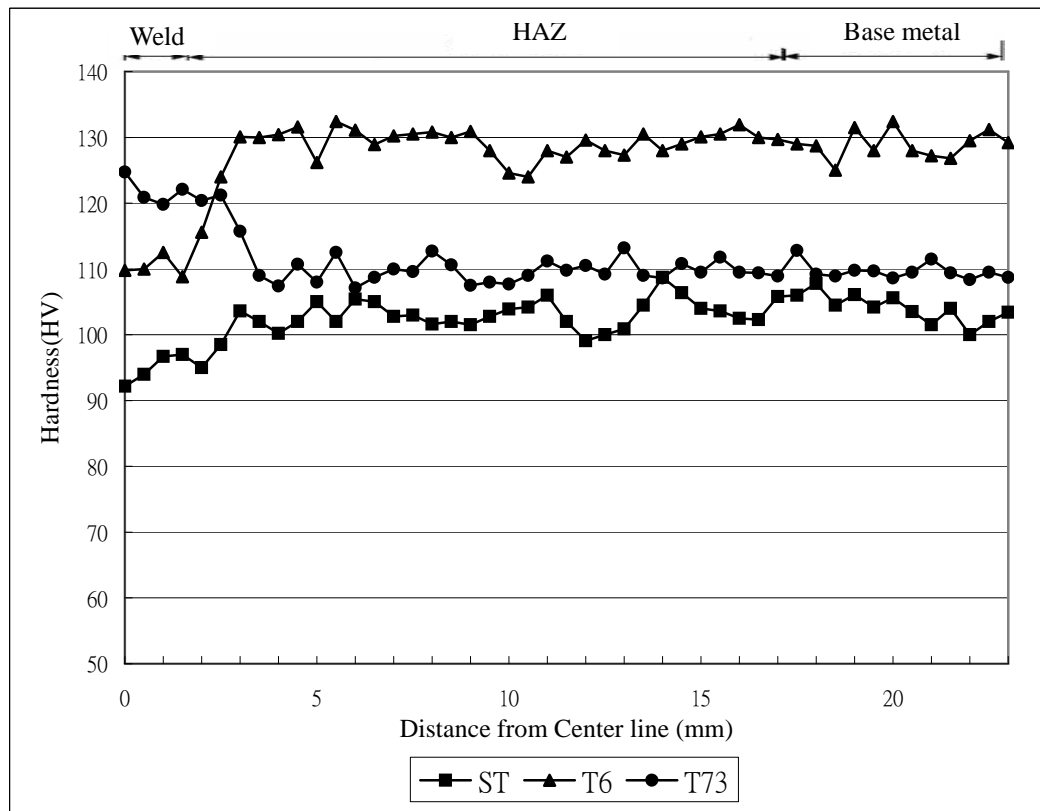
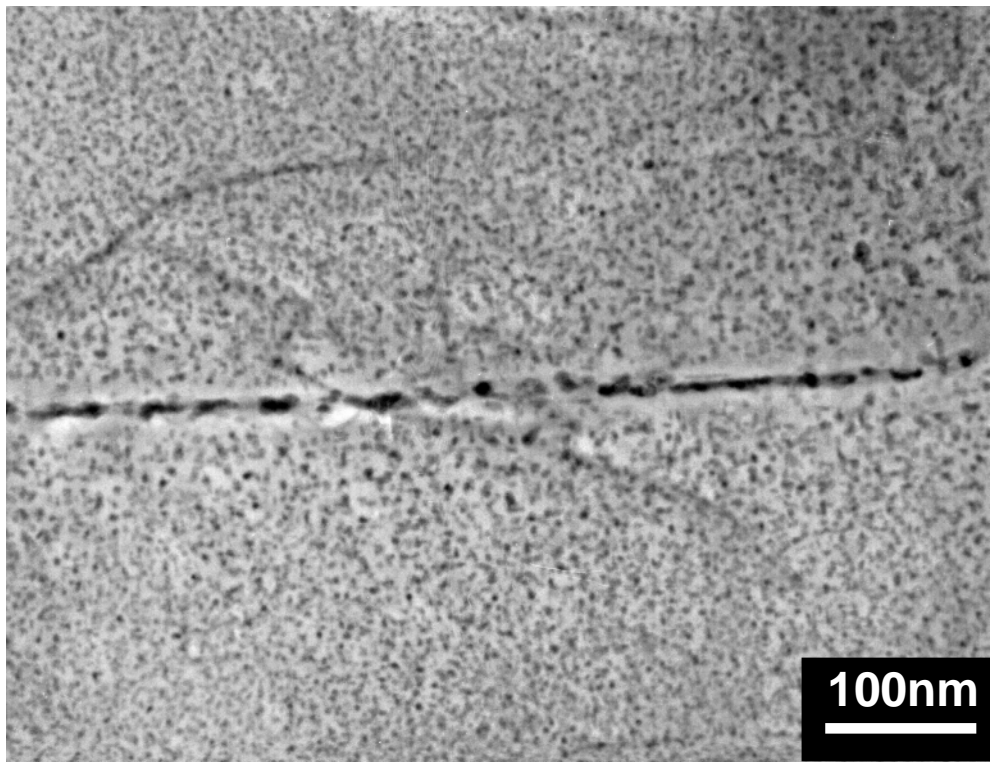
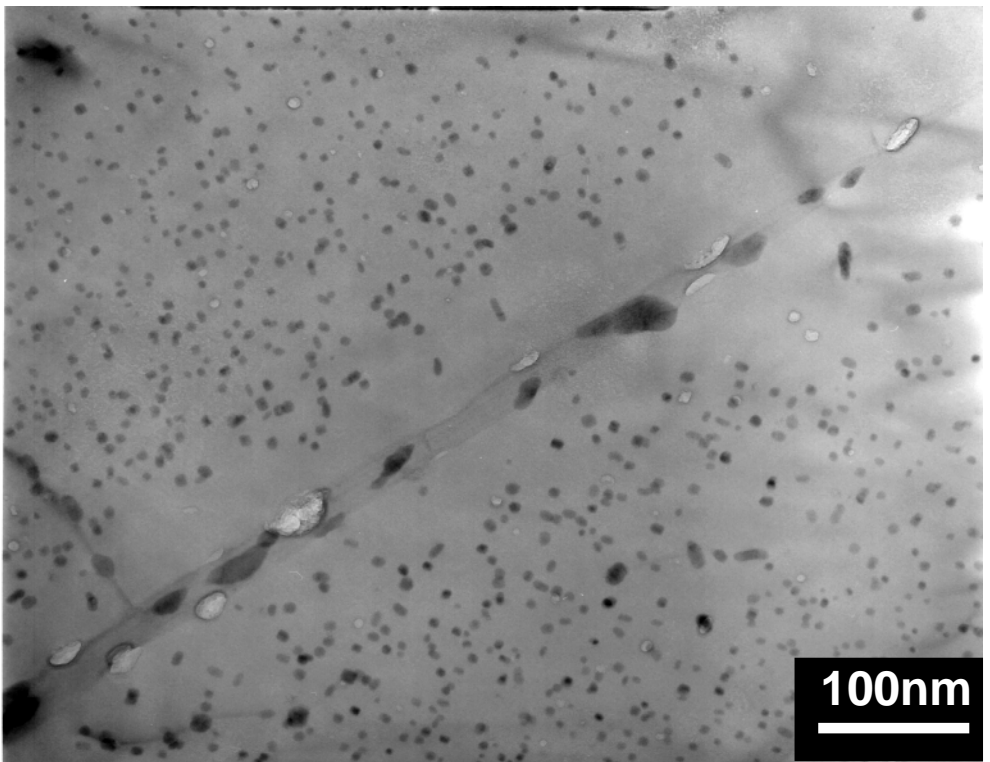


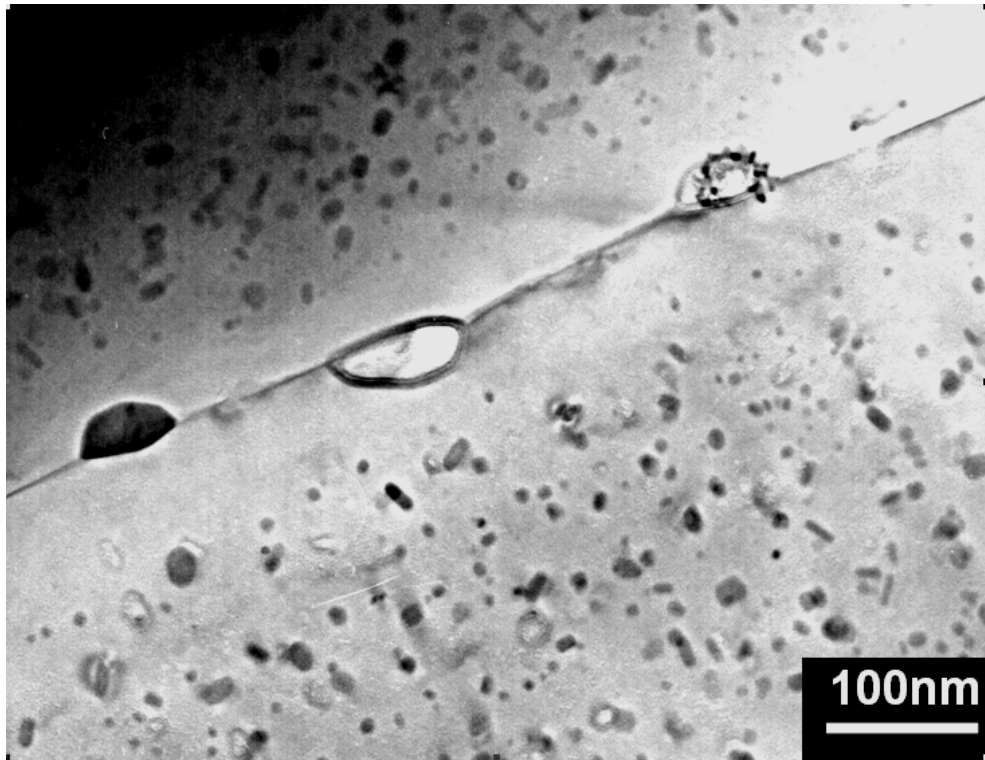
Fig. 7. Microhardness distributions of weldments after ST, T6 and T73 treatments.



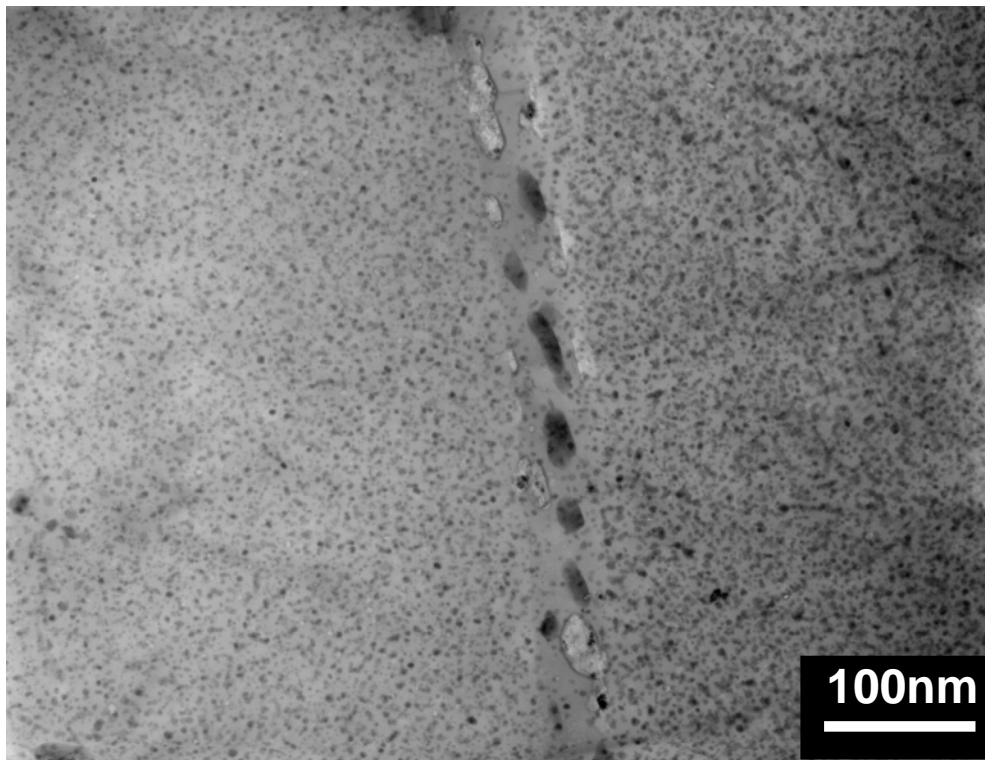
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 8. AA7005 TEM view after T6 and T73 treatments (a) T6 temper(base metal), (b) T6 temper(weld), (c)T73 temper(base metal), (d) T73 temper(weld).

