

熱處理型鋁合金銲接性之研究

研究生：鄭慶民

指導教授：周長彬

國立交通大學機械工程學系博士班

摘要

本論文旨在探討 2024-T351、6061-T6 及 7075-T6 三種熱處理型鋁合金之銲接性，研究共分為三部份：第一部份為熱裂性研究，探討外加應變量、熱循環次數及冷加工對 6061-T6 及 7075-T6 鋁合金熱裂敏感性之影響，研究結果發現：多重熱循環對上述鋁合金銲件熔融區熱裂敏感性並無明顯之影響，但對熱影響區有顯著之影響，隨著熱循環次數的增加，在熱影響區之熱裂縫會有明顯的成長，其中又以銲接金屬熱影響區(Weld Metal HAZ)較為嚴重。而隨著外加應變量之增加，各材料之熱裂敏感性均會增加，而且不論是熔融區或熱影響均呈現相同之趨勢。材料實施過冷加工後，能降低其熱裂敏感性，實驗結果亦顯示 7075-T6 鋁合金較 6061-T6 鋁合金具有更高之熱裂敏感性，而且 7075-T6 鋁合金在部份熔融區(PMZ)有明顯 Cu 的偏析現象產生，亦造成此區域較高之熱裂敏感性，而 6061-T6 鋁合金則無成份偏析之現象產生。

第二部份為角變形量之研究，將 2024-T341、6061-T6 及 7075-T6 三種鋁合金以 GTAW 進行單 V 形槽(Vee Preparation Angle)之對接銲，以比較在不同之單 V 形槽角度及有無拘束(Constraint)之條件下其角變形量之差異。研究結果顯示：當 V 形槽角度為 0° (I 形槽)時，受到拘束之銲件其角變形量大於無拘束之銲件，當 V 形槽角度為 45° 、 60° 、 90° 時，則受到拘束之銲件其角變形量小於無拘束之銲件。銲件接頭單 V 形槽之角度大小

(鐸道熔填金屬量)會影響鐸件之角變形量，在無拘束狀況下，角變形量會隨單 V 形槽之角度增加而增加；而在拘束狀況下，當單 V 形槽之角度為 0° 時，會產生較大之角變形量，隨著角度增加其角變形量會逐漸下降，在 60° 時，其角變形量最小，超過 60° 則會有再上升之趨勢。

第三部份為鐸件之殘留應力量測，將完成角變形量測之試片，以鑽孔法量測其殘留應力，研究結果顯示：對接鐸件接頭開槽角度越大，其殘留拉伸應力就越大，但過小之開槽角度，因鐸道熔填金屬量與原先接頭預置之幾何形狀會有較大之差異，因此適當之開槽角度才能使殘留應力降低。鐸接時受到拘束之鐸件會產生較大之殘留應力。同時在靠近受拘束處亦會產生一殘留拉伸應力；鐸件之最終殘留應力係由平衡溫度時材料之降伏強度所決定，平衡溫度時降伏強度越高之材料其殘留應力越高，鋁合金因其熱傳導係數較大，因此試片之溫差較小，所有材料之殘留拉伸應力相較於其本身之降伏強度均較低。而鐸件之角變形與材料之殘留拉伸應力之關係，就同一材料而言，角變形量與殘留拉伸應力呈現正比之關係，就材料是否受拘束而言，未受拘束之鐸件其角變形量都大於受拘束之鐸件，而其殘留之拉伸應力都小於受拘束之鐸件。

Investigation on the Weldability of Heat-treatable Aluminum

Alloys

Student : Ching-Min Cheng

Advisor : Chang-Pin Chou

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The study aims to investigate the weldability of Heat-treatable aluminum alloys. It includes three parts. The first part is the susceptibility of hot cracking, the second part is the angular distortion, the third part is the residual stress of weldment.

The first part, the spot restraint testing was used to evaluate the hot cracking susceptibility of several aluminum alloys namely 6061-T6, 6061-T6 (H), 7075-T6, 7075-T6 (H). The effect of augment strain, the numbers of thermal cycles and cold working (rolling) on the cracking susceptibility were investigated, the total crack length was used to evaluate the hot cracking susceptibility. The results indicate that the number of thermal cycles is irrelevant to the hot cracking susceptibility in the weld fusion zone, but does affect this susceptibility in the heat-affected zone (HAZ). More thermal cycles correspond to larger hot cracks in the HAZ, especially in the weld metal HAZ. The hot cracking susceptibility of materials increased with augment strain in both the fusion zone and the HAZ. Cold working of the materials can reduce their hot cracking susceptibility. The hot cracking susceptibility of 7075-T6 aluminum alloys is higher than that of 6061-T6.

The second part conducte single V-groove butt welding (GTAW) on three types of heat treatable aluminum alloys 2024-T351, 6061-T6 and 7075-T6 and compared the angular distortion levels of the three aluminum alloys at different

Vee preparation angles with or without restraint. Experimental results demonstrated the single Vee preparation angle (amount of filler metal) in butt welding affected the angular distortion of the weldment. Non-restraint, the angular distortion tended to increase with the single Vee preparation angle. Meanwhile, the angular distortion tended to decrease when the single Vee preparation angle was 60° . Additionally, a restrained weldment had high angular distortion when the single Vee preparation angle was 0° . The high-temperature yield strength of a material also affected its angular distortion. Angular distortion increased with high-temperature yield strength. Experimental results also showed that, from strongest to the weakest, the high-temperature yield strength of the three types of aluminum alloys followed the order 6061-T6 and 2024-T351 > 7075-T6.

The third part investigates the residual stress of weldment. The residual stress increases with the Vee preparation angle above 60° . When the Vee preparation angle was below 50° , the volume of melted metal in the weld differed greatly from that in the V-groove before welding. Therefore, when the Vee preparation angle was below 50° , estimating the residual stress from the Vee preparation angle was more difficult. The weldment to restraint have a large residual tensile stress, residual tensile stress in the restrain corner is large. The final residual stress is determined by the yield strength at the equilibrium temperature of the weldment. The angular distortion is proportional to the residual stress in the same material. The non-restrained weldment has a large angular distortion but a small residual tensile stress

目 錄

	頁次
中文摘要.....	I
英文摘要.....	III
誌 謝.....	
目 錄.....	V
表 目 錄.....	VIII
圖 目 錄.....	IX
第一章 前言	1
1.1 研究背景與動機.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 研究方法.....	2
第二章 文獻探討	4
2.1 鋁合金之特性和分類.....	4
2.1.1 鋁及鋁合金之特性.....	4
2.1.2 鋁合金的分類.....	4
2.2 鋁合金的銲接性.....	8
2.3 鋁合金銲接缺陷.....	8
2.3.1 氣孔.....	9
2.3.2 熱裂.....	12
2.3.3 熱影響區強度降低.....	24
2.3.4 變形.....	26
2.4 銲接殘留應力.....	34

2.4.1 銲接殘留應力簡介.....	34
2.4.2 銲接殘留應力之形成.....	34
2.4.3 銲接殘留應力之量測—鑽孔應變計法.....	37
第三章 實驗方法與步驟.....	47
3.1 熱裂性試驗.....	48
3.1.1 實驗材料.....	48
3.1.2 走銲操作.....	48
3.1.3 點可調式應變試驗.....	49
3.1.4 熱裂縫觀察與計算.....	49
3.1.5 金相組織觀察.....	50
3.1.6 破斷面 SEM 觀察及 EDS 分析.....	51
3.2 角變形量及殘留應力量測.....	51
3.2.1 實驗材料.....	51
3.2.2 銲接方式及參數.....	51
3.2.3 角變形量量測.....	51
3.2.4 殘留應力量測.....	53
第四章 結果與討論.....	57
4.1 熱裂性試驗.....	57
4.1.1 熱循環次數與熱裂敏感性之關係.....	58
4.1.2 外加應變量對熱裂縫之影響.....	58
4.1.3 不同材料之熱裂敏感性比較.....	71
4.1.4 SEM 觀察及 EDS 分析.....	72
4.2 角變形分析.....	81
4.2.1 拘束 (Restrain) 對角變形量之影響.....	81

4.2.2 單 V 形槽角度對角變形量之影響.....	89
4.2.3 材料降伏強度對角變形量之影響.....	90
4.3 殘留應力分析.....	93
4.3.1 開槽角度對銲件殘留應力之影響.....	94
4.3.2 拘束對銲件殘留應力之影響.....	100
4.3.3 不同材料之殘留應力比較.....	107
4.3.4 殘留應力與銲件角變形之關係.....	112
第五章 結論.....	117
參考文獻.....	120



表目錄

	頁次
表 2-1 鍛造用鋁合金之種類	5
表 2-2 鋁合金加工或熱處理條件的代號	6
表 2-3 2024 與 6061 鋁合金主要析出物之析出序列及各階段析出物 之形狀結構特性.....	7
表 2-4 與金屬變形有關之特性	29
表 3-1 6061-T6 及 7075-T6 鋁合金化學成份表.....	48
表 3-2 銲接參數表.....	48
表 3-3 可調應變試驗銲接參數表	49
表 3-4 單 V 形槽對接銲接參數表.....	52



圖目錄

	頁次
圖 2-1 不同溫度下鋁對氫溶解度的變化	10
圖 2-2 氫氣的露點溫度對氣孔生成的影響	10
圖 2-3 鐳道氣孔對機械性質的影響.....	11
圖 2-4 鐳道氣孔對疲勞強度的影響.....	11
圖 2-5 鐳接熱裂縫的分類.....	13
圖 2-6 熱裂綜合理論示意圖.....	15
圖 2-7 凝固裂縫示意圖.....	16
圖 2-8 兩面角與晶界液態薄膜分佈之關係	16
圖 2-9 析出物缺乏區熱裂示意圖.....	19
圖 2-10 鋁合金中 Cu 及 Mg 合金成份對裂縫敏感性之影響	19
圖 2-11 鋁合金熱裂敏感性與合金成份的關係	20
圖 2-12 可調應變試驗示意圖.....	22
圖 2-13 橫向可調應變試驗示意圖.....	22
圖 2-14 點鐳可調應變試驗示意圖.....	23
圖 2-15 自行研發之多功能可調應變試驗機	24
圖 2-16 多功能可調應變試驗機試驗情形	24
圖 2-17 熱處理型鋁合金鐳後熱影響區組織圖	26
圖 2-18 金屬在有拘束及無拘束下受熱及冷卻後之體積變化情形	27
圖 2-19 鐳接變形之形式.....	31
圖 2-20 對接鐳角變形之形成.....	32
圖 2-21 殘留應力之分佈圖.....	35
圖 2-22 鐳接殘留應力形成之示意圖.....	35

圖 2-23 銲接過程中溫度與殘留應力變化之示意圖	36
圖 2-24 對接銲典型殘留應力之大小與分佈圖	37
圖 2-25 應變釋放圖	38
圖 2-26 花型三軸應變計之排列設計圖	39
圖 2-27 平面雙軸向應力狀態圖	39
圖 2-28 \bar{a} 、 \bar{b} 與 D/D_0 之關係曲線圖	44
圖 2-29 釋放之應變與鑽孔深度和應變規直徑比值(Z/D)之關係	45
圖 3-1 實驗流程圖	47
圖 3-2 試片點銲及熱循環示意圖	50
圖 3-3 試片開槽角度示意圖	52
圖 3-4 試片拘束示意圖	52
圖 3-5 (a) 變形之量測位置	54
圖 3-5 (b) 角變形值之定義示意圖	54
圖 3-6 殘留應力量測設備	55
圖 3-7 EA-XX-062RE-120 花型三軸應變計	56
圖 4-1 熱循環次數對熔融區熱裂縫之影響	59
圖 4-2 熱循環次數對熔融區熱裂縫之影響	60
圖 4-3 不同熱循環次數熔融區及熱影響區示意圖	61
圖 4-4 7075-T6(H)不同熱循環次數下熔融區之組織	62
圖 4-5 熱循環次數對熱影響區(HAZ)熱裂縫之影響	63
圖 4-6 熱循環次數對熱影響區(HAZ)熱裂縫之影響	64
圖 4-7 銲接金屬熱影響區(W. M. HAZ)及母材熱影響區(B. M. HAZ) 之熱裂縫分佈	65
圖 4-8 熱循環次數對熱影響區(HAZ)熱裂縫之影響(3%外加應變) ...	67

圖 4-9 四種鋁合金在二次及三次熱循環下銲接金屬熱影響區 (W. M. HAZ)組織	68
圖 4-10 不同應變量對熱裂縫總長度之影響	69
圖 4-11 不同應變量對熱裂縫總長度之影響	70
圖 4-12 四種鋁合金金相組織.....	73
圖 4-13 不同鋁合金之熱裂敏感性比較.....	75
圖 4-14 四種鋁合金熔融區熱裂縫表面.....	77
圖 4-15 四種鋁合金 HAZ 熱裂縫表面	79
圖 4-16 7075-T6 鋁合金 PMZ 之 SEM 觀察及 EDS 分析.....	80
圖 4-17 各種鋁合金銲件銲後之角變形.....	84
圖 4-18 單 V 形槽對接銲角變形之形成示意圖.....	85
圖 4-19 無拘束銲件角變形產生示意圖.....	85
圖 4-20 受拘束銲件角變形產生示意圖.....	86
圖 4-21 各種不同單 V 形槽角度銲後之角變形量.....	88
圖 4-22 各種鋁合金材料銲後之角變形量比較	92
圖 4-23 殘留應力量測位置示意圖.....	93
圖 4-24 2024-T351 鋁合金銲件殘留應力.....	95
圖 4-25 6061-T6 鋁合金銲件殘留應力	96
圖 4-26 7075-T6 鋁合金銲件殘留應力	97
圖 4-27 6061-T6 鋁合金銲接過程之熱循環曲線.....	98
圖 4-28 各種開槽角度試片銲道斷面.....	99
圖 4-29 2024-T351 試片受拘束及不受拘束殘留應力比較.....	102
圖 4-30 6061-T6 試片受拘束及不受拘束殘留應力比較.....	104
圖 4-31 7075-T6 試片受拘束及不受拘束殘留應力比較.....	106

圖 4-32 開槽角度 45° 拘束及不拘束鉸件殘留應力比較	108
圖 4-33 開槽角度 60° 拘束及不拘束鉸件殘留應力比較	109
圖 4-34 開槽角度 90° 拘束及不拘束鉸件殘留應力比較	110
圖 4-35 三種鋁合金降伏強度與溫度之關係	111
圖 4-36 2024-T351 鋁合金角變形量與最大殘留拉伸應力之關係.....	114
圖 4-37 6061-T6 鋁合金角變形量與最大殘留拉伸應力之關係.....	115
圖 4-38 7075-T6 鋁合金角變形量與最大殘留拉伸應力之關係.....	116



