

4.3 殘留應力分析

本研究將上述量測完角變形之試片以鑽孔法進行殘留應力之量測，2024-T351 已進行過應力消除處理，6061-T6 及 7075-T6 母材係經滾軋過之板材，銲接前經量測其殘留應力 6061-T6 為 -25.6MPa ，7075-T6 為 -50.32MPa ，為消除此一殘留之壓縮應力，分別將其進行應力消除退火之熱處理，6061-T6 之退火溫度為 240°C ，保持時間 8 小時；7075-T6 之退火溫度為 225°C ，保持時間亦為 8 小時，經退火處理過之材料，其材料應力經量測幾乎都已消除，可避免原殘留應力影響銲後之殘留應力。

為探討殘留應力與開槽角度、拘束及角變形之相關性，本研究殘留應力量測之位置係沿著銲道垂直方向進行，由於銲道部位無法量測，因此自距銲道中心線 10mm 處開始量測，量測位置如圖 4-23 所示。

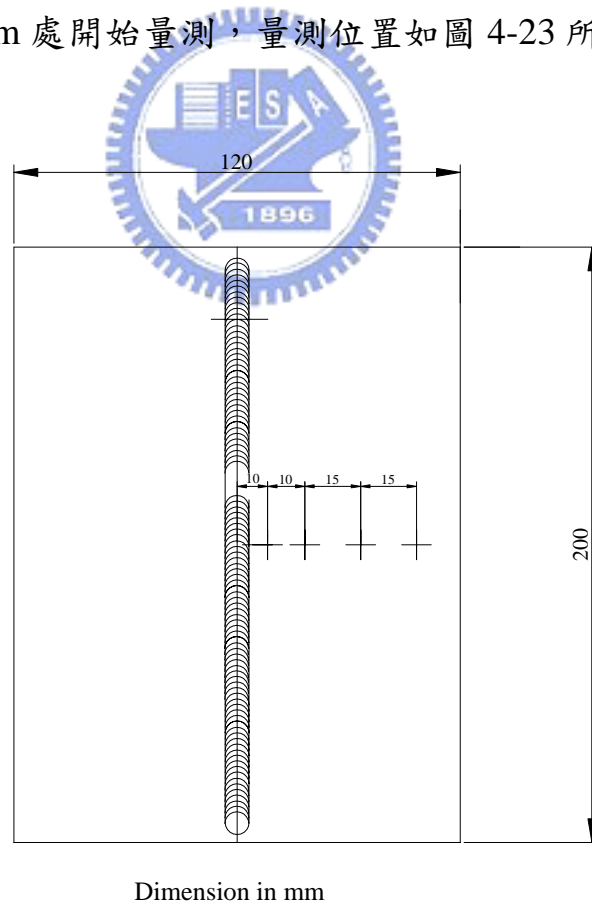


圖 4-23 殘留應力量測位置示意圖

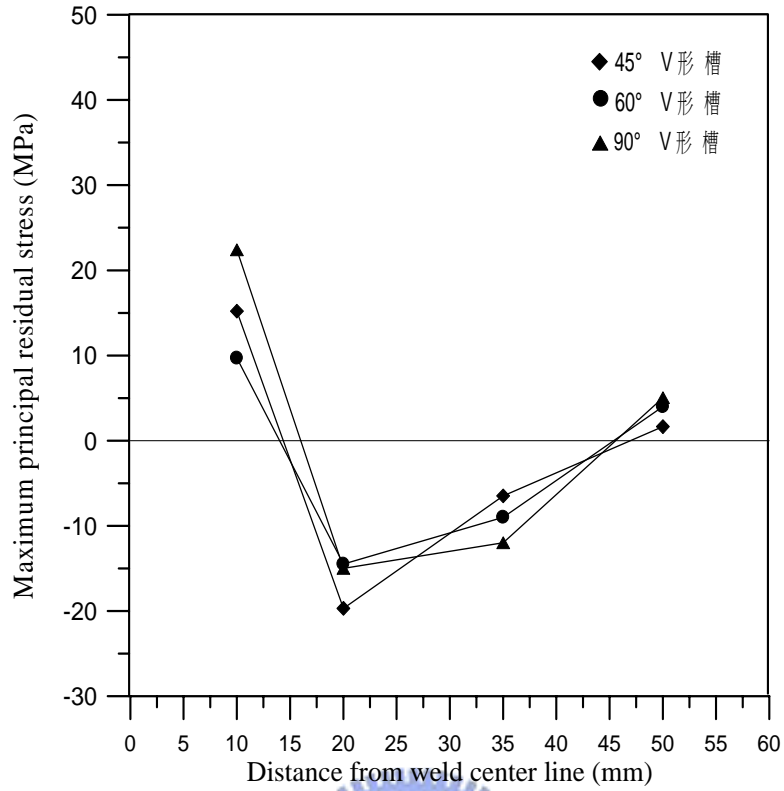
4.3.1 開槽角度對銲件殘留應力之影響

圖 4-24 至 4-26 為 2024-T351、6061-T6 及 7075-T6 三種鋁合金在 45°、60° 及 90° 之開槽角度下，銲後之殘留應力量測結果。研究結果顯示：不論何種材料，開槽角度為 90° 之試片，在靠近銲道處均有較高之殘留拉伸應力，其次為開槽角度 45°，開槽角度 60° 之試片其殘留之拉伸應力較小。

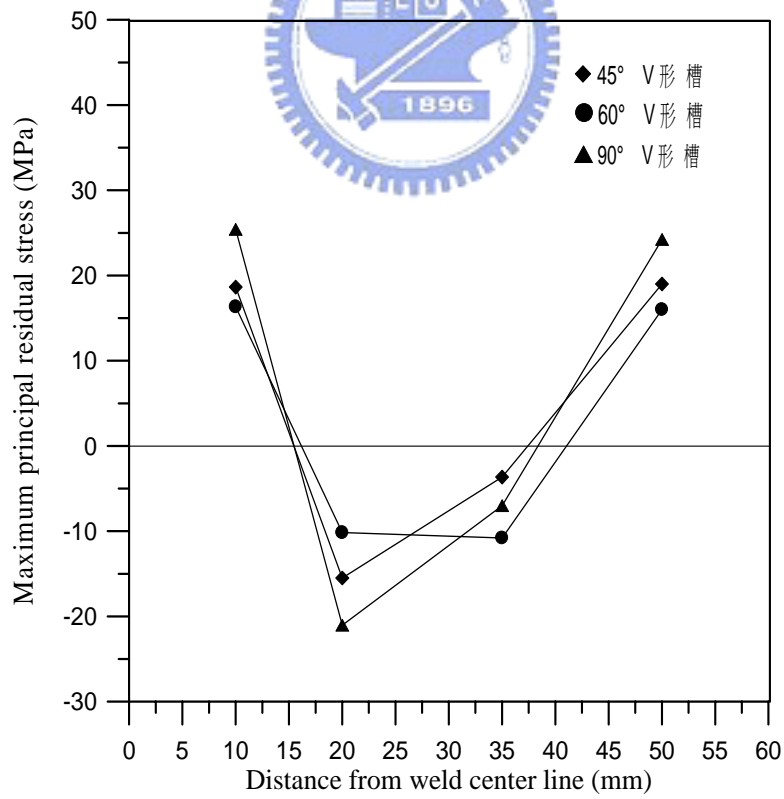
銲件之殘留應力係因銲接過程中不均勻之受熱所造成，圖 4-27 為 6061-T6 鋁合金在本研究使用之銲接參數下其熱循環曲線。材料在銲接過程中因受熱會產生熱應變，此熱應變將造成材料之伸長，從熱循環曲線中可知隨距離銲道之遠近會有不同之溫度，亦即各部位之熱膨脹不同，而形成內應力，此時產生之內應力為壓縮應力；當銲道冷卻凝固時，銲道金屬由液態變成固態，將造成體積之收縮，而由於受到銲道旁母材之牽制，銲道部位及其附近將形成一殘留之拉伸應力區。

因此，銲道熔填融金屬之體積大小將會影響銲道部位之殘留應力之大小，開槽角度為 90° 之試片有最多之熔融金屬量，因此會造成較大之收縮應力，而殘留較高之拉伸應力，而開槽角度為 45° 之試片，理論上其熔融金屬量應少於開槽角度為 60° 之試片，但研究結果卻顯示其殘留之拉伸應力大於 60° 之試片。此結果應與開槽角度 45° 之試片，其銲道之真正熔融金屬量與銲接前之接頭幾何形狀有較大之差異所造成，圖 4-28 為各種開槽角度試片銲後之銲道實體圖，由圖中可發現開槽角度為 45° 之試片，其銲道斷面熔融金屬之面積並不小於開槽角度為 60° 之試片。

綜上所述，銲道熔填金屬量之多寡將會影響銲件之殘留拉伸應力之大小，銲道熔填金屬量越多，殘留拉伸應力就越大，而銲道熔填金屬量與銲道之開槽角度有關，一般而言，開槽角度越大，熔填金屬量越多，但當開

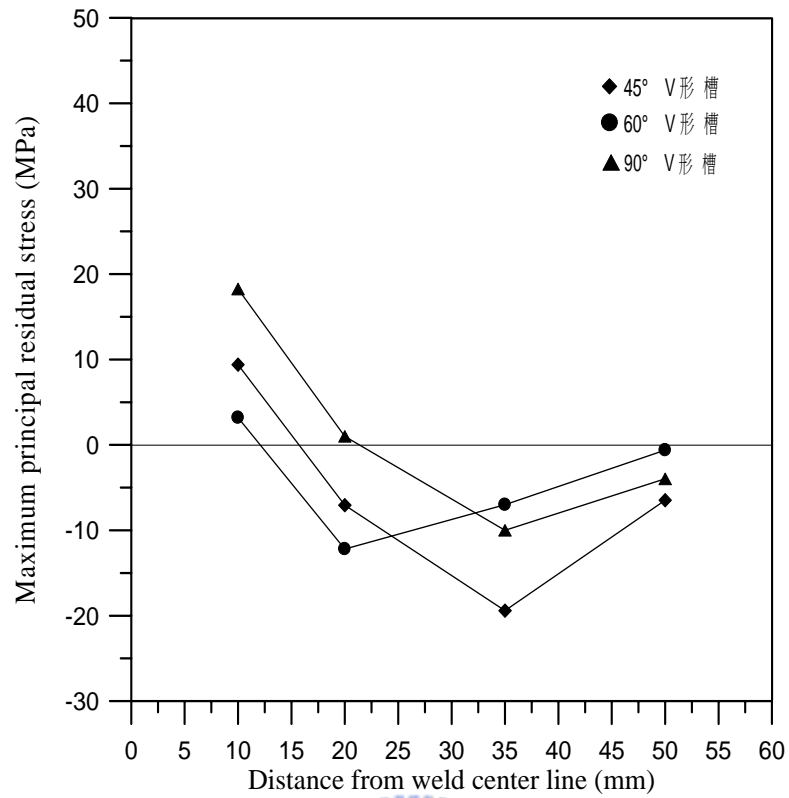


(a)

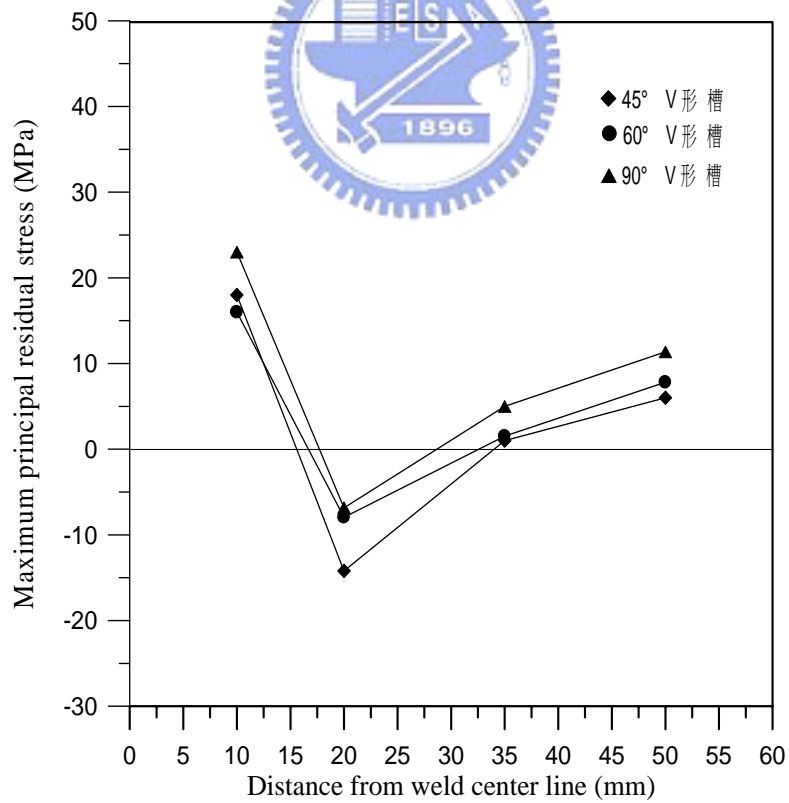


(b)

圖 4-24 2024-T351 鋁合金鋁件殘留應力 (a)無拘束(b)有拘束

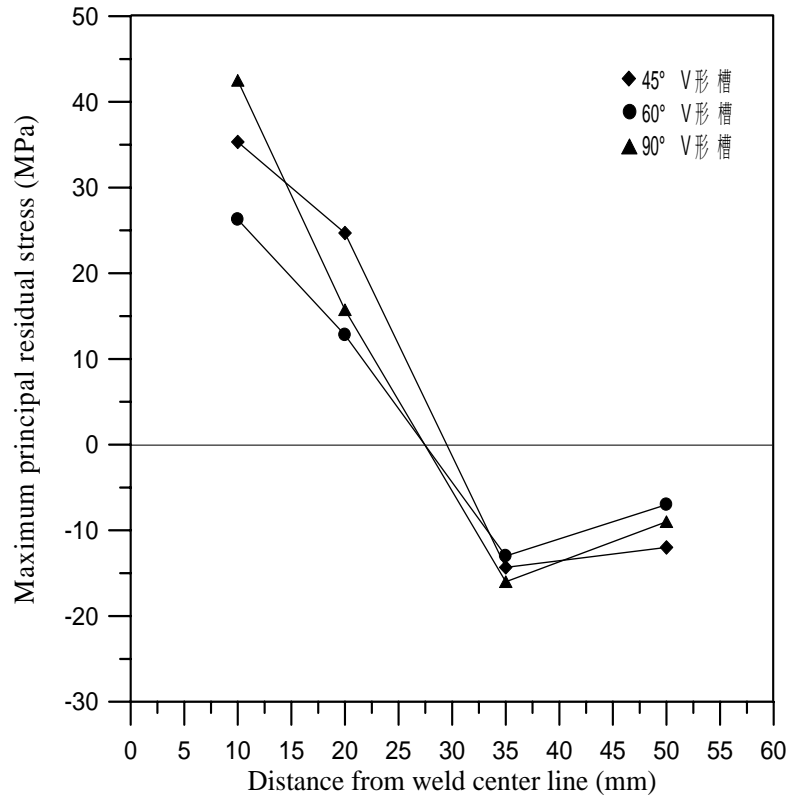


(a)

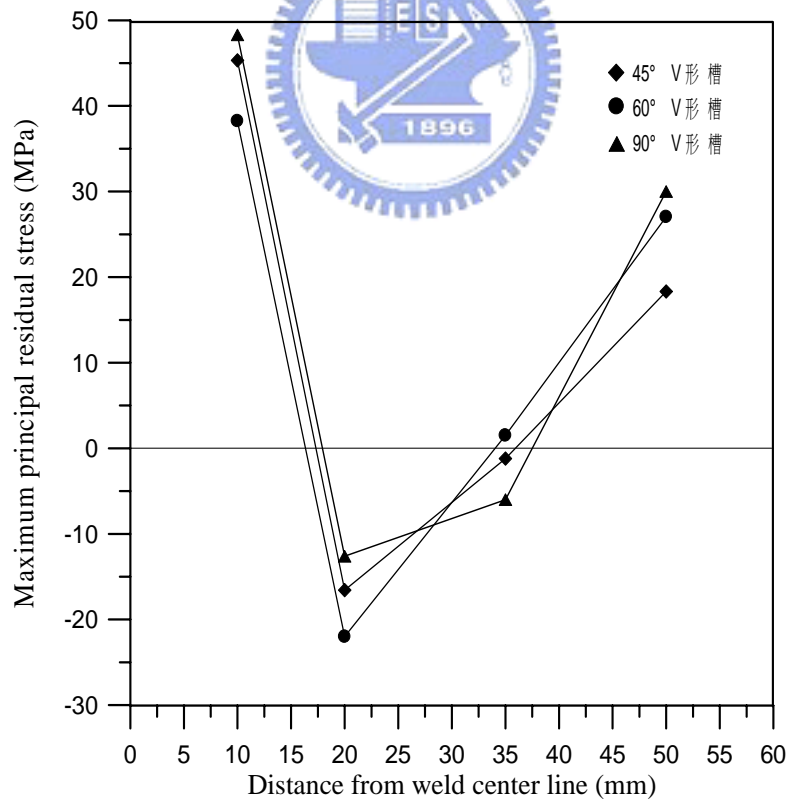


(b)

圖 4-25 6061-T6 鋁合金銲件殘留應力 (a)無拘束(b)有拘束



(a)



(b)

圖 4-26 7075-T6 鋁合金銲件殘留應力 (a)無拘束(b)有拘束

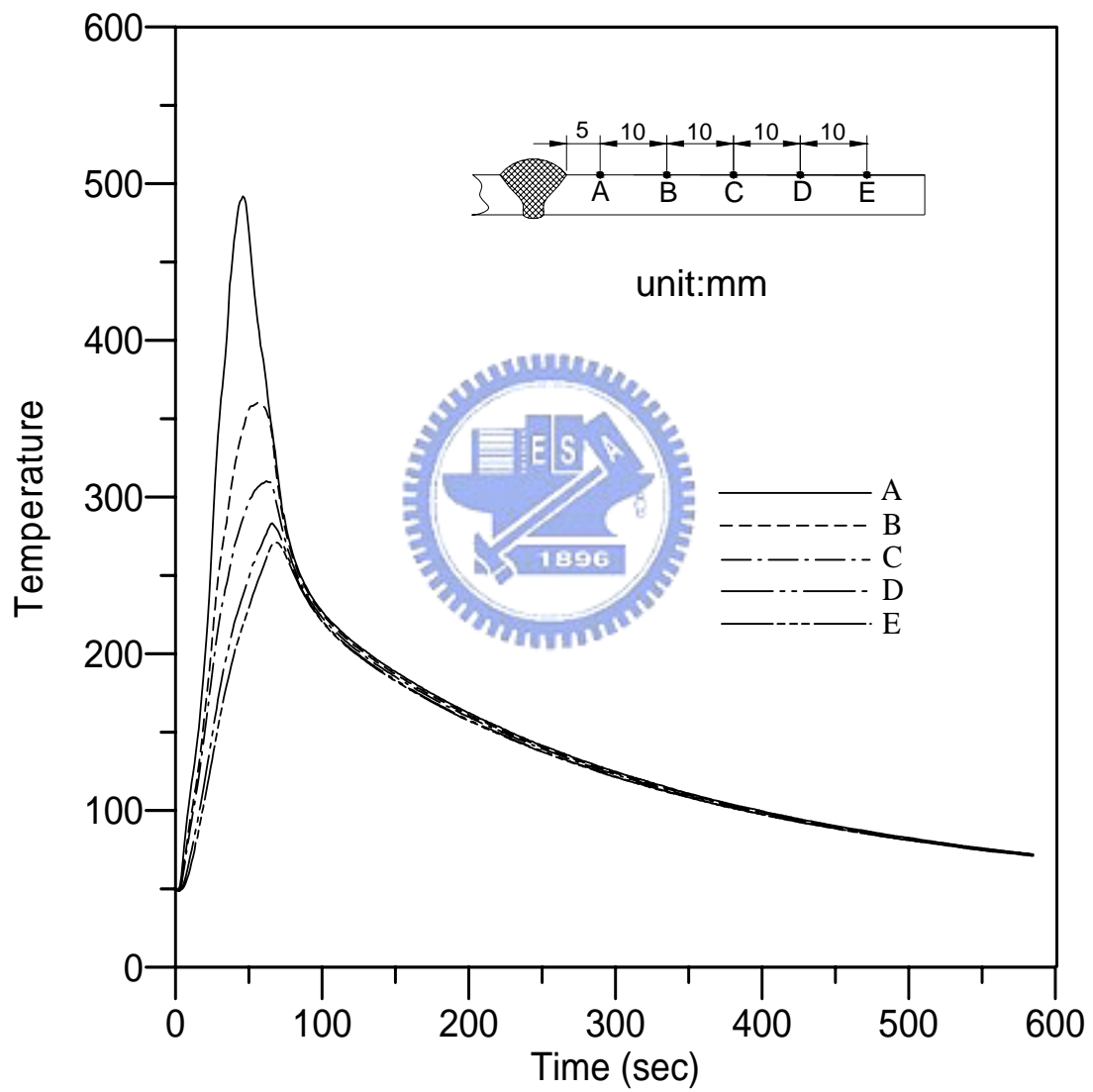
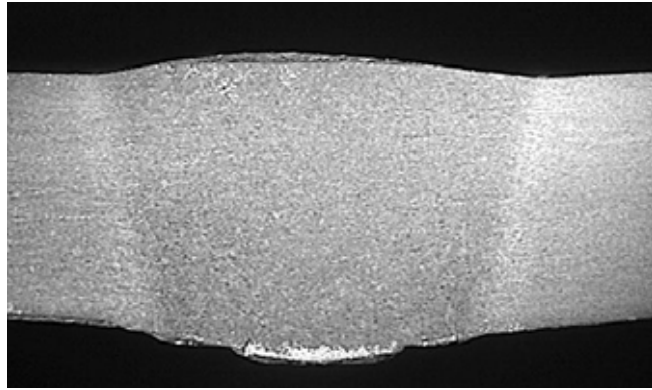
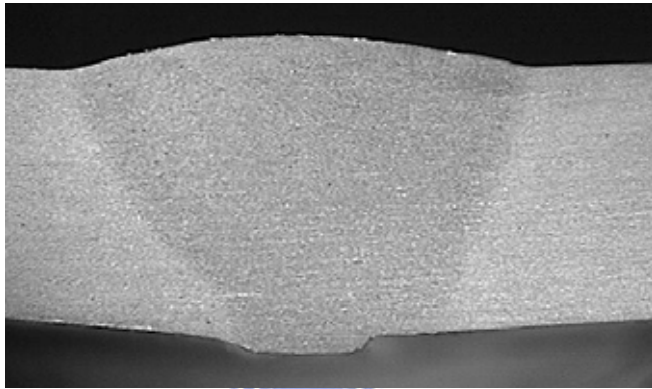


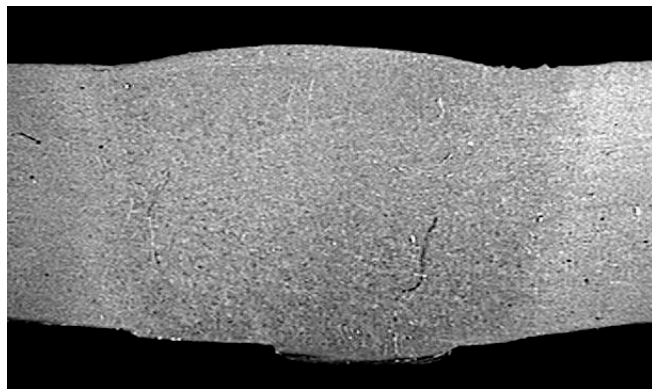
圖 4-27 6061-T6 鋁合金銲接過程之熱循環曲線



(a)



(b)



(c)

圖 4-28 各種開槽角度試片鐳道斷面 (a) 45° (b) 60° (c) 90°

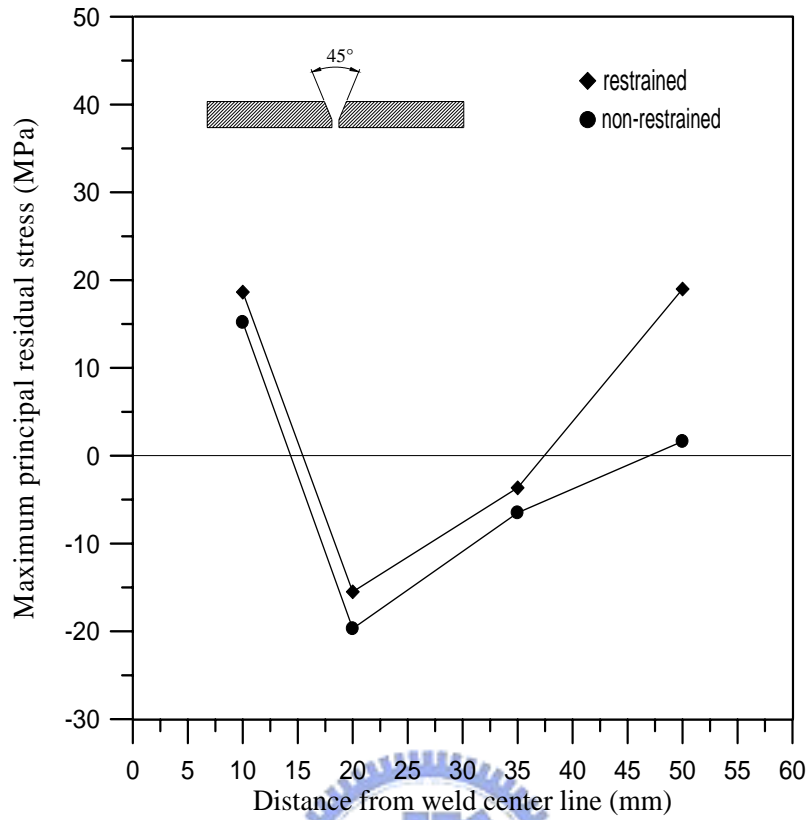
槽角度過小時(小於 50°)，其鐸道熔填金屬量與原先接頭預置之幾何形狀就會有較大之差異，而無法達到降低熔填金屬量之效果，因此，適當之開槽角度能將鐸件之殘留應力降至最低，過小之開槽角度對降低鐸件之殘留應力並無助益。

就拉伸應力區之大小比較，三種材料在同樣受拘束或不受拘束狀態下，不同之開槽角度其拉伸應力區之大小似乎差距不大，因此開槽角度之大小對鐸件殘留拉伸應力區之大小並無太大之影響。

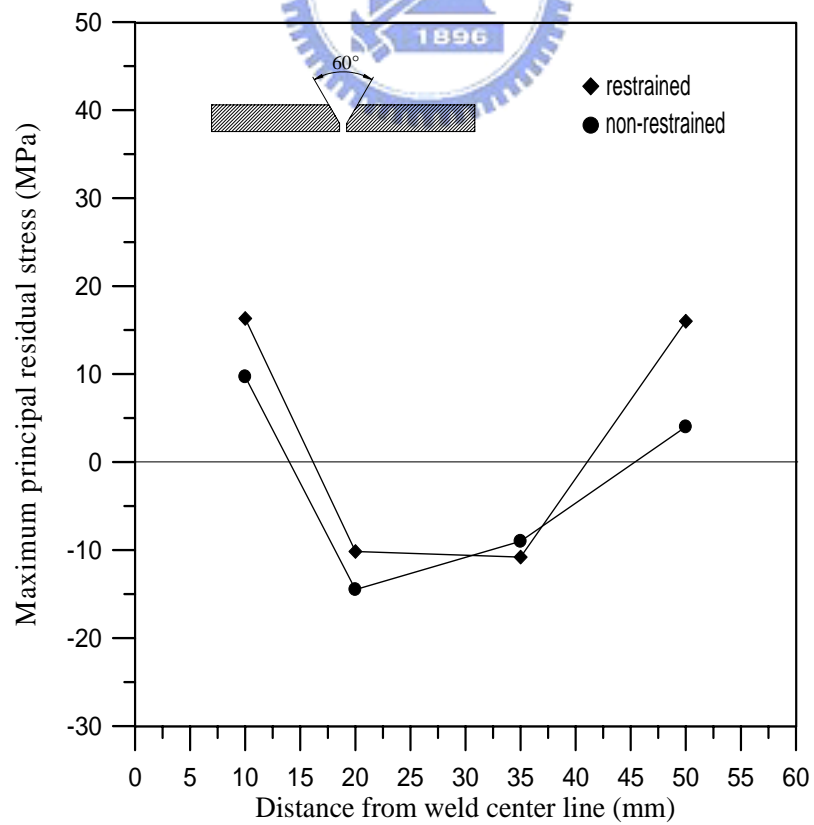
4.3.2 拘束對鐸件殘留應力之影響

圖 4-29 至圖 4-31 為三種鋁合金在各種開槽角度下鐸接，受到拘束與不受拘束之殘留應力比較，研究結果顯示，受到拘束之試片在靠近鐸道附近有較高之殘留應力，每種材料均呈現相同之現象。

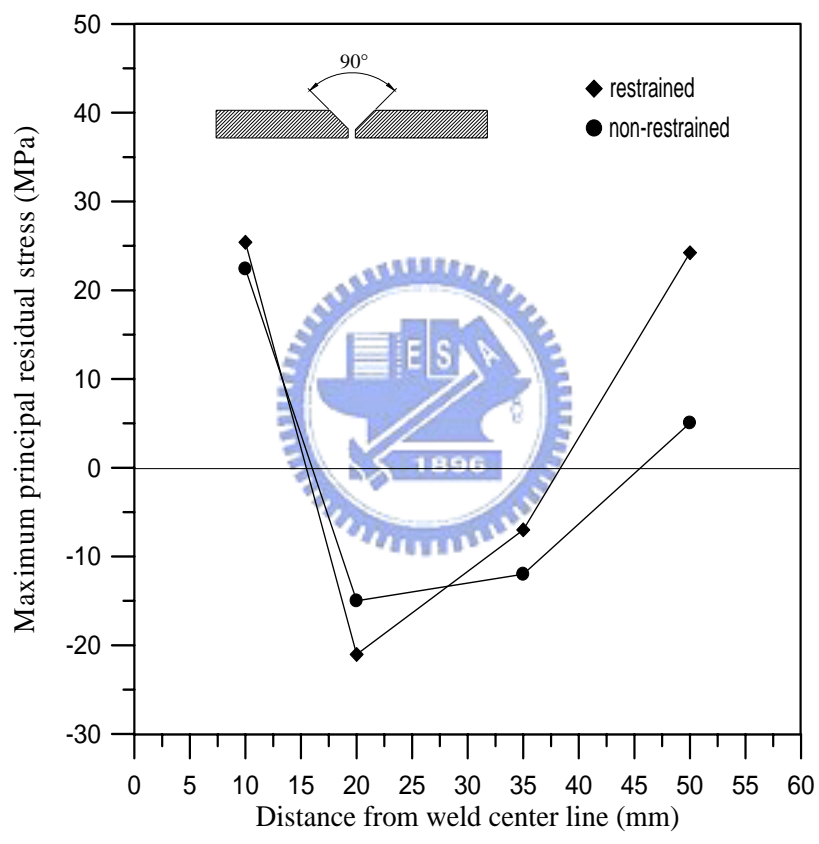
另從圖中發現，受到拘束之試片，在靠近試片邊緣受拘束處，會產生殘留之拉伸應力，而未受拘束之試片則無此現象，分析其原因，材料在鐸接之冷卻過程中，因溫度之下降造成體積之收縮，除鐸道熔融金屬外，整體試片亦會產生收縮，受到拘束之試片在收縮時，因受到拘束力量之限制而無法自由的收縮，依材料力學之分析：鐸件受熱時會產生熱應變 $\varepsilon_T = \alpha(\Delta T)$ ，此熱應變會造成 $\delta_T = L\alpha(\Delta T)$ 之伸長量，但當鐸件受到拘束時因無法自由之伸展，而會產生熱應力 $\sigma_T = E\alpha(\Delta T)$ ，此熱應力在鐸接之加熱過程以壓縮應力存在於材料內部，而在材料冷卻過程中，因受熱產生之熱應變將會消失，材料體積收縮，但因受到拘束無法自由的收縮，因此會在靠近拘束處產生一殘留拉伸應力。而未受拘束之試片，因其在加熱及冷卻過程中均能自由之伸展與收縮，因此其殘留應力之產生僅因材料受熱不均所造成，二者並不完全相同。而且受到拘束之試片在靠近鐸道處之殘



(a)



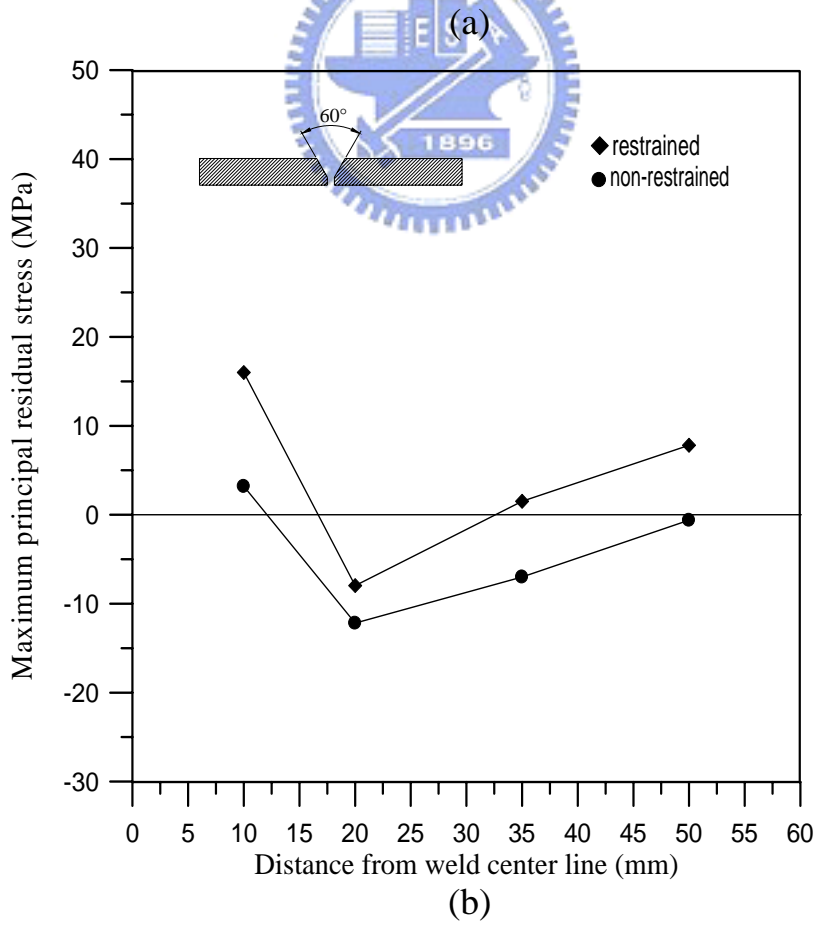
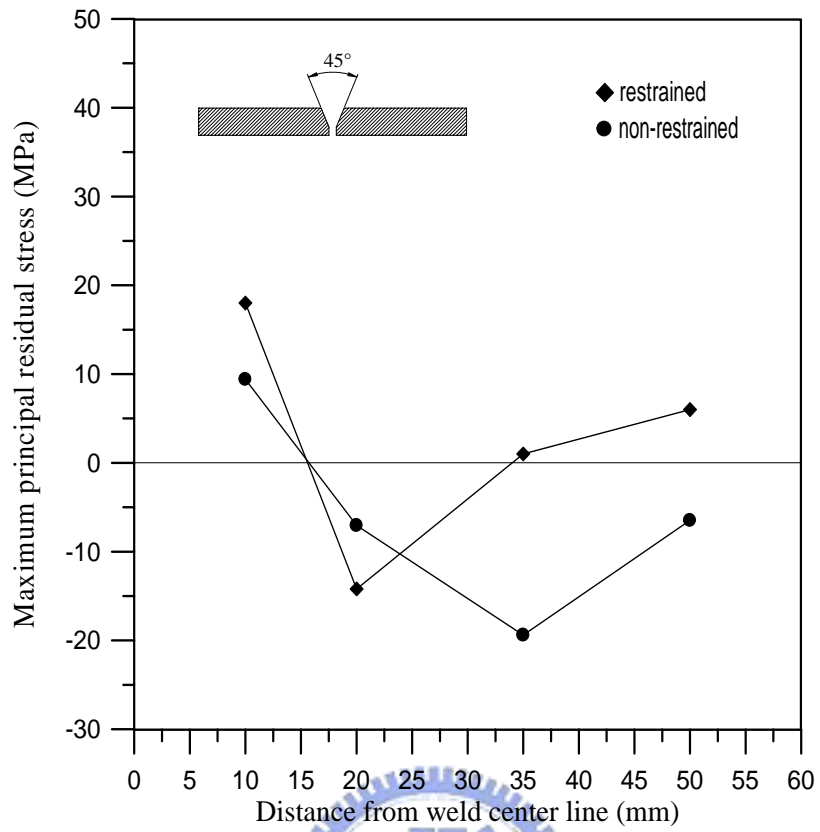
(b)

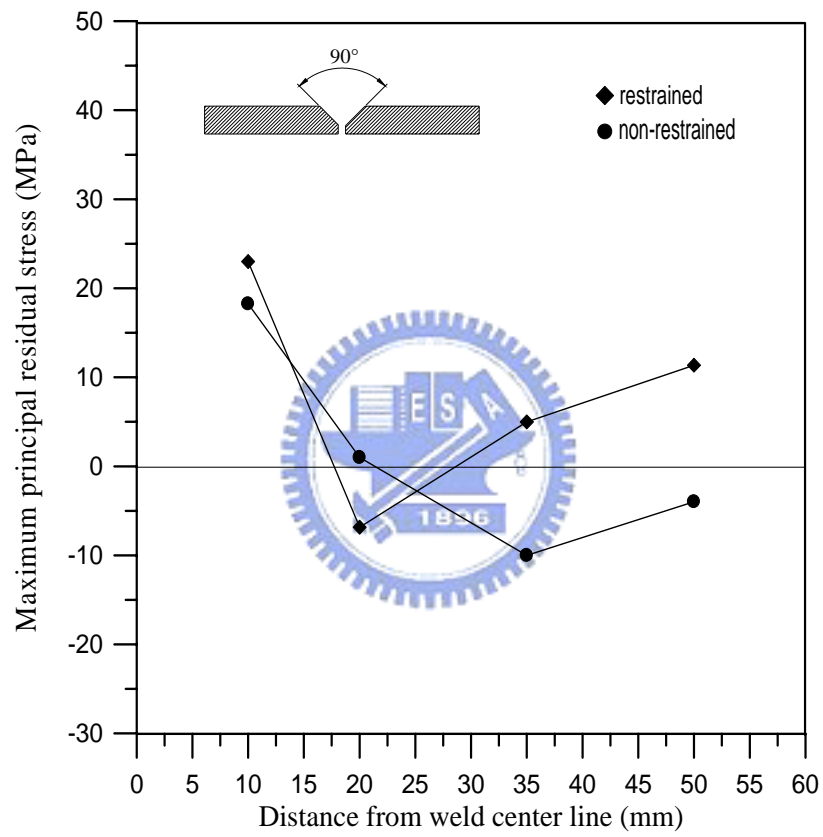


(c)

圖 4-29 2024-T351 試片受拘束及不受拘束殘留應力比較

(a) 45° (b) 60° (c) 90°

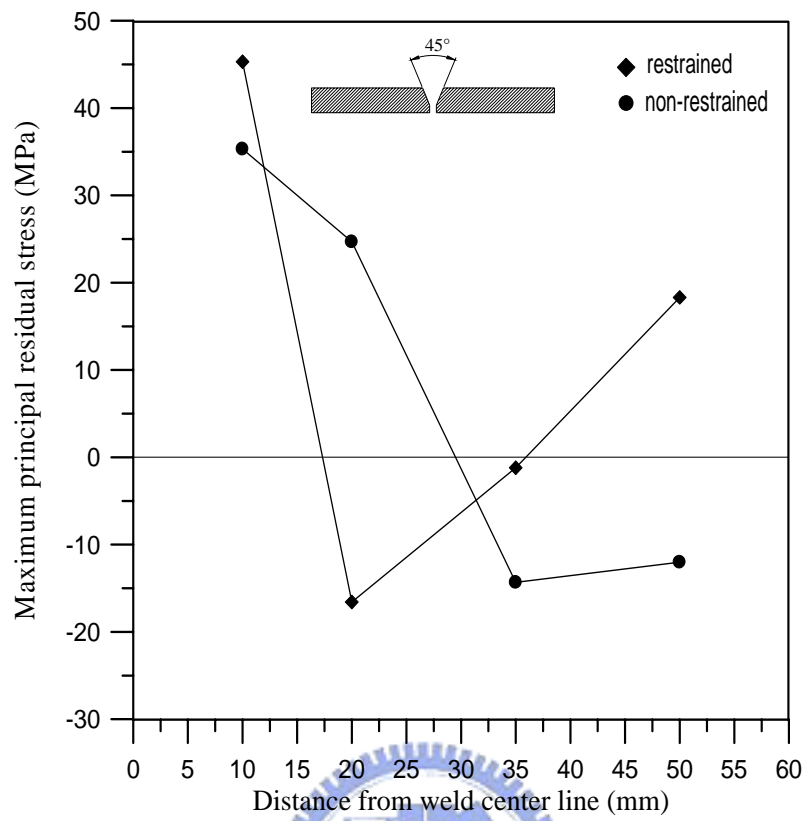




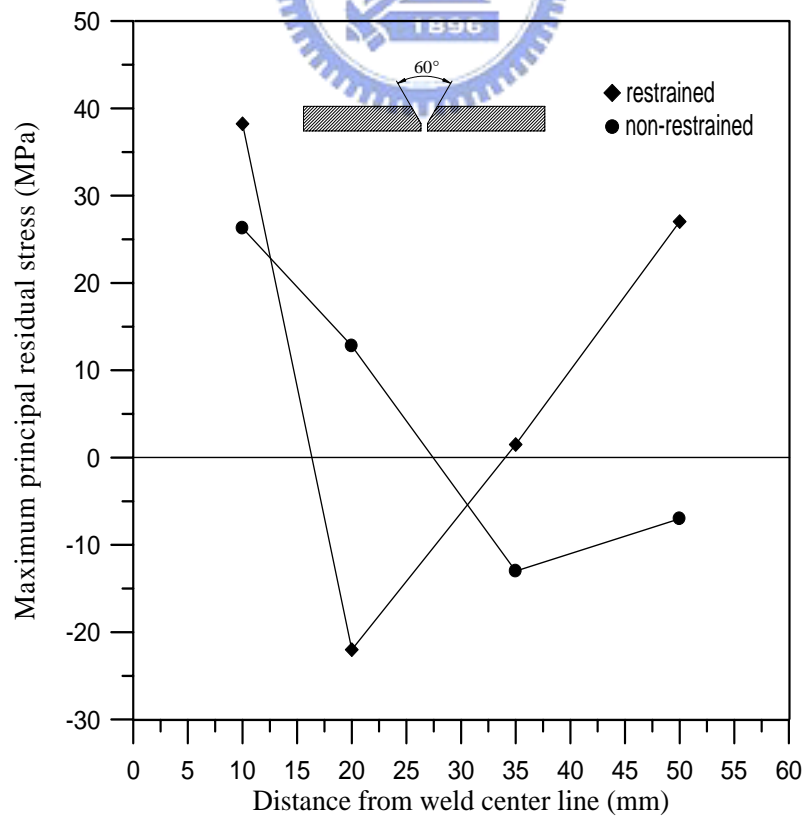
(c)

圖 4-30 6061-T6 試片受拘束及不受拘束殘留應力比較

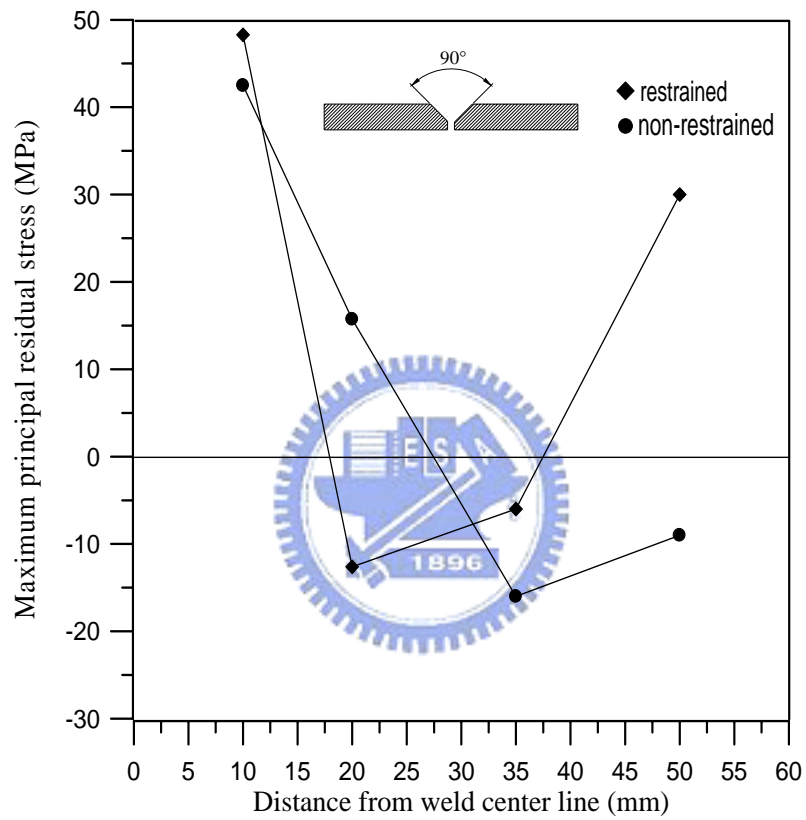
(a) 45° (b) 60° (c) 90°



(a)



(b)



(c)

圖 4-31 7075-T6 試片受拘束及不受拘束殘留應力比較

(a) 45° (b) 60° (c) 90°

留拉伸應力亦會受到拘束之影響而有較高之趨勢。

另就各試片拉伸應力區之大小比較，三種材料在相同開槽角度、受到拘束與不受拘束之狀態下，2024-T351 與 6061-T6 試片似乎無法看出拘束對殘留拉伸應力區之影響，但 7075-T6 試片則可明顯看出受到拘束之試片其殘留拉伸應力區較不受拘束者小許多，但在靠近邊緣之拘束處亦有一相當高之殘留拉伸應力存在，可能係因在試片邊緣之拉伸應力作用下，而使銲道旁之拉伸應力區縮小。

綜合以上分析：銲件受到拘束時，在銲道附近會產生較不受拘束試片為高之殘留拉伸應力，同時在受拘束處亦會產生一殘留拉伸應力，不受拘束試片則無此現象產生；在拉伸應力區之大小上，2024-T351 與 6061-T6 試片有無受到拘束不會有太大之差異，7075-T6 則受拘束試片在銲道旁之拉伸應力區小於不受拘束之試片，此可能與 7075-T6 鋁合金其降伏強度隨溫度之變化太大所造成。

4.3.3 不同材料之殘留應力比較

圖 4-32 至圖 4-34 為三種鋁合金在相同開槽角度下受到拘束與不受拘束之殘留應力比較，研究結果顯示，不論是拘束或不拘束之試片，7075-T6 鋁合金在靠近銲道附近之殘留拉伸應力最高，其次為 2024-T351 鋁合金，最低為 6061-T6 鋁合金。

分析其原因，7075-T6 鋁合金其常溫降伏強度為 500MPa，2024-T351 鋁合金為 375MPa，6061-T6 鋁合金為 265MPa，銲件最終之殘留應力除與其是否受到拘束有關外，應與母材之降伏強度亦有相當大之關聯。一般而言，材料之降伏強度越高，其所產生之殘留應力也越高。然材料之降伏強度會隨著溫度升高而降低，殘留應力大小應與某個溫度有關，依據殘留應

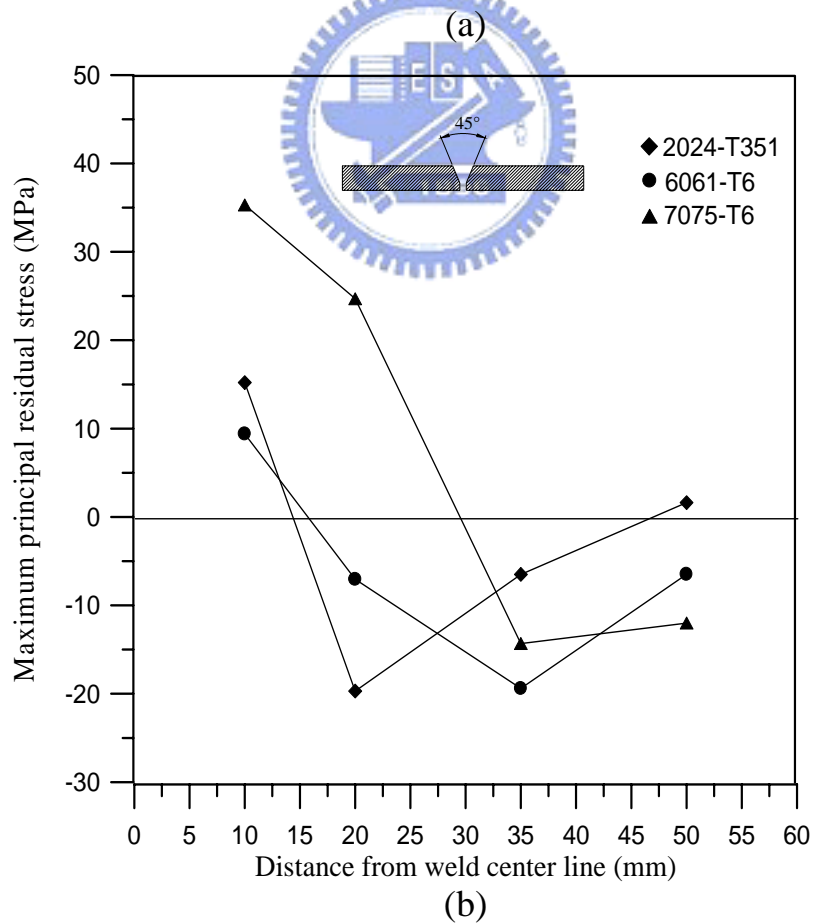
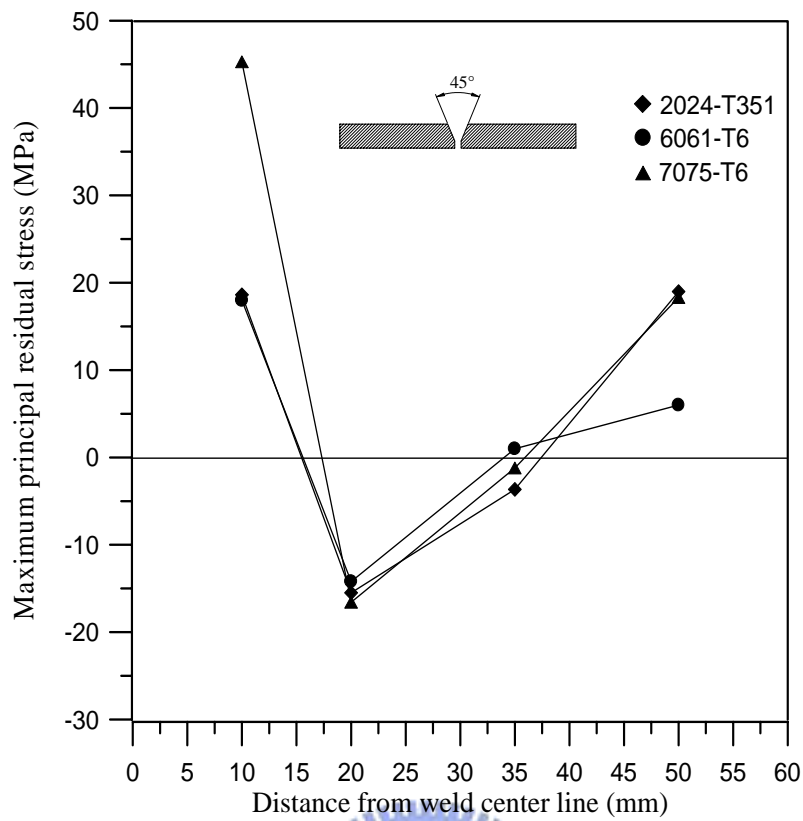


圖 4-32 開槽角度 45° 拘束及不拘束鋁件殘留應力比較(a)拘束(b)不拘束

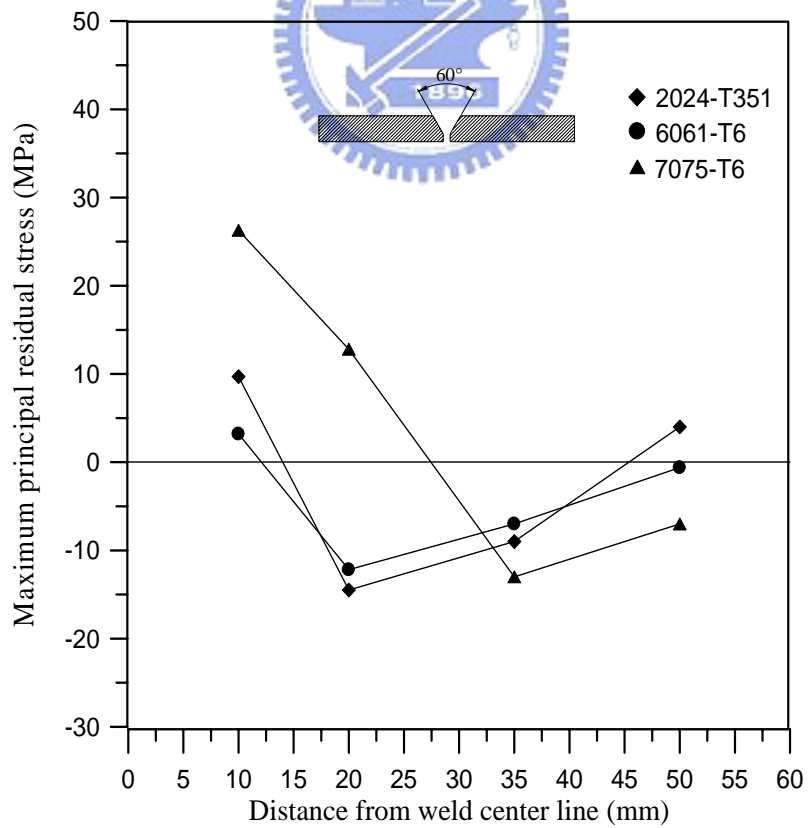
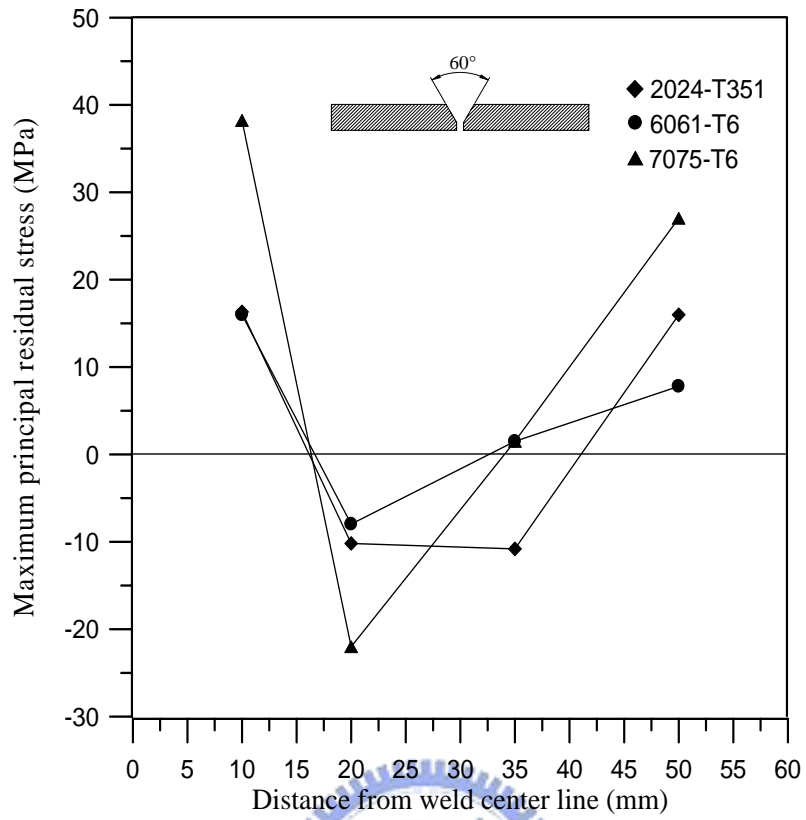


圖 4-33 開槽角度 60° 拘束及不拘束鋁件殘留應力比較 (a)拘束 (b)不拘束

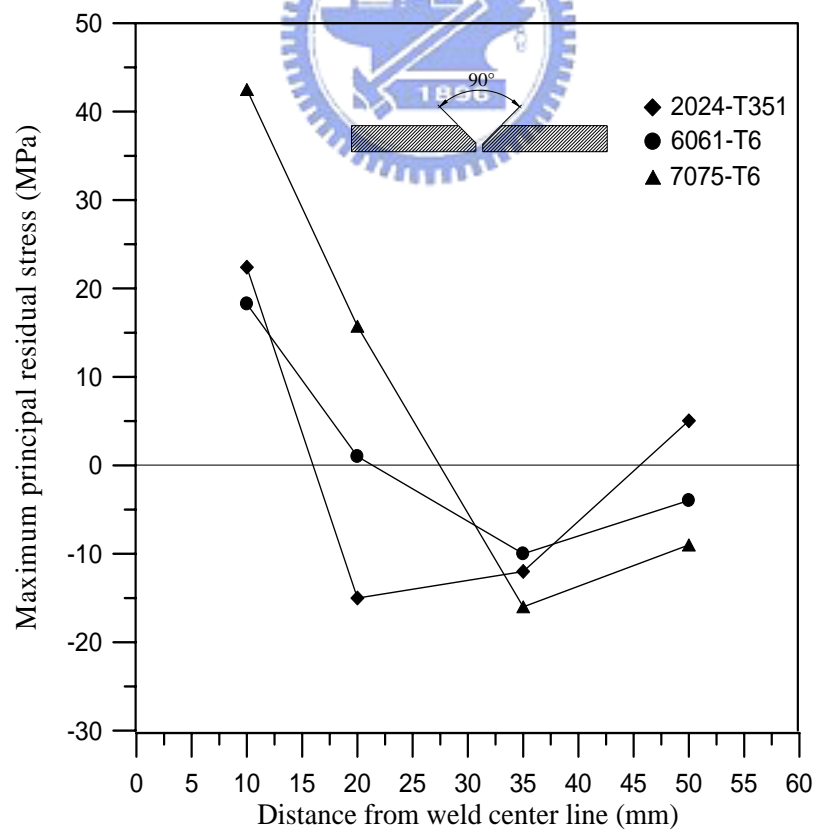
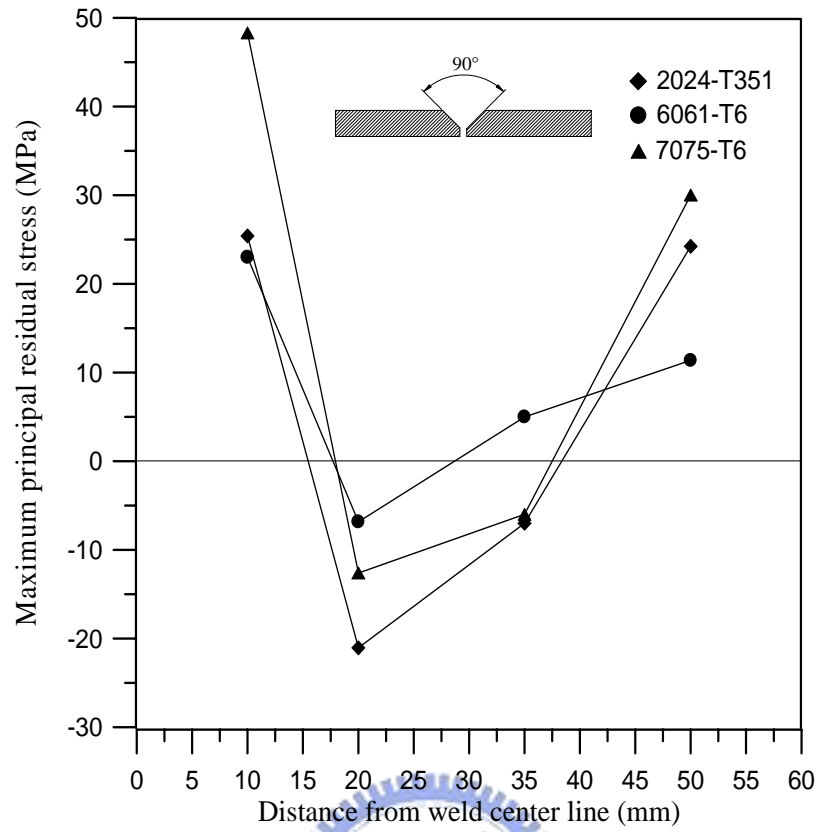


圖 4-34 開槽角度 90° 拘束及不拘束鋁件殘留應比較 (a)拘束 (b)不拘束

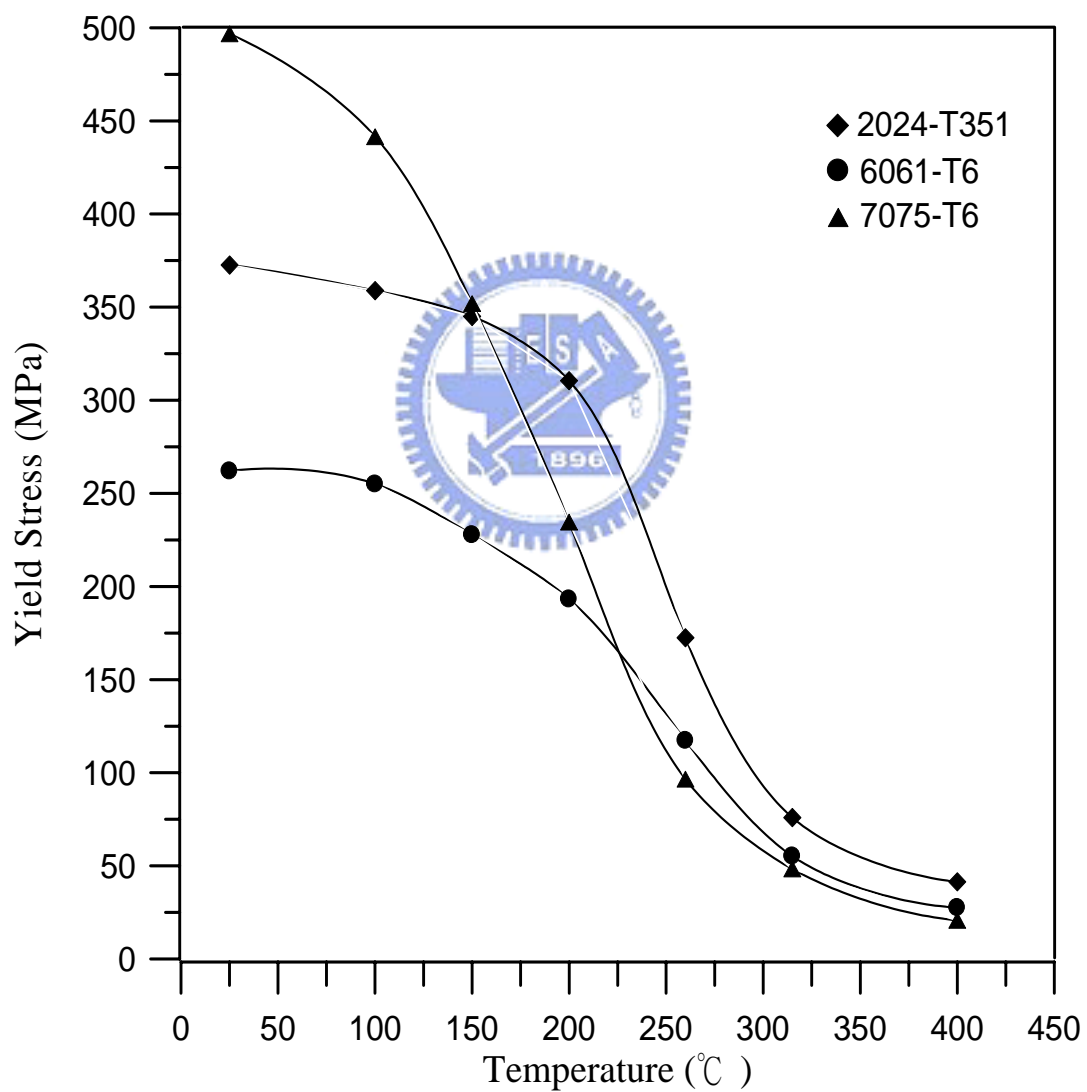


圖 4-35 三種鋁合金降伏強度與溫度之關係[2]

力產生之理論，殘留應力之大小似乎由鉸件在冷卻過程中在到達室溫前之平衡溫度所決定，從圖 4-27 之熱循環曲線來看(2024-T351、6061-T6 及 7075-T6 三種鋁合金之熱傳導係數相差不大，三者之熱循環曲線應類似)，材料之平衡溫度約在 100°C 以下，再參考圖 4-35，三種鋁合金之降伏強度與溫度關係之曲線，在 100°C 時，2024-T351 鋁合金之降伏強度為 360MPa，6061-T6 鋁合金為 260MPa，7075-T6 鋁合金為 450MPa，以 7075-T6 鋁合金之降伏強度最高，其次為 2024-T351 鋁合金，6061-T6 鋁合金最低，與殘留應力之量測結果相吻合，因此鉸件最終之殘留應力大小應是由平衡溫度時材料之降伏強度所決定。

4.3.4 殘留應力與鉸件角變形之關係

圖 4-36 至圖 4-38 為三種材料在各種開槽角度、受拘束及不受拘束下，其角變形量與鉸件鉸道旁最大之殘留拉伸應力之關係圖，圖中顯示單一材料之角變形量與其最大殘留拉伸應力成正比之關係，亦即殘留拉伸應力越大角變形量就越大，但就不同材料間比較，7075-T6 鋁合金有最大之殘留拉伸應力及最小之角變形量；2024-T351 有次大之殘留拉伸應力及次大之角變形量；6061-T6 鋁合金則有最小之殘留拉伸應力及最大之角變形量。

角變形之產生，如前所分析：受拘束之鉸件係由加熱過程中之膨脹與鉸道熔融金屬之冷卻收縮交互作用下所造成；不受拘束之鉸件，則純粹由鉸道熔融金屬之冷卻收縮所造成。殘留拉伸應力之形成主要在鉸件之收縮過程中所形成，亦即鉸件在冷卻過程中，如鉸道熔融金屬之收縮應力大於材料在該溫度之降伏強度時即會產生塑性變形，此塑性變形以角變形呈現，因此收縮力之大小與材料之降伏強度成正比關係。而隨著溫度之下降，材料之降伏強度逐漸上升，雖然材料持續收縮，但若收縮應力小於材料之降伏強度時，則無法使其產生塑性變形，而將以內應力之形態存在於

材料中。7075-T6 在高溫其強度小於 2024-T351 及 6061-T6 鋁合金，但隨著溫度之下降，在平衡溫度時(100°C 以下)其強度卻遠大於其他二種鋁合金，因此在鋁件持續之冷卻過程中，因其高溫強度較低，因此誘發之收縮應力較小，而有較小之角變形量；但隨著溫度之下降，其降伏強度大幅上升，收縮應力已無法造成角變形而形成內應力，因此具有較高之殘留應力。

再就拘束與殘留應力及角變形之關係而言，未受拘束之鋁件其角變形量都大於受拘束之鋁件，而其殘留之拉伸應力都小於受拘束之鋁件。因未受拘束之鋁件其在冷卻過程中能自由的收縮，因此會有較大之角變形量，但其殘留應力僅為材料本身因溫差所造成之不同收縮量所誘發，因此會有較小之殘留拉伸應力；受拘束鋁件如前所言，其角變形係由加熱過程之膨脹及冷卻過程之收縮所造成，因受到拘束，鋁件無法自由的收縮，因此會有較小之角變形量，但其殘留應力除材料本身溫差所造成之不同收縮量所誘發外，亦會有因拘束所造成之內應力，亦即受拘束之鋁件同時受到機械因素及冶金因素之作用，因此會有較大之殘留拉伸應力，。

綜上所述，鋁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，角變形量與殘留應力呈現正比之關係，但不同材料間之比較，則角變形量與材料之高溫降伏強度有較大之關聯，與材料之殘留應力無直接之關係，且此殘留應力不應僅以數值比較，還需考量材料在平衡溫度時之降伏強度。就拘束對材料之殘留應力及角變形之影響而言，未受拘束之鋁件其角變形量都大於受拘束之鋁件，而其殘留之拉伸應力都小於受拘束之鋁件。

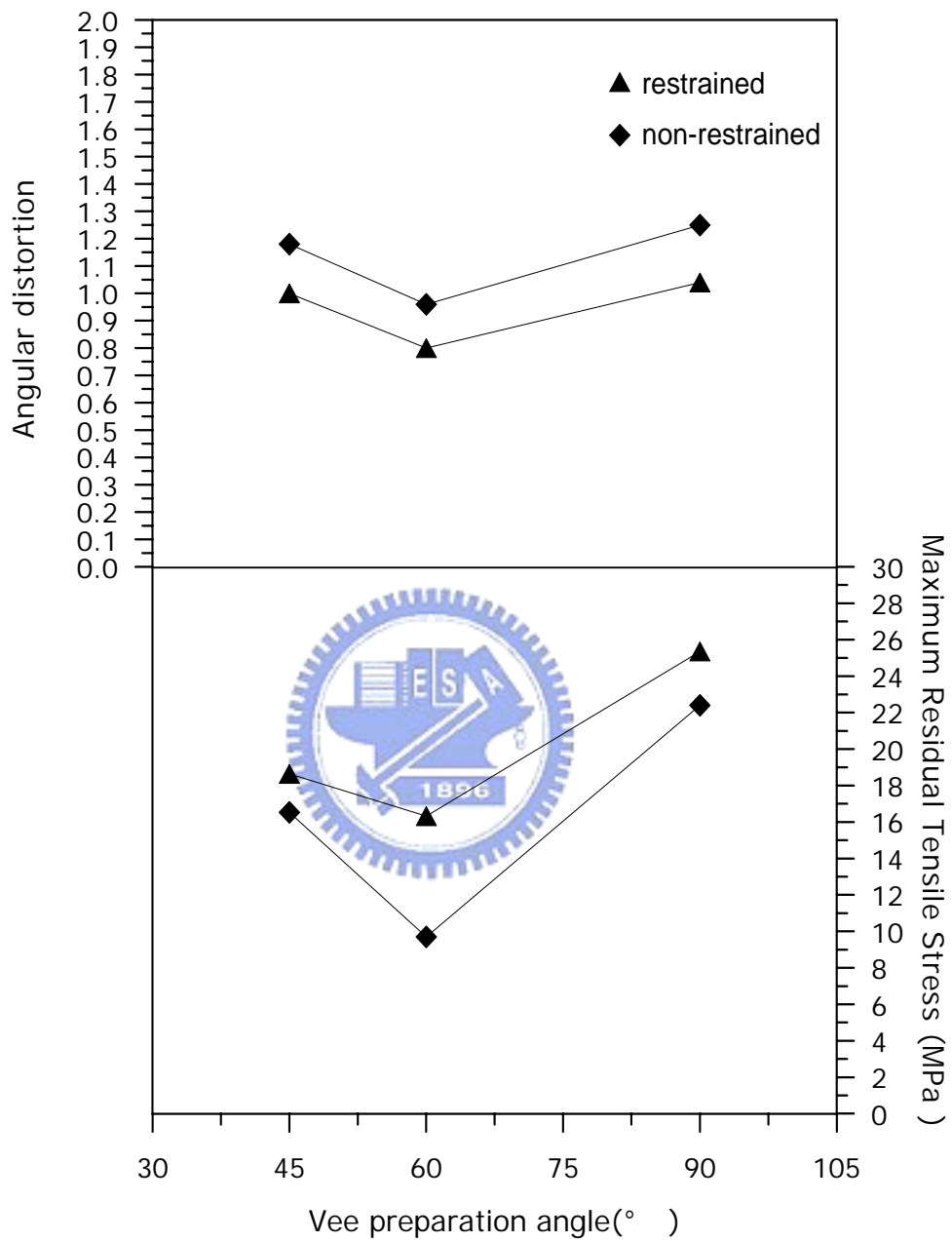


圖 4-36 2024-T351 鋁合金角變形量與最大殘留拉伸應力之關係

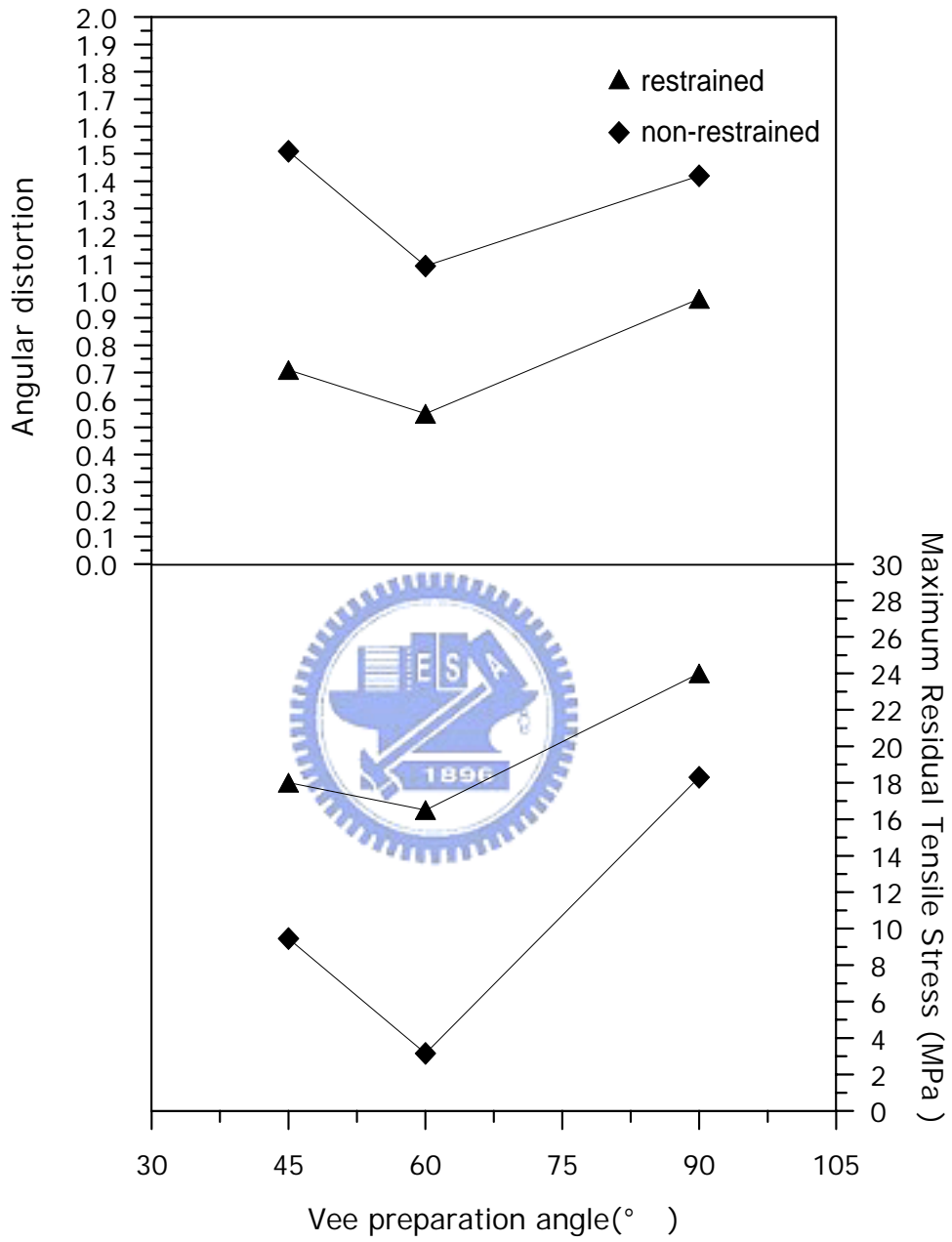


圖 4-37 6061-T6 鋁合金角變形量與最大殘留拉伸應力之關係

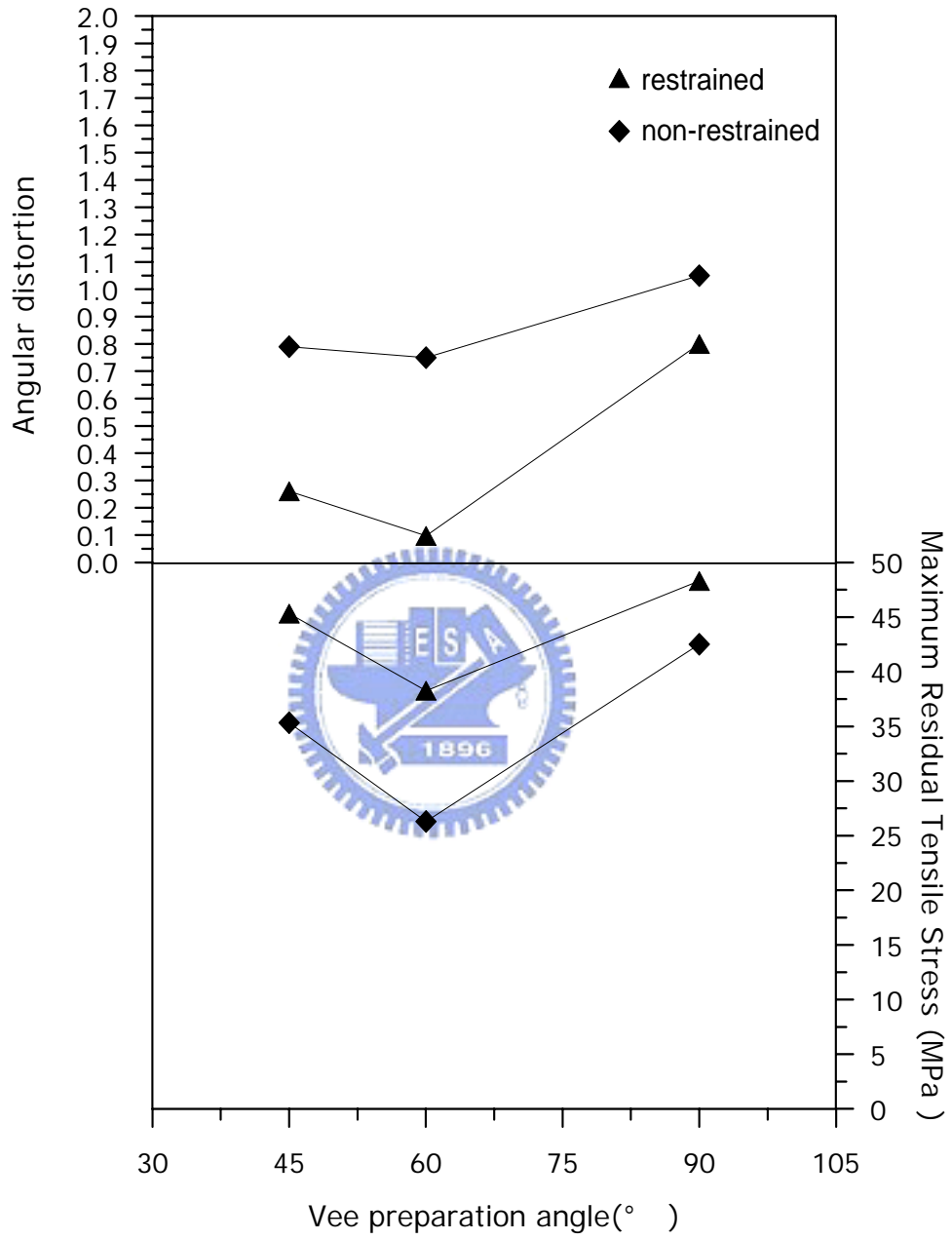


圖 4-38 7075-T6 鋁合金角變形量與最大殘留拉伸應力之關係