

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis



鋁合金板件沖壓成形之回彈分析與改善研究

Analysis and Elimination of Springback in the
Stamping Process of Aluminum Alloy Sheets

陳俊衡

Jyun-Heng Chen

指導教授：陳復國 博士

Advisor: Fuh-Kuo Chen, Ph.D.

中華民國 108 年 7 月

July, 2019

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

鋁合金板件沖壓成形之回彈分析與改善研究
Analysis and Elimination of Springback in the
Stamping Process of Aluminum Alloy Sheets

本論文係陳俊衡君 (R06522533) 在國立臺灣大學機械工程學系
完成之碩士學位論文，於民國 108 年 7 月 29 日承下列考試委員審查
通過及口試及格，特此證明

口試委員：

陳復國 (指導教授)

陳復國

黃佑民

黃佑民

黃永茂

黃永茂

敖仲寧

敖仲寧

林恆勝


林恆勝

系主任

黃美嬌

黃美嬌

致謝



研究所兩年的時光以此篇論文畫下句點，回顧這段期間，所有的辛勞皆化作收穫。首先誠摯的感謝陳復國教授在求學過程中悉心的指導與教誨，在研究的過程中，您總是說：「在這邊學到的重點並不是單單"金屬成形"這範疇，而是整套的研究邏輯與方法，這才是最重要的」，努力不懈的精神使學生嚮往。除此之外，因為您豐富的經驗，提供學生研究的方向，使得學生能以順利完成論文，謹在此表示由衷的感謝與敬意。感謝家人給予支持與幫助，不僅給與經濟上的支助，也在我受苦受難時提供一個溫暖的家作為我的避風港。感謝父母的養育之恩，因為有你們才有我今天的成就。感謝蔡博提供材料實驗相關指導與幫忙，令本論文內容更加完善。也感謝任冠公司詹添發老闆於實驗相關的加工協助，使的實驗可以更加順利進行。

感謝學長信良、梓豪、宜暹、孟勳、旻翰、志輝、翊維及政廷在我遇到問題時給予方向。感謝模具設計實驗室的同儕宇鈞、哲源、奕寰、冠呈，個個都是可以依靠大腿，讓我度過輕鬆愜意的一年碩班生活，感謝學弟家齊及富鈞一同幫忙我進行實驗。也感謝學弟辰瑋與季谷一起陪我吃火鍋，讓我感受到暖暖的幸福感，也感謝柏竣與奕寰和我一同喝酒紓壓。最後要感謝的人太多了，那就感謝我吧，謝謝我完成了這篇論文。


摘要



本論文主要探討鋁合金 A6061 在冷成形製程下透過阻料條設計改善回彈以及透過溫成形製程改善回彈的方式。兩者回彈改善機制並不相同，以阻料條設計而言，是透過後拉伸的方式改善板材內外表面應力不均的現象，進而抑制回彈現象；而溫成形製程則是透過加熱板件使得其材料曲線強度降低，進而使得產生回彈量減小。

在分析上述製程前，先探討鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之材料性質與材料參數，包含 A6061-O 與 A6061-T6 之加工硬化指數與塑性應變比值等材料參數，針對材料參數進行成形性與回彈分析，藉此比較鋁合金與鋼材不同材料性質對應之成形性與回彈差異。後續再建立 A6061 之材料模型，其中包括非等向性之降伏準則參數 (Hill48、Barlat91)，並且探討 A6061-O 與 A6061-T6 之包辛格效應(Bauschinger effect)，建立鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 模型。

建立上述之材料模型後，透過基礎載具包含 V 型彎曲、U 型帽狀引伸等模具進行回彈模擬分析，驗證前述材料模型之準確性，建立適合鋁合金 A6061 之回彈分析模型，並且進行後續的回彈改善研究。針對回彈改善方法，本論文首先探討阻料條改善 A6061-T6 之回彈，



使用阻料條設計流程建立適合鋁合金 A6061-T6 之阻料條造型，並使用 U 型帽狀引伸模具搭配可調式阻料條驗證其阻料條設計，確認其有效改善回彈。另外也探討鋁合金在溫成形製程條件下回彈改善的趨勢，使用 V 型彎曲溫成形實驗，得到 A6061-T6 在三溫度製程條件下的回彈改善角度，發現隨溫度升高，其回彈角度有變小的趨勢。並且依照沖頭圓角較大的彎曲成形，其回彈改善比率較大。

關鍵字：鋁合金板件、A6061-O、A6061-T6、包辛格效應、側壁捲曲、可調式阻料條、溫成形、有限元素分析

Abstract



This thesis mainly studied the springback improvement methods of the aluminum alloy A6061, including using the drawbead in cold forming process and forming aluminum in warm temperature. These springback improvement methods are not the same diminishing springback mechanism. In terms of drawbead design, drawbead can achieve “post-stretch” effect and unify stress distribution on blank’s upper or lower surface. On the other hand, due to material strength reduced after heating the blank, the springback phenomenon improved.

Before analyzation these two process, the material properties of the aluminum alloy A6061-O and A6061-T6 were studied first. The material properties include working-hardening ratio and plastic strain ratio etc...The influence of A6061 material properties in formability and springback had been analyzed, and the difference of formability and springback between aluminum and steel had been discussed.

The material model of A6061 has been established, including non-isotropic yield function parameters (Hill48, Barlat91). On the other hand, Bauschinger effect of A6061 had been considered in this thesis, so the Yoshida- Uemori model of A6061-T6 was established.

After established the material models, the springback analysis simulations including V-bending and U-hat drawing were conducted in this thesis. With simulations of different material models, the proper material model could be figured out by comparing with experiment data.

About springback improvement methods, the drawbead design was studied to eliminate the springback of A6061-T6. The U-hat shape drawing die with drawbead design experiment was conducted to confirm influence of drawbead design on the springback phenomenon.

The V-bending warm forming process of aluminum A6061-T6 was also conducted to discuss the springback improvement in three experimental temperatures. The results show that the springback degree decreases when the blank temperature increases, and the ratio of springback improvement increases when the fillet of punch increases.

Keywords : aluminium alloy, A6061-O, A6061-T6, Bauschinger effect, side-wall curl, adjustable drawbead, warm forming , finite element analysis

目錄



| | |
|----------------------|------|
| 摘要..... | II |
| Abstract..... | IV |
| 目錄..... | VI |
| 圖目錄..... | X |
| 表目錄..... | XVII |
| 1.1 前言 | 1 |
| 1.2 研究動機與目的 | 3 |
| 1.3 文獻回顧 | 5 |
| 1.4 研究方法與步驟 | 9 |
| 1.5 論文總覽 | 10 |
| 第二章 鋁合金材料性質之研究 | 12 |
| 2.1 鋁合金性質簡介 | 12 |
| 2.1.1 鋁合金各系列種類 | 12 |
| 2.1.2 鋁合金熱處理 | 13 |



| | |
|----------------------------------|----|
| 2.2 鋁合金 A6061 特性探討 | 14 |
| 2.2.1 熱處理製程 | 15 |
| 2.2.2 鋁合金 A6061 各狀態之材料性質比較 | 19 |
| 2.3 鋁合金與鋼材之成形與回彈差異 | 22 |
| 2.3.1 鋁合金與鋼材之材料性質差異 | 22 |
| 2.3.2 楊氏係數與降伏強度對回彈之影響 | 24 |
| 2.3.3 材料參數對不同成形模式之影響 | 29 |
| 2.4 基礎材料試驗規劃 | 36 |
| 2.4.1 DIC 量測平台建立與驗證 | 36 |
| 2.4.2 單軸拉伸試驗 | 39 |
| 2.4.3 塑性應變比值試驗 | 41 |
| 2.4.4 摩擦實驗 | 49 |
| 第三章 鋁合金材料模型探討與建立 | 54 |
| 3.1 降伏準則之研究與建立 | 54 |
| 3.1.1 Hill48 降伏準則之探討 | 54 |
| 3.1.2 Hill90 降伏準則之探討 | 57 |



| | |
|--|-----|
| 3.1.3 Barlat89 以及 Barlat 91 降伏準則之探討 | 59 |
| 3.1.4 Hill48 與 Barlat91 降伏準則參數建立 | 61 |
| 3.2 加工硬化準則之探討 | 62 |
| 3.3 Yoshida 材料模型之探討 | 64 |
| 3.2.1 Yoshida-Uemori model(Y-U model)之探討 | 64 |
| 3.2.2 反覆拉壓試驗 | 67 |
| 3.2.3 A6061-T6 包辛格效應探討 | 72 |
| 3.2.4 Yoshida 材料模型之參數建立 | 76 |
| 第四章 鋁合金回彈模擬分析與實驗探討 | 87 |
| 4.1 回彈類型簡介 | 87 |
| 4.2 V 型彎曲成形分析 | 90 |
| 4.2.1 V 型彎曲成形模擬分析 | 91 |
| 4.2.2 V 型彎曲成形實驗 | 93 |
| 4.3 U 型帽狀成形分析 | 98 |
| 4.3.1 U 型帽狀成形模擬分析 | 99 |
| 4.3.2 U 型帽狀成形實驗 | 101 |

| | |
|----------------------------|-----|
| 4.4 小結 | 107 |
| 第五章 鋁合金回彈缺陷改善之探討 | 108 |
| 5.1 鋁合金冷成形之回彈缺陷改善 | 108 |
| 5.1.1 回彈改善機制 | 108 |
| 5.1.2 變壓料力設計流程 | 113 |
| 5.1.3 阻料條設計流程 | 116 |
| 5.1.4 可調式阻料條之回彈實驗驗證 | 127 |
| 5.2 鋁合金溫成形對回彈缺陷之影響 | 131 |
| 5.2.1 溫成形簡介 | 131 |
| 5.2.2 溫成形實驗平台建立與實驗流程 | 132 |
| 5.2.3 溫成形實驗探討 | 137 |
| 5.3 小結 | 139 |
| 第六章 結論 | 140 |
| 參考文獻 | 142 |



圖目錄



| | |
|---|----|
| 圖 1.1 Audi A8 的車體部件材料 | 2 |
| 圖 1.2 Land Rover 車體用鋁之狀況..... | 4 |
| 圖 2.1 中鋼鋁業公司提供之鋁合金 A6061 | 15 |
| 圖 2.2 美國材料與試驗協會所制定之熱處理製程參數 | 16 |
| 圖 2.3 加熱爐..... | 17 |
| 圖 2.4 美國材料與試驗協會所制定之熱處理製程參數 | 18 |
| 圖 2.5 A6061-O 與 A6061-F 工程應力應變曲線..... | 20 |
| 圖 2.6 A6061-T6 與 A6061-O 工程應力應變曲線 | 21 |
| 圖 2.7 先進高強度鋼與鋁合金之材料曲線比較 | 23 |
| 圖 2.8 鋁合金與鋼材之回彈差異..... | 23 |
| 圖 2.9 鋁合金與傳統鋼引擎蓋板之成形差異 | 24 |
| 圖 2.10 A6061-T6 改變降伏強度之材料曲線..... | 25 |
| 圖 2.11 V 型彎曲分析模型 | 26 |
| 圖 2.12 V 型彎曲回彈角示意圖 | 26 |
| 圖 2.13 A6061-T6 三種材料性質之回彈角度比較..... | 27 |
| 圖 2.14 A6061-T6 三種材料性質對應回彈角度 | 28 |
| 圖 2.15 A6061-T6 與 980 之材料曲線比較 | 28 |
| 圖 2.16 A6061-T6 與 980 之回彈角度比較..... | 29 |
| 圖 2.17 不同拉伸模式之示意圖 | 30 |
| 圖 2.18 A6061-T6 改變 n 值之材料曲線..... | 33 |
| 圖 2.19 各條件在雙向拉伸模型之分析結果..... | 33 |
| 圖 2.20 各條件在平面拉伸模型之分析結果 | 34 |

| | |
|---|----|
| 圖 2.21 各條件在引伸拉伸模型之分析結果 | 35 |
| 圖 2.22 DIC 量測之應用 | 36 |
| 圖 2.23 固定標距之間距變化的量測應變 | 38 |
| 圖 2.24 單軸拉伸試驗搭配 DIC 量測應變..... | 38 |
| 圖 2.25 三種 DIC 量測應變的方式..... | 38 |
| 圖 2.26 DIC 與應變規之驗證..... | 39 |
| 圖 2.27 不同滾軋方向試片之示意圖..... | 40 |
| 圖 2.28 ASTM E8 單軸拉伸試片尺寸 | 40 |
| 圖 2.29 垂直於板材滾軋方向(90 度)之試片真實應力應變曲線..... | 40 |
| 圖 2.30 鋁合金 A6061-T6 各方向之拉伸曲線..... | 41 |
| 圖 2.31 ASTM E8 試片規格 | 43 |
| 圖 2.32 塑性應變比值實驗之四等份拉伸距離 | 44 |
| 圖 2.33 高度規規刻畫記號 | 44 |
| 圖 2.34 DIC 量測單軸拉伸試片 | 45 |
| 圖 2.35 line method 與 point method 示意圖 | 46 |
| 圖 2.36 Line method 與 point method 比較..... | 46 |
| 圖 2.37 塑性應變比值試片及 DIC 量測之單軸拉伸試片 | 47 |
| 圖 2.38 鋁合金 A6061-O 45 度試片之軸向與橫向應變 | 48 |
| 圖 2.39 鋁合金 A6061-O 45 度之塑性應變比值趨勢 | 48 |
| 圖 2.40 摩擦機台..... | 50 |
| 圖 2.41 平板拉伸方法示意圖..... | 50 |
| 圖 2.42 摩擦實驗模具..... | 50 |
| 圖 2.43 鋁材受損狀況..... | 51 |
| 圖 2.44 模具表面觀察到鋁材沾附現象..... | 52 |

| | |
|---|----|
| 圖 2.45 二硫化鉬潤滑劑..... | 52 |
| 圖 2.46 二硫化鉬潤滑劑條件下之鋁材摩擦前後對照..... | 53 |
| 圖 2.47 A6061 在接觸壓力 30MPa 之摩擦係數..... | 53 |
| 圖 3.1 A6061-O 之 hill48 降伏準則參數建立..... | 61 |
| 圖 3.2 A6061- T6 之 hill48 降伏準則參數建立..... | 61 |
| 圖 3.3 A6061-O 之 Barlat91 降伏準則參數建立..... | 62 |
| 圖 3.4 A6061-T6 之 Barlat91 降伏準則參數建立..... | 62 |
| 圖 3.5 材料受力加工硬化示意圖..... | 63 |
| 圖 3.6 材料包辛格效應圖..... | 64 |
| 圖 3.7 雙降伏面示意圖..... | 65 |
| 圖 3.8 混合型加工硬化準則..... | 65 |
| 圖 3.9 降伏表面 f(左)與邊界降伏表面 F(右)..... | 66 |
| 圖 3.10 拉壓試片之外型尺寸示意圖..... | 67 |
| 圖 3.11 鋁合金 A6061-T6 試片置入夾具示意圖..... | 68 |
| 圖 3.12 A6061-O 應變範圍 4%與 8%循環變形之應力應變圖..... | 69 |
| 圖 3.13 270 級軟鋼應變範圍 4%與 8%循環變形之應力應變圖..... | 69 |
| 圖 3.14 鋁合金 A6061-O 應變範圍 2%多次循環變形之應力應變圖..... | 70 |
| 圖 3.15 A6061-T6 應變範圍 0.02 拉壓結果..... | 71 |
| 圖 3.16 A6061-T6 應變範圍 0.04 拉壓結果..... | 71 |
| 圖 3.17 A6061-T6 應變範圍 0.06 拉壓結果..... | 71 |
| 圖 3.18 A6061-T6 應變範圍 0.08 拉壓結果..... | 72 |
| 圖 3.19 圖 A6061-T6 應變範圍 0.1 拉壓結果..... | 72 |
| 圖 3.20 材料包辛格效應特性圖..... | 73 |
| 圖 3.21 不同應變振幅包辛格效應量化圖。..... | 74 |

| | |
|--|----|
| 圖 3. 22 鋁合金 A6061-T6 不同應變包辛格效應圖..... | 75 |
| 圖 3. 23 不同材料之瞬間軟化圖 | 75 |
| 圖 3. 24 鋁合金 A6061-T6 在第一階段拉伸圖..... | 77 |
| 圖 3. 25 卸載時楊氏係數應力應變曲線選取範圍示意圖 | 78 |
| 圖 3. 26 A6061-T6 卸載時轉折點選取範圍之示意圖..... | 78 |
| 圖 3. 27 鋁合金 A6061-T6 擷取卸載時楊氏係數示意圖 | 79 |
| 圖 3. 28 鋁合金 A6061-T6 卸載階段之楊氏係數分布曲線 | 80 |
| 圖 3. 29 鋁合金 A6061-T6 四段區域 E_a 、 ξ 收斂情形 | 81 |
| 圖 3. 30 A6061-T6 應變 8% 不同應力擷取範圍之 Eave 回歸點比較 .. | 81 |
| 圖 3. 31 σ_{Bop} 位置示意圖 | 82 |
| 圖 3. 32 不同材料參數 C2 之示意圖..... | 83 |
| 圖 3. 33 鋁合金 A6061-T6 之 σ_{Bt}/σ_{Bot} 與反向塑性應變 ϵ_p 之關係 ... | 83 |
| 圖 3. 34 不同 C1 值之影響..... | 84 |
| 圖 3. 35 不同 h 值之影響 | 85 |
| 圖 3. 36 鋁合金 A6061-T6 模擬拉壓與實驗數據之應力應變比對圖 | 86 |
| 圖 4. 1 側壁外開示意圖 | 87 |
| 圖 4. 2 側壁捲曲示意圖 | 88 |
| 圖 4. 3 扭曲現象示意圖 | 88 |
| 圖 4. 4 V 型彎曲實驗模具示意圖..... | 89 |
| 圖 4. 5 V 型彎曲實驗模具照片..... | 89 |
| 圖 4. 6 U 形帽狀成形實驗模具示意圖 | 90 |
| 圖 4. 7 U 形帽狀成形實驗模具照片 | 90 |
| 圖 4. 8 回彈角度示意圖 | 91 |
| 圖 4. 9 V 型彎曲模擬分析模型..... | 93 |

| | |
|---|-----|
| 圖 4. 10 V 型彎曲實驗模具..... | 93 |
| 圖 4. 11 V 型彎曲實驗模具架設於材料拉伸機..... | 94 |
| 圖 4. 12 V 型彎曲實驗過程..... | 95 |
| 圖 4. 13 V 型彎曲實驗板件成品..... | 95 |
| 圖 4. 14 GOM ATOS 逆向掃描 | 95 |
| 圖 4. 15 GOM Inspect 回彈分析 | 96 |
| 圖 4. 16 A6061-O 之 V 型彎曲成形結果 | 97 |
| 圖 4. 17 A6061-O 與 A6061-T6 之回彈差異結果..... | 97 |
| 圖 4. 18 A6061-T6 與 A6061-O 側壁外開角度..... | 97 |
| 圖 4. 19 A6061-O 各材料模型之 V 型彎曲驗證 | 98 |
| 圖 4. 20 A6061-T6 各材料模型之 V 型彎曲驗證..... | 98 |
| 圖 4. 21 U 形帽狀成形回彈示意圖 | 99 |
| 圖 4. 22U 形帽狀引伸回彈分析模型 | 101 |
| 圖 4. 23 沖壓機台說明 | 102 |
| 圖 4. 24 可更換示母模 R 角示意圖..... | 102 |
| 圖 4. 25 可更換沖頭 R 角示意圖..... | 102 |
| 圖 4. 26 可調式阻料條設計 | 103 |
| 圖 4. 27 實驗所使用之不同母模圓角部件 | 104 |
| 圖 4. 28U 型帽狀成形實驗板件成品 | 104 |
| 圖 4. 29GOM ATOS 逆向掃描 | 104 |
| 圖 4. 30GOM Inspect 回彈分析 | 105 |
| 圖 4. 31 不同母模圓角下 A6061-T6 之側壁捲曲半徑..... | 106 |
| 圖 4. 32 不同沖頭圓角下 A6061-T6 之側壁捲曲半徑..... | 106 |
| 圖 4. 336061-T6 各材料模型之 U 型帽狀引驗證..... | 106 |

| | |
|--|-----|
| 圖 5.1 先弱後強階梯式變壓料力曲線 | 109 |
| 圖 5.2 變壓料力分析之半模型 | 109 |
| 圖 5.3 U 形帽狀厚度方向應力分佈圖 | 111 |
| 圖 5.4 U 形帽狀成形過程中網格位置說明 | 112 |
| 圖 5.5 定值壓料力之應力應變分析 | 112 |
| 圖 5.6 變壓料力之應力應變分析 | 112 |
| 圖 5.7 強壓料力作用前後之流速差異 | 113 |
| 圖 5.8 可能的變壓料力曲線設計方式 | 113 |
| 圖 5.9 先弱後強階梯式變壓料力設計流程 | 114 |
| 圖 5.10 A6061-T6 先弱後強階梯式變壓料力設計範圍 | 115 |
| 圖 5.11 強壓料力 90kN 作用沖程 4mm 將發生破裂 | 116 |
| 圖 5.12 可調式阻料條於沖壓作用情形 | 116 |
| 圖 5.13 阻料條造型分類 | 117 |
| 圖 5.14 半圓形阻料條幾何參數 | 118 |
| 圖 5.15 鋼材 1180 與 A6061-T6 適合之變壓料曲線設計比較..... | 119 |
| 圖 5.16 單一阻料條設計流程 | 120 |
| 圖 5.17 板材斷面受力分析模型 | 121 |
| 圖 5.18 $R1=2\text{mm}$, $R2=3\text{mm}$, $D=3\text{mm}$, 板材破裂處 | 122 |
| 圖 5.19 $R1=3\text{mm}$, $R2=3\text{mm}$, $D=3\text{mm}$, 板材尚未破裂 | 122 |
| 圖 5.20 雙阻料條距離示意圖 | 123 |
| 圖 5.21 不同阻料條距離之板材回彈斷面比較 | 123 |
| 圖 5.22 不同阻料條距離之最大減薄率比較 | 123 |
| 圖 5.23 單雙阻料條設計之阻料力比較 | 124 |
| 圖 5.24 雙阻料條與變壓料力之回彈斷面比較(沖頭 R 角=15mm) .. | 125 |

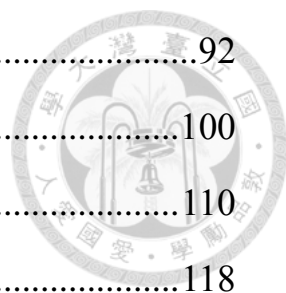
| | |
|---|-----|
| 圖 5.25 雙阻料條與變壓料力之回彈斷面比較(母頭 R 角=9mm) | 126 |
| 圖 5.26 可調式阻料條設計 | 127 |
| 圖 5.27 雙阻料條與變壓料力之板材回彈斷面比較 | 129 |
| 圖 5.28 R1=5mm，R2=3mm，D=3mm，板材破裂處 | 129 |
| 圖 5.29 雙阻料條實驗成品 | 130 |
| 圖 5.30 雙阻料條實驗對 A6061-T6 側壁捲曲改善趨勢 | 130 |
| 圖 5.31 溫成形製程 | 132 |
| 圖 5.32 鋁合金 A6061 溫成形溫度歷程 | 132 |
| 圖 5.33 V 型彎曲實驗模具..... | 133 |
| 圖 5.34 V 型彎曲實驗模具架設於材料拉伸機圖 | 133 |
| 圖 5.35 加熱爐與熱電偶量測板材升溫曲線 | 133 |
| 圖 5.36 150 度溫度歷程 | 134 |
| 圖 5.37 250 度溫度歷程 | 134 |
| 圖 5.38 350 度溫度歷程 | 134 |
| 圖 5.39 V 型彎曲實驗過程..... | 136 |
| 圖 5.40 V 型彎曲實驗板件成品..... | 136 |
| 圖 5.41 GOM ATOS 逆向掃描 | 136 |
| 圖 5.42 GOM Inspect 回彈分析 | 137 |
| 圖 5.43 A6061-T6 在 150 度與 350 度之 V 型彎曲溫成形結果..... | 138 |
| 圖 5.44 A6061-T6 在沖頭圓角 R11 條件下溫成形回彈改善趨勢 | 138 |
| 圖 5.45 A6061-T6 在沖頭圓角 R6 條件下溫成形回彈改善趨勢 | 138 |
| 圖 5.46 A6061-T6 在沖頭圓角 R11 與 R6 溫成形回彈改善比率 | 139 |

表目錄



| | |
|---|----|
| 表 2.1 鋁合金之 T6 熱處理製程參數..... | 17 |
| 表 2.2 MatWeb 與本論文退火製程 A6061-O 之材料性質 | 18 |
| 表 2.3 MatWeb 與本論文 T6 熱處理製程 A6061-T6 之材料性質 | 19 |
| 表 2.4 A6061-O 與 A6061-F 材料性質表 | 20 |
| 表 2.5 A6061-T6 與 A6061-O 之材料參數比較表..... | 21 |
| 表 2.6 A6061-T6 降伏強度與降伏強度改變表 | 25 |
| 表 2.7 A6061-T6 與 270 及 590R 之材料參數表 | 32 |
| 表 2.8 A6061-T6 材料參數改變表 | 33 |
| 表 2.9 各條件於雙向拉伸之最大減薄率比對表 | 34 |
| 表 2.10 各條件於平面拉伸之最大減薄率比對表 | 34 |
| 表 2.11 各條件於引伸拉伸之最大減薄率比對表 | 35 |
| 表 2.12 鋁合金 A6061-T6 材料性質表..... | 41 |
| 表 2.13 鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之塑性應變比值 | 49 |
| 表 3.1 Hill 48 降伏準則之模擬需求參數及實驗表 | 57 |
| 表 3.2 Hill 90 降伏準則之模擬需求參數及實驗表 | 58 |
| 表 3.3 Barlat 89 降伏準則之模擬需求參數及實驗表 | 60 |
| 表 3.4 A6061-T6 第一階段拉伸之之 Yoshida 材料模型參數..... | 77 |
| 表 3.5 鋁合金 A6061-T6 應變範圍 8% 中四段區域之 Eav 值..... | 80 |
| 表 3.6 A6061-T6 第二階段卸載之 Yoshida 材料模型參數..... | 81 |
| 表 3.7 A6061-T6 第三階段壓縮之 Yoshida 材料模型參數..... | 83 |
| 表 3.8 鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型參數..... | 85 |

| | |
|------------------------------|-----|
| 表 4.2V 型彎曲成形分析收斂性結果..... | 92 |
| 表 4.3 U 型帽狀成形模擬分析收斂性結果..... | 100 |
| 表 5.1U 形帽狀引伸半模型收斂性結果..... | 110 |
| 表 5.2 阻料條分析模型模擬參數收斂性結果 | 118 |
| 表 5.3 三種溫度區間的溫度穩態時間..... | 134 |



第一章 緒論



1.1 前言

因應日益嚴苛的環保要求，以及提升燃油效率的壓力，輕量化已是國際間各大汽車廠競相努力的目標。對於燃油車，希望藉由減輕車身重量，來提升汽車燃油效率，達到節能減碳的目的；而對於電動車，亦希望藉由減輕車身重量，提升電池續航力。為了達到汽車輕量化之目的，目前汽車廠在汽車結構件使用上已逐漸開始使用鋁合金板件，藉由鋁合金板件的密度約為鋼材的 1/3 來減輕車身重量。根據研究[1-2]可知，若在汽車中使用 100 公斤的鋁，則每公里可減少 3 克至 13 克的二氧化碳排放。同時，根據 Ducker Worldwide 和 European Aluminum Association 的研究[1-3]也可知由 1990 年至 2012 年在歐洲製造的每輛車平均使用鋁材由 50 公斤提升至 140 公斤，而預期到 2020 年每輛車平均將使用 160 公斤的鋁材。由此可知，鋁合金材料的使用將越趨重視，且使用量也將持續成長。鋁合金汽車板件目前常應用於汽車外板，包含車門、葉子板、車頂、行李廂蓋等[1-2,4]，其應用範圍相當大，如圖 1.1[7]所示即為 Audi A8 的車體部件材料使用情形。由於目前國際間汽車廠於鋁合金板件的使用越趨重視，產學研界皆積極投入於此技術之開發。

雖然鋁合金板件於汽車的應用持續增加，但由於鋁合金板件的材料特性，以及汽車用鋁合金板件多為沖壓成形件，其材料特性與製程方式，常導致鋁合金板件於沖壓成形過程中容易產生破裂和回彈等成形缺陷，造成模具開發的困難，也導致需要反覆修模來改善成形缺陷，相當耗費開發成本與時程。雖然過去的鋼板在變形後也會產生破裂與回彈缺陷，但是由於鋼材擁有較佳的延展性及較高的彈性係數，成形時的破裂並不容易發生，成形後的回彈缺陷也不顯著。因此相比鋼材，鋁合金板件沖壓成形設計目前仍為相當需要積極研究之課題。目前許多汽車廠和模具廠開始導入板件沖壓成形 CAE 分析技術，希望藉由分析技術的導入來減少開發的時程，同時於設計階段即掌握成形缺陷，並提出改善設計，減少開模後反覆修模的成本。

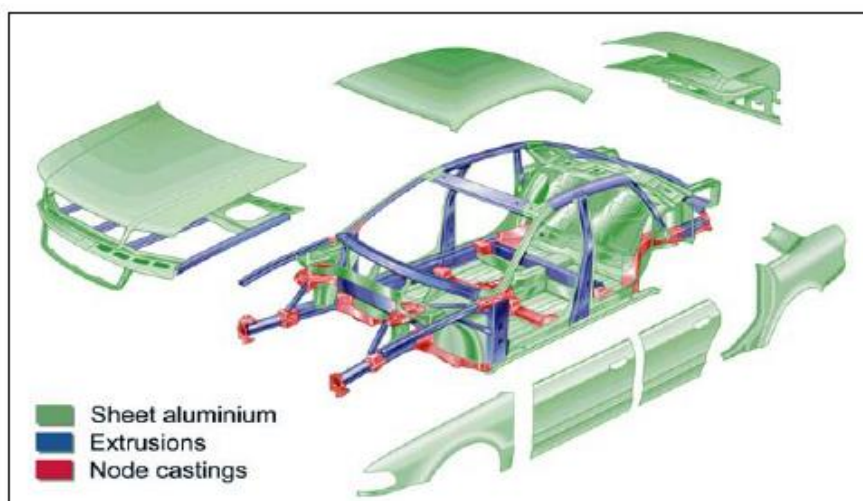


圖 1. 1 Audi A8 的車體部件材料[7]



1.2 研究動機與目的

由於目前國際間汽車廠於鋁合金板件的使用越趨重視，產學研界皆積極投入於此技術之開發，現今車廠大多使用 5000 系與 6000 系鋁合金為鋁合金沖壓件主要材料，如圖 1.2 所示為汽車品牌 Land Rover 車體用鋁之狀況[6]，由圖 1.2 可看出光是 5000 系與 6000 系鋁合金就佔了其車體的四分之三。而在 6000 系鋁合金中又以鋁合金 A6061 為最廣泛應用之鋁合金材料，其材料強度高，可焊性且抗蝕性高，在退火鍊度下其成形性佳，另外其在 T6 的熱處理鍊度下也具備更高材料強度之特性，適合應用車體相關結構件。然而因其材料特性與沖壓成形特性導致其破裂與回彈現象較鋼材嚴重。因此，本論文將選用鋁合金 A6061 作為研究材料，針對鋁合金 A6061 的材料特性、成形與回彈特性、以及回彈改善之方法等主題依序探討，建立完整之鋁合金 A6061 沖壓成形技術。

然而在進行沖壓成形 CAE 分析時，相當重要的因素即是輸入準確的材料參數以及模擬參數，其輸入參數的正確性將會影響模擬分析的結果，因此對於探討合適地描述 A6061 之材料模型為相當重要。此外由於鋁合金板件在沖壓成形中容易產生破裂和回彈的缺陷，因此瞭解材料的成形性與回彈特性，提出有效的成形缺陷改善方法，亦為重要的探討方向。在鋁合金 A6061 材料特性研究方面，本論文針對鋁合

金 A6061 進行基礎材料試驗包括單軸拉伸試驗、塑性應變比值試驗、以及拉伸-壓縮試驗。透過基礎材料試驗了解鋁合金板材的材料特性，並且建立考量 A6061 材料包辛格效應之 Y-U 材料模型(Yoshida-Uemori model)；在鋁合金 A6061 成形沖壓技術方面，將建立適合鋁合金 A6061 之模擬分析參數和分析模型，可應用於鋁合金 A6061 汽車沖壓件模擬分析使用；在鋁合金 A6061 回彈特性研究方面，本論文將透過模擬分析探討 V 型、U 型之成形與回彈特性，同時進行 V 型、U 型成形實驗進行驗證其模擬分析之準確性，並且探討不同材料模型對應模擬結果與實驗之差距值，藉此比較合適描述 A6061 之材料模型；最後在鋁合金 A6061 回彈缺陷改善方面，本論文將參考文獻當中所使用之模具阻料條設計進行鋁合金 A6061 回彈缺陷改善之探討，並且設計出合適於鋁合金 A6061 之模具阻料條設計。另外也會探討鋁合金較熱門的研究主題：鋁合金溫成形，作為鋁合金 A6061 回彈缺陷改善的另一探討方向。藉此比較模具阻料條設計方法以及鋁合金溫成形兩種回彈缺陷改善方法之應用及優缺點。

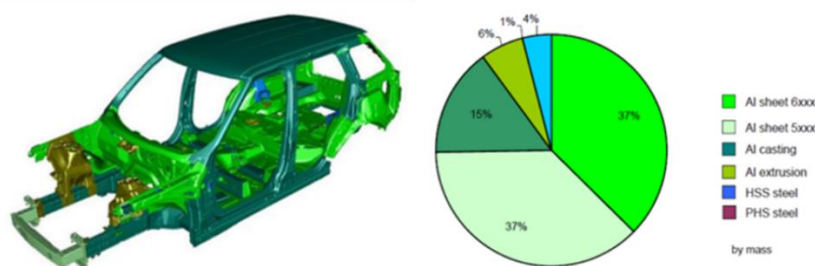



圖 1.2 Land Rover 車體用鋁之狀況[6]



1.3 文獻回顧


隨著環保及汽車減重議題的興起，輕量化成為汽車產業發展的重要目標，而其中鋁合金材料因為密度低，已成為目前汽車產業界的發展之重要趨勢。產學研究界對於鋁合金其材料特性以及應用都有深入之研究。由於鋁合金 A6061 為析出強化之鋁合金材料，可進行熱處理等製程增加強度，因此探討熱處理對鋁合金 A6061 的影響為一重點。Appendino 等[8-9] 以實驗方法得到鋁合金 A6061 在 T4 熱處理後的硬度曲線變化，並探討鋁合金 A6061 的時效影響性。F. Ozturk 等[10]也同樣用實驗方法探討鋁合金 A6061 在 T6 熱處理所產生的硬度、強度變化，其中探討時效時間對於 A6061 硬度影響性。

另外由於沖壓成形分析模型中，摩擦係數是分析模型相當重要之參數，而鋁合金與模具鋼之間的摩擦係數與傳統鋼板之摩擦係數明顯地有所差異，因此探討鋁合金 A6061 與模具鋼之間的摩擦係數是建立分析模型的前提。Guillon[11]等對於鋁 6061 選用各種材料鍍層的模具鋼進行實驗，探討鋁合金 A6061 通過模具前後表面及摩擦係數的差異。Xu[12]探討表面品質、潤滑條件、阻料條間隙、拉伸速度對 6000 系列鋁材之摩擦性質的影響。上述關於鋁合金 A6061 摩擦係數相關文獻可作為本論文求得鋁合金 A6061 摩擦係數之參考。




而相對於鋼材之成形性，鋁合金材料明顯地成形性較差。另外鋁合金 A6061 的 T6 熱處理製程也會影響其成形性。因此探討成形性方面而言，Ozturk[13]探討 6061-O 經 T6 熱處理之成形性質差異，T6 熱處理將會使得其成形性下降。Barnwal[14]探討鋁合金 6061 F 材之非等向性對成形結果影響，利用 LDH 實驗探討不同板材方向之成形極限差異。Barnwal[15]探討鋁合金 A6061-T6 非等向性在不同變形模式下的影響性，以塑性應變比值(r 值)作為鋁合金 A6061-T6 非等向性之指標，並利用 FLD、SPD 描述 r 值對破裂方向之影響。上述關於鋁合金 A6061 成形性相關文獻則可作為本論文研究鋁合金 A6061 之材料特性之參考。

在沖壓成形分析模型中，材料模型之差異對於提升模擬準確率扮演著舉足輕重的角色，特別是回彈分析模擬對材料模型的準確度有著很重要影響性。目前材料模型主要分為加工硬化準則與降伏準則兩方面。加工硬化準則方面，Gau 和 Kinzel [16]在分析回彈時考慮了包辛格效應，並提出一種新的材料模型，說明此模型能夠有效模擬材料的回彈行為。Jr [17]採用材料性質相似的等向性材料與非等向性材料進行 U -hat 實驗，發現非等向性材料回彈情形較等向性材料嚴重。由上述文現可知非等向性材料模型為模擬分析回彈更準確之材料模型，特別當其為考慮到材料包辛格效應之加工硬化準則。Uemori 等人[18]提



出考量材料包辛格效應與材料異向性對於回彈預測的準確性相當重要，其研究利用 U 型彎曲和 U 形帽狀彎曲比較不同材料模型之模擬結果和實驗的差異。針對描述材料包辛格效應，Yoshida[19][20]提出 Yoshida-Uemori model (Y-U model)理論與其材料參數，Y-U model 是由動態加工硬化降伏面與混合型加工硬化降伏面所建構而成的雙降伏面硬化模式，描述包辛格效應下反向暫時軟化及永久軟化現象，Yoshida 以動態硬化降伏面來描述二次降伏的提前現象，並描述在包辛格效應下之加工遲滯現象。另外針對 Y-U model 材料模型參數取得而言，需進行材料拉伸壓縮試驗。蔡恒光[21]研究進行拉伸壓縮實驗時，使用較為簡易之限制治具，即可透過實驗數據取得 Y-U model 材料模型參數。另針對降伏準則方面，Barlat 等[22-25]提出新的材料模型理，陸續探討降伏面、實驗與各材料的驗證，表示 Barlat 降伏準則有較佳準確性。Laurent 等[26]比較不同材料模型的鋁合金分析結果，並使用開環實驗來驗證 CAE 分析，比對結果指出各降伏準則皆達到極高準確性，其中以 Barlat 降伏準則與實驗結果最為接近。上述文獻可得知為更準確求得鋁合金 A6061 之回彈預測分析，其材料模型需考慮到包辛格效應且應針對不同降伏準則進行比較探討，以得到最適合描述鋁合金 A6061 回彈現象之材料模型。

最後針對鋁合金回彈改善分析方面，鋁合金回彈改善分為冷成形



製程條件下利用模具阻料條設計來減少回彈現象產生以及透過加熱板件等溫熱成形製程，達到增加鋁合金成形性與降低回彈等目的。以模具阻料條設計而言，Li 和 Weinmann[27]針對鋁合金 6111-T4，進行非對稱汽車鈹件之成形，搭配主動式阻料條，設計三種不同最高穿刺量曲線及沒有阻料條，結果為模擬之應變量測與實驗比對相當準確，且由應變判斷，使用主動式阻料條可以有更好的成形性(更深的成形可能)。Xia 和 Ren[28]以對稱及較複雜之階梯狀隧型樑，進行以後拉伸改善捲曲之研究，材料使用鋁合金 AA6022-T4，利用阻料條達到後拉伸效果，實驗證明，達到 2%之後加塑性應變可完全消除側壁捲曲。姚順偉[29]利用變壓料力以及阻料條來達到後拉伸的方式去改善側壁捲曲，並建立變壓料力曲線設計流程以及阻料條設計流程。本論文將採用姚順偉[29]的阻料條設計流程來探討此流程對應鋁合金 A6061-T6 的側壁捲曲之改善情況。

另外以鋁合金溫成形而言，Chen[30] 探討溫度、應變率對鋁合金 A6061-T6 成形性之影響，使用 LDH 實驗得到不同溫度、應變率下之 FLD，並得出溫度升高或沖壓速度降低將會導致成形極限上升，使得鋁合金 A6061-T6 成形性提高。而[42] 則利用圓環實驗驗證 A6061-T6 在溫成形製程下對回彈有抑制效果且助於成形性提高，並且得到在溫成形溫度 200°C~250°C 為最適合的溫度範圍。因此本論文將透過

V 型彎曲溫成形實驗探討鋁合金 A6061-T6 在溫成形製程不同溫度範圍所對應之回彈改善，並且與上述阻料條設計流程對應鋁合金 A6061-T6 的側壁捲曲之改善情況進型比較。



1.4 研究方法與步驟

由上節鋁合金相關文獻可知，為建立準確之鋁合金 A6061 回彈分析模型，以求得準確描述鋁合金材料性質之材料模型為關鍵條件。因此本論文先進行基礎材料試驗，包含單軸拉伸試驗、塑性應變比值試驗、摩擦試驗、拉伸壓縮試驗，藉此探討鋁合金 A6061 之材料特性，並建立鋁合金 A6061 之材料曲線及各項材料參數(摩擦係數、塑性應變比值、降伏準則參數、Y-U 材料模型)。接著藉上述參數建立鋁合金 A6061 回彈分析模型，再透過基礎回彈分析載具探討鋁合金 A6061 的回彈現象，同時利用基礎載具實驗比較各種材料模型之準確性。最後則是使用準確的鋁合金 A6061 回彈分析模型來探討適合鋁合金 A6061-T6 之阻料條設計流程，分析其側壁捲曲之改善情況，並且透過阻料條設計之模具實驗驗證其改善效果。另外再進行鋁合金溫成形實驗，探討其至製程溫度對應之回彈改善現象，並且比較兩者回彈改善趨勢。



1.5 論文總覽

本論文內容共分為六章，以下依序簡述本論文之內容：

第一章為緒論。本章首先說明鋁合金研究之背景與動機，以及目前鋁合金材料應用所面臨的問題，再介紹目前產、學界對於鋁合金材料特性、材料模型、回彈缺陷以及抑制回彈方法等相關研究文獻，最後簡要地敘述本論文之研究方法與步驟。

第二章為鋁合金 A6061 之材料性質探討，本章介紹本論文所使用之鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 的基本材料性質，以及分析兩者鋁合金材料與鋼材之間的成形與回彈差異，最後再敘述為求得鋁合金 A6061 之材料性質所進行之材料試驗(單軸拉伸試驗、塑性應變比值試驗、摩擦試驗)。

第三章為鋁合金 A6061 之材料模型探討與建立，本章介紹沖壓成形常見之降伏準則(Hill48、Hill90、Barlat89、Barlat91)以及加工硬化準則(等向性材料模型、Yoshida-Uemori 材料模型)之參數探討，並且建立屬於 A6061 之降伏準則與加工硬化準則之參數。同時針對 Y-U 材料模型之取得，本章進行鋁合金拉伸壓縮試驗，探討 A6061 之包辛格效應並且建立 A6061 之 Y-U 材料模型參數，以便後續第四章之基礎回彈分析模型探討。

第四章為鋁合金 A6061 回彈分析模擬與實驗探討，本章建立鋁

合金 A6061 之回彈分析模型，主要探討鋁合金 A6061 之回彈特性，包括側壁外開與側壁捲曲等現象，並且透過基礎載具實驗探討第三章所建立鋁合金 A6061 之材料模型其準確性。



第五章為鋁合金 A6061 回彈缺陷改善分析，本章利用第四章所建立之鋁合金 A6061 之回彈分析模型以及回彈基礎實驗，將用來探討兩種改善回彈缺陷之方法，包含阻料條設計以及溫成形製程。以阻料條設計而言，本章將建立適合鋁合金 A6061 之阻料條設計，並且探討其針對側壁捲曲之改善情況，並且透過實際阻料條設計之模具驗證其改善情況。另外溫成形製程而言，本章透過 V 型彎曲溫成形實驗，並且與第四章之 V 型彎曲實驗作比較，探討鋁合金 A6061-T6 在溫成形製程不同溫度範圍所對應之回彈改善。並在最後比較上述兩者回彈缺陷改善方式。

第六章為結論。本章將針對本論文各項研究之成果與結論，進行最後之統整與說明。

第二章 鋁合金材料性質之研究



2.1 鋁合金性質簡介

鋁合金材料已經廣泛被使用在各類產品，由於鋁合金種類眾多，各類之材料成形性、強度等級、抗腐蝕性與焊接性等有所差異，並可經由加熱和冷卻之熱處理程序改變材料性質。以下本節會簡述基本的鋁合金種類以及其相關之熱處理製程，後續會探討本論文之材料鋁合金 A6061 其材料性質。

2.1.1 鋁合金各系列種類

鋁合金依其主要添加成份分為不同系列，根據美國鋁協會（Aluminum Association）之規格說明：

(1) A1000 系：純度 99%以上之工業純鋁，其加工性、導電性，耐蝕性雖優良，但強度甚低，因此不常用來做構造用材料。

(2) A2000 系：在鋁中加入少量的 Cu 及 Mg 所形成之合金，即為 Al-Cu-Mg 合金（鋁銅鎂合金），強度足以匹敵鋼鐵材料的杜拉鋁及超杜拉鋁即為此系列的合金，但此系列合金因含銅量較高使得表面處理以及耐蝕性較差為其缺點，用途上廣泛的應用於航太工業上。

(3) A3000 系：為 Al-Mn 合金（鋁錳合金），含有 1.0~1.5%Mn，強度比 A2000 系低，焊接性優。

(4) A4000 系：為 Al-Si 合金 (鋁鈦合金)，含 1.5~13.5%Si，鍛造性、
焊接性、耐磨性皆優，除此更可抑制熱膨脹。

(5) A5000 系：為 Al-Mg 合金 (鋁鎂合金)，含 2.2~5.0%Mg，此系
列合金之耐蝕性高且成形性良好，在高溫使用時材料尺寸安定性佳。

(6) A6000 系：為 Al-Mg-Si 合金 (鋁鎂矽合金)，具有與 SS41 鋼相
同強度的材料，因此被廣泛使用，表面處理以及沖壓成形性佳。

(7) A7000 系：為 Al-Zn-Mg-Cu 合金 (鋁鋅鎂銅合金)，含 3.0~8.0%Zn，
一般稱超杜拉金鋁，合金為鋁合金中強度最高的系列，為航太製造業
界不可缺的材料。

2.1.2 鋁合金熱處理

鋁合金依處理方法又分為各種材料調質編號，其中未經任何加工
硬化或熱處理，僅經由製程所得稱為 F、經退火增加延展性稱為 O、
經加工硬化提升強度稱為 H 以及經由熱處理稱為 T 編號。熱處理包
含針對材料進行均質化、消除應力或提升強度、耐腐蝕與成形性。以
析出強化之熱處理而言，分成兩階段處理，包括固溶化處理以及析出
硬化。其中固溶化處理亦是進行均質化常見的方法，元素可在固溶時
均勻分佈；而後續經過淬火處理，即在高溫進行急速冷卻，在可熱處
理之鋁合金材料中(如 6000 系列)，其材料內部組織將產生過飽和析

出物並提升強度。在淬火後為使其過飽和析出，可使用自然時效 (natural aging) 使其強硬度逐漸增加，或者控制其環境溫度來加快時效作用，即人工時效 (artificial aging)。常見熱處理並可分為下列種類：

T1：於高溫加工完成進行冷卻，再置常溫進行硬化處理。

T2：為消除變形與應力，實施退火處理。

T3：於淬火後實施冷加工。

T4：於淬火後實施常溫時效處理。

T5：高溫加工後進行淬火，再實施人工時效處理。

T6：於淬火後實施人工時效處理。

T7：於淬火後之消除變形與應力，實施退火處理。

T8：於淬火後進行冷加工，再實施人工時效處理。

T9：於淬火後先實施人工時效處理，再進行冷加工。

T10：高溫加工後進行淬火，並於實施人工時效處理後再行冷加工。

2.2 鋁合金 A6061 特性探討

本論文使用材料為鋁合金 A6061，其常用於飛機結構件、汽車零件、遊艇部件等等，屬於最常見的鋁合金材料，具備良好的機械性能、耐腐蝕、易加工、成形性相當地好。材料來源為中鋼鋁業公司提供之材料，為未經任何熱處理、僅由軋延製程所得厚度 2mm 之板材，如

圖 2.1 所示。由 2.2.2 節可知道其均勻延伸率不到 2%，成形性極差，不適合作相關的成形實驗。後續會透過相關熱處理製程生產常用鋁合金，包括 A6061-O 與 A6061-T6，分別為採用退火及 T6 熱處理，詳細之熱處理製程將於 2.2.1 節進行詳述。



圖 2.1 中鋼鋁業公司提供之鋁合金 A6061

2.2.1 熱處理製程

本論文參考美國材料與試驗協會(American Society for Testing and Materials, ASTM)所制定之熱處理製程參數，其中包括退火製程與 T6 熱處理製程。針對鋁合金之退火製程參數為圖 2.2，本論文採用 6061-



O 材之製程參數，將板材置入加熱爐內，如圖 2.3。並且使其加溫至 404 度且持溫 3 小時，最後將板材取出使其空冷，以完成鋁合金 A6061-

O 之製程。

TABLE 6 Recommended Annealing Treatments for Wrought Aluminum Alloys^A

| Alloy | Metal Temperature, ±10°F [±6°C] | Time at Temperature, h | Temper Designation |
|-------------------|---------------------------------|------------------------|--------------------|
| 1060 | 650 [343] | B | -O |
| 1100 ^A | 650 [343] | B | -O |
| 1350 | 650 [343] | B | -O |
| 2014 ^A | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 2017 ^A | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 2024 ^A | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 2117 ^A | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 2219 ^A | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 3003 ^A | 775 [413] | B | -O |
| 3004 | 650 [343] | B | -O |
| 3105 | 650 [343] | B | -O |
| 5005 | 650 [343] | B | -O |
| 5050 | 650 [343] | B | -O |
| 5052 ^A | 650 [343] | B | -O |
| 5056 ^A | 650 [343] | B | -O |
| 5083 ^A | 650 [343] | B | -O |
| 5086 | 650 [343] | B | -O |
| 5154 | 650 [343] | B | -O |
| 5254 | 650 [343] | B | -O |
| 5454 | 650 [343] | B | -O |
| 5456 | 650 [343] | B | -O |
| 5457 | 650 [343] | B | -O |
| 6013 | 775 [413] ^C | 2 to 3 | O |
| 6053 | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 6061 ^A | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 6063 | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 6066 | 760 [404] ^C | 2 to 3 | -O |
| 6082 | 760 [404] ^C | 2 to 3 | O |
| 7050 ^A | 760 [404] ^D | 2 to 3 | -O |
| 7075 ^A | 760 [404] ^D | 2 to 3 | -O |
| 7149 | 760 [404] ^D | 2 to 3 | -O |

圖 2.2 美國材料與試驗協會所制定之熱處理製程參數



圖 2.3 加熱爐

另外針對鋁合金之 T6 熱處理製程參數包含固溶溫度及時效溫度與時間如表 2.1。另外由於固溶時間與板材厚度較有關係，因此參考圖 2.4 可知，本論文所採用鋁 6061 板材厚度為 2mm，其中對應固溶最少時間為 35 分鐘，為確保材料元素可在固溶時均勻分佈，採用 50 分鐘為固溶時間。將遵循以上 ASTM 標準，將板材置入加熱爐內，如圖 2.3，並且使其加溫至 560 度且持溫 50 分鐘，最後將板材取出進行水淬(Quenching)，再置入另一加熱爐中進行人工時效 160 度且持溫 18 小時，以完成鋁合金 A6061-T6 之製程。

表 2.1 鋁合金之 T6 熱處理製程參數

| ASTM 6061-T6 製程參數 | |
|-------------------|-----------|
| 固溶溫度 | 516~579 度 |
| 時效溫度 | 160 度 |
| 時效時間 | 18 小時 |

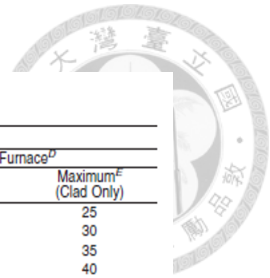


TABLE 3 Recommended Soaking Time for Solution Heat-treatment of Wrought Aluminum Alloys

| Thickness, in. ^B | Thickness, [mm] ^B | Soaking Time in Minutes ^A | | | |
|-----------------------------|------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| | | Salt Bath ^C | | Air Furnace ^D | |
| | | Minimum | Maximum ^E (Clad Only) | Minimum | Maximum ^E (Clad Only) |
| 0.016 and under | [Up to 0.41] | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 0.017 to 0.020 | [Over 0.41 thru 0.51] | 10 | 20 | 20 | 30 |
| 0.021 to 0.032 | [Over 0.51 thru 0.81] | 15 | 25 | 25 | 35 |
| 0.033 to 0.063 | [Over 0.81 thru 1.60] | 20 | 30 | 30 | 40 |
| 0.064 to 0.090 | [Over 1.60 thru 2.29] | 25 | 35 | 35 | 45 |
| 0.091 to 0.124 | [Over 2.29 thru 3.15] | 30 | 40 | 40 | 50 |
| 0.125 to 0.250 | [Over 3.15 thru 6.35] | 35 | 45 | 50 | 60 |
| 0.251 to 0.500 | [Over 6.35 thru 12.70] | 45 | 55 | 60 | 70 |
| 0.501 to 1.000 | [Over 12.70 thru 25.40] | 60 | 70 | 90 | 100 |
| 1.001 to 1.500 | [Over 25.40 thru 38.10] | 90 | 100 | 120 | 130 |
| 1.501 to 2.000 | [Over 38.10 thru 50.80] | 105 | 115 | 150 | 160 |
| 2.001 to 2.500 | [Over 50.80 thru 63.50] | 120 | 130 | 180 | 190 |
| 2.501 to 3.000 | [Over 63.50 thru 76.20] | 135 | 155 | 210 | 220 |
| 3.001 to 3.500 | [Over 76.20 thru 88.90] | 150 | 160 | 240 | 250 |
| 3.501 to 4.000 | [Over 88.90 thru 101.60] | 165 | 175 | 270 | 280 |
| over 4.000 | [Over 101.60] | add 15 min/0.500 in. [12.7 mm] | | add 30 min/0.500 in. [12.7 mm] | |

圖 2.4 美國材料與試驗協會所制定之熱處理製程參數

而本論文依照 ASTM B918 之規範所產出之 O 材與 T6 材，計劃透過 2.4 節所述之單拉試驗與硬度試驗求得基本材料性質，其材料性質包括降伏強度、抗拉強度、硬度等基本性質，並且與 MatWeb[31] 之中的 6061 材料性質比較，硬度與強度方面皆與 MatWeb[31] 中的材料性質差異不大，如表 2.2 與表 2.3。可證實本論文所進行熱處理皆達到準確之熱處理成效，並且後續可使用此鋁合金 6061 之 O 材與 T6 材進行相關研究。

表 2.2 MatWeb 與本論文退火製程 A6061-O 之材料性質

| 6061-O 基本材料性質 | 本論文 | MatWeb |
|---------------|-----|--------|
| 降伏強度(MPa) | 56 | 55.2 |
| 抗拉強度(MPa) | 122 | 124 |

表 2.3 MatWeb 與本論文 T6 熱處理製程 A6061-T6 之材料性質

| 6061-T6 基本材料性質 | 本論文 | MatWeb |
|----------------|-----|--------|
| 降伏強度(MPa) | 275 | 276 |
| 抗拉強度(MPa) | 315 | 310 |

2.2.2 鋁合金 A6061 各狀態之材料性質比較

此節比較本論文研究之兩種材料 A6061-O 與 A6061-T6，如圖 2.5 為鋁合金 A6061-F、A6061-O 之工程應力應變曲線，由此圖可以得知 A6061-F 相較 A6061-O 其材料強度高但延伸率極短。而經由退火製程所得 A6061-O，其均勻延伸率大幅提高為 24%，而降伏強度(YS)與抗拉強度(TS)分別為 56MPa 與 124MPa，皆比 A6061-F 強度來得低，適合後續之鋁合金冷成形。而後續為了增加強度，A6061 通常會選用析出強化的熱處理製程方式來處理，其中包含 T4 為經過自然時效 (natural aging)、T6 為經過人工時效 (artificial aging) 等析出強化製程。在本論文研究中選用 T6 熱處理之鋁合金 A6061-T6 作為研究材料。

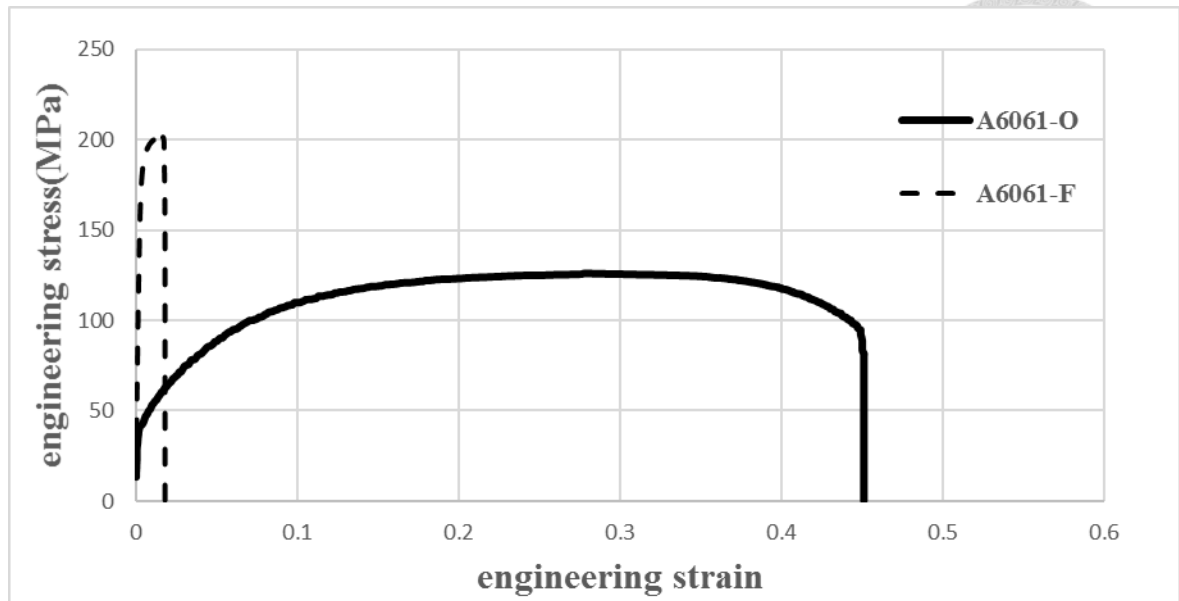


圖 2.5 A6061-O 與 A6061-F 工程應力應變曲線

表 2.4 A6061-O 與 A6061-F 材料性質表

| A6061 | YS(MPa) | TS(MPa) | UEL | E(GPa) |
|-------|---------|---------|-----|--------|
| F | 185 | 201 | <2% | 66 |
| O | 56 | 124 | 24% | 67 |

A6061-T6 是 A6061 經過 T6 熱處理來進行析出硬化增加強度，可使其材料強度大幅提高。如圖 2.6 為 A6061-T6 與 A6061-O 工程應力應變曲線，而表 2.5 為 A6061-T6 與 A6061-O 之材料參數比較表，由表 2.5 可知 A6061-T6 的降伏強度與抗拉強度均明顯高於 A6061-O 之強度，而以延伸率來看，A6061-T6 之均勻延伸率(11.6%)明顯地比 A6061-O 之均勻延伸率(24%)低，而以加工硬化指數而言，A6061-T6

之 n 值比 A6061-O 來得低，其中 n 值是影響材料均勻變形的因素，與成形性有正相關。因此由延伸率與加工硬化指數可知，A6061-T6 的成形性比 A6061-O 相對地差，然而以實際應用面而言，A6061-T6 的高強度較能滿足實際應用，因此研究 A6061-T6 與 A6061-O 之成形差異特性便相當重要，後續將探討此兩種材料與先進高強度鋼之成形特性比較。

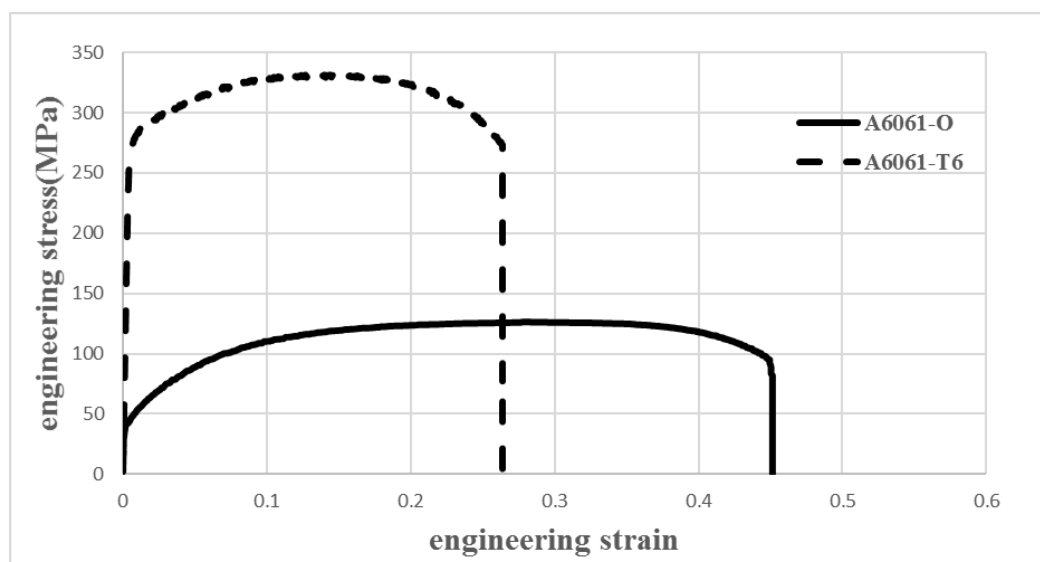


圖 2.6 A6061-T6 與 A6061-O 工程應力應變曲線

表 2.5 A6061-T6 與 A6061-O 之材料參數比較表

| A6061 | YS(MPa) | TS(MPa) | n | UEL | E(GPa) |
|-------|---------|---------|------|-------|--------|
| O | 56 | 122 | 0.21 | 24% | 67 |
| T6 | 275 | 315 | 0.14 | 11.6% | 69 |

2.3 鋁合金與鋼材之成形與回彈差異



因為鋁合金與鋼材在材料性質方面有明顯之差異，包括降伏強度、楊氏係數、加工硬化指數(n 值)、塑性應變比值(r 值)...等等，上述這些材料性質參數皆會對成形與回彈有重要的影響性，因此本節探討鋁合金 A6061-T6 與 A6061-O 以及鋼材之成形特性差異以及回彈差異。針對成形與回彈之影響，本研究透過最基礎的材料參數在不同拉伸模式與沖壓模式之研究，深入了解鋁合金材料在沖壓成形的破裂缺陷以及回彈缺陷，並且比較鋁合金與鋼材之間的差異性

2.3.1 鋁合金與鋼材之材料性質差異

由圖 2.7 可看出，儘管先進高強度鋼的降伏強度普遍皆高於鋁合金材料，但由於鋁合金的楊氏係數相當低，通常為鋼材之三分之一，使得鋁合金材料回彈量不小，如附圖 2.8 顯示。而另外由林建維[32]的鋁合金與傳統鋼引擎蓋板之模擬分析與實驗比對，如圖 2.9 可得知在同樣的模具特徵尺寸下，鋁合金材料較傳統鋼不容易順利成形。因此本節分成兩大方向探討，分別為材料性質對回彈之影響以及材料性質對成形性之影響：透過 V 型彎曲載具來探討鋁合金與鋼材之回彈差異，其中影響回彈的重要參數為降伏強度與楊氏係數，因此將於下節更改降伏強度與楊氏係數來探討回彈差異；另外透過不同拉伸模

式模型來探討鋁合金與鋼材其成形性差異，其中探討材料性質包括加工硬化指數(n 值)、塑性應變比值(r 值)以及降伏強度(YS)。

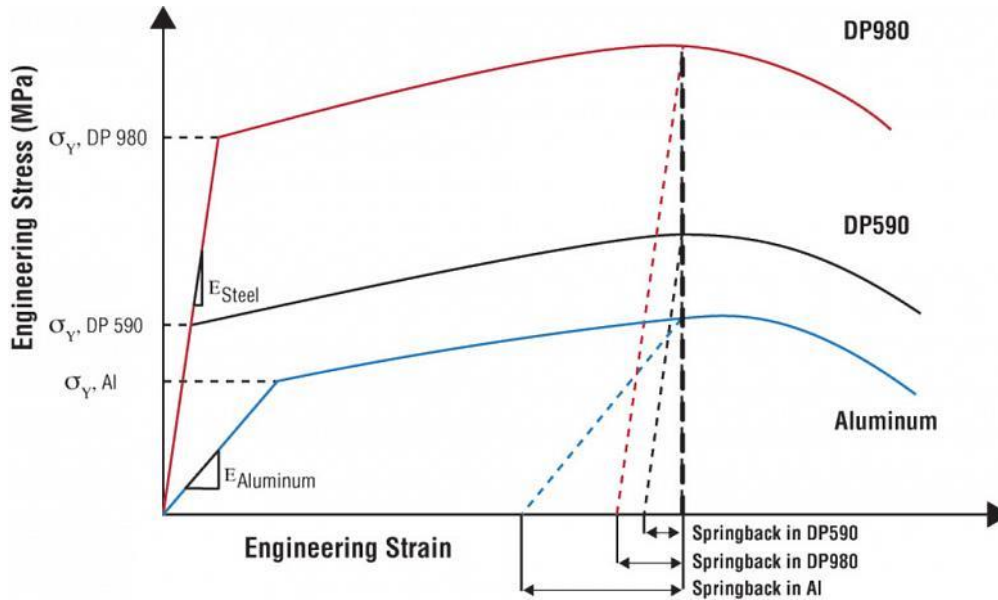


圖 2.7 先進高強度鋼與鋁合金之材料曲線比較

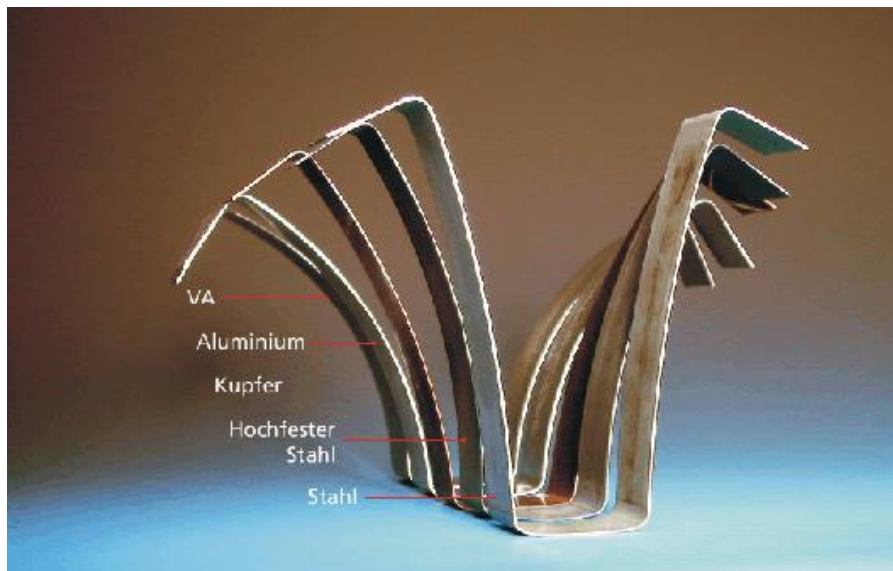


圖 2.8 鋁合金與鋼材之回彈差異



圖 2.9 鋁合金與傳統鋼引擎蓋板之成形差異[31]

2.3.2 楊氏係數與降伏強度對回彈之影響

板材回彈現象與三大因素有關，分別與板材降伏強度成正比，但與楊氏係數及板材厚度成反比，如(式 2.1)。在鋁合金板材厚度不變的條件下，本節探討降伏強度與楊氏係數對鋁合金 A6061-T6 之影響。

$$\text{回彈量} \propto \frac{Y.S}{Et} \quad \text{式 2.1}$$

由於鋼材與鋁材之楊氏係數差了接近三倍，差了三倍的楊氏係數也是造成鋁材較大的回彈量因素之一，因此本節將探討三種材料性質，分別為鋁合金 A6061-T6：原始材料曲線；Case1：降伏強度為三分之一；Case2：楊氏係數為三倍，將三種材料性質代入回彈分析模擬進行回彈量之比較，下表 2.6 為三材料性質改變表。而圖 2.10 則為鋁合金 A6061-T6 原始材料曲線與降伏強度為三分之一之曲線比較。

表 2.6 A6061-T6 降伏強度與降伏強度改變表

| | 降伏強度(MPa) | 楊氏係數(GPa) |
|----------|-----------|-----------|
| A6061-T6 | 275 | 69 |
| Case1 | 92 | 69 |
| Case2 | 275 | 207 |

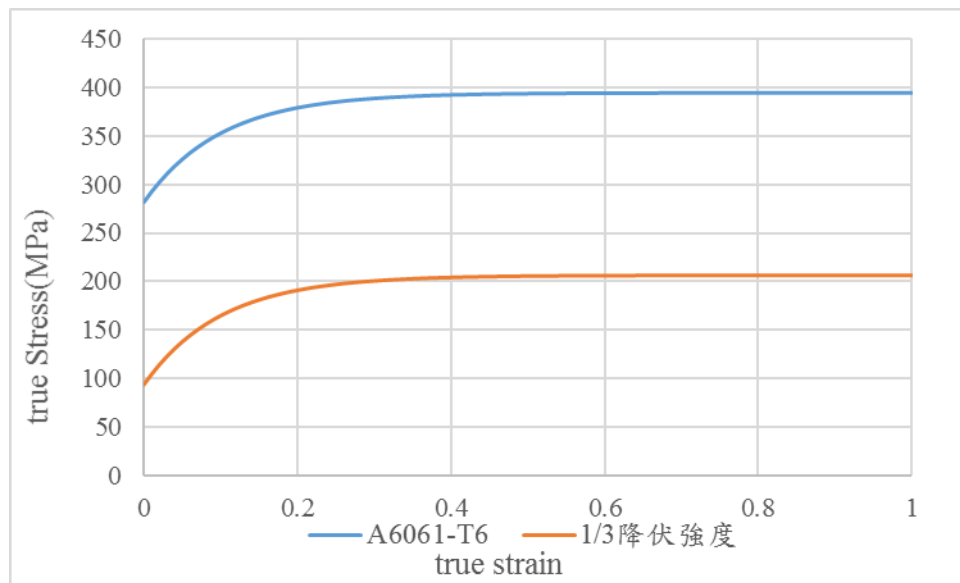


圖 2.10 A6061-T6 改變降伏強度之材料曲線

本節使用 V 型彎曲分析模型，如圖 2.11 所示，其模擬設定採用本論文 4.2 節之設定。將上述三種材料曲線代入 V 型彎曲分析模型，進行回彈量之比較。

而關於回彈量的定義為退模前與退模後的角度差異，且板材往外張開，角度大於 90 度，為正回彈；板材往內退縮，角度小於 90 度，為負回彈。回彈角度則為成形後角度減去 90 度，如圖 2.12 所示。

$$\text{回彈量} = \text{回彈後的角度} - 90 \text{ 度}$$

回彈量大於0 稱為正回彈（板件外開）

回彈量小於0 稱為負回彈（板件內彎）

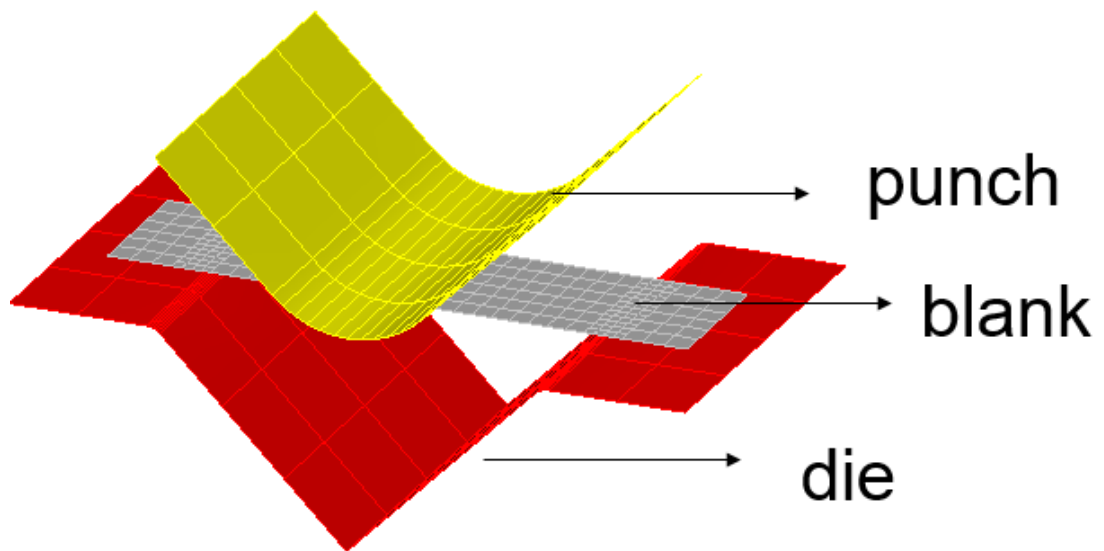


圖 2.11 V 型彎曲分析模型



圖 2.12 V 型彎曲回彈角示意圖

回彈模擬結果如下圖 2.13，為了方便展示回彈角度變化，將其取截面。其中黑色部分為原始 A6061-T6 之材料性質，明顯地與 Case1 及 Case2 之回彈繳不同。而 Case1 及 Case2 回彈角度並無明顯差異，由圖 2.14 可知 Case1 及 Case2 回彈角幾乎相同，可以推測降伏強度與楊氏係數對回彈量的影響性是均等的。因此將鋁合金 A6061-T6 與先進高強度鋼 980 比較，其材料曲線如圖 2.15。其降伏強度大約接近 A6061-T6 之三倍，而由圖 2.16 之回彈角度比較可以發現幾乎吻合，角度差異量不到 1 度。因此可以推論鋁合金 A6061-T6 即使強度不及先進高強度鋼 590、780、980 等等，但回彈缺陷卻是接近先進高強度鋼 980 等級，因此本論文將於第四章深入探討 A6061-T6 之回彈現象，並於第五章探討適合 A6061-T6 之回彈改善方式。

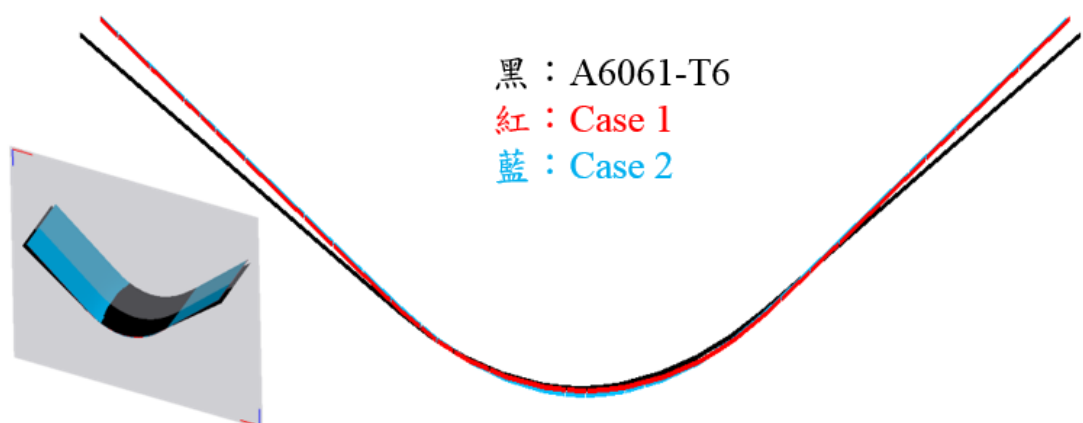


圖 2.13 A6061-T6 三種材料性質之回彈角度比較

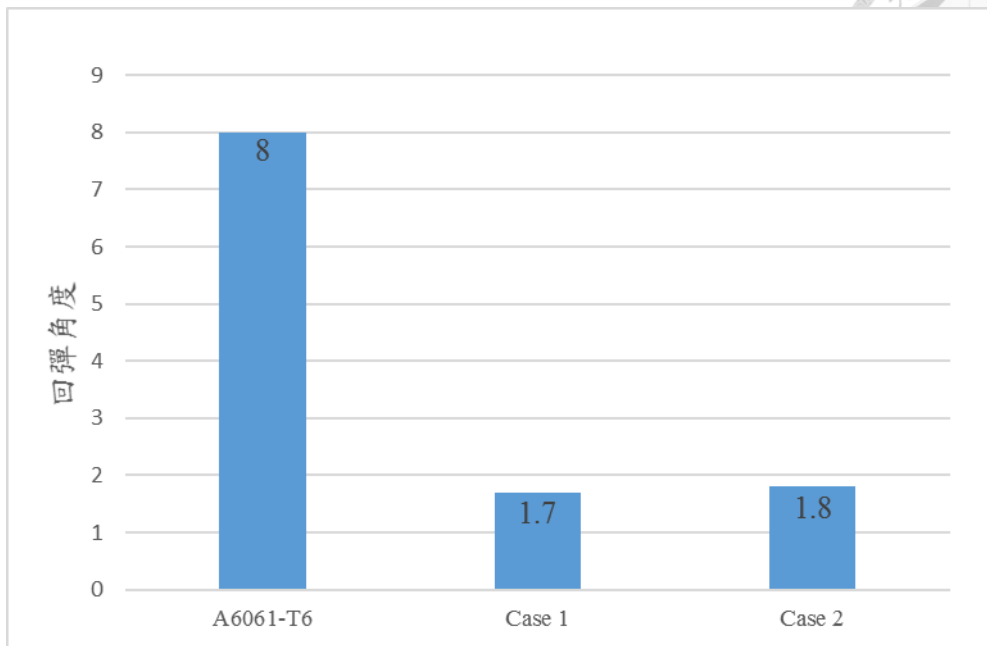


圖 2. 14 A6061-T6 三種材料性質對應回彈角度

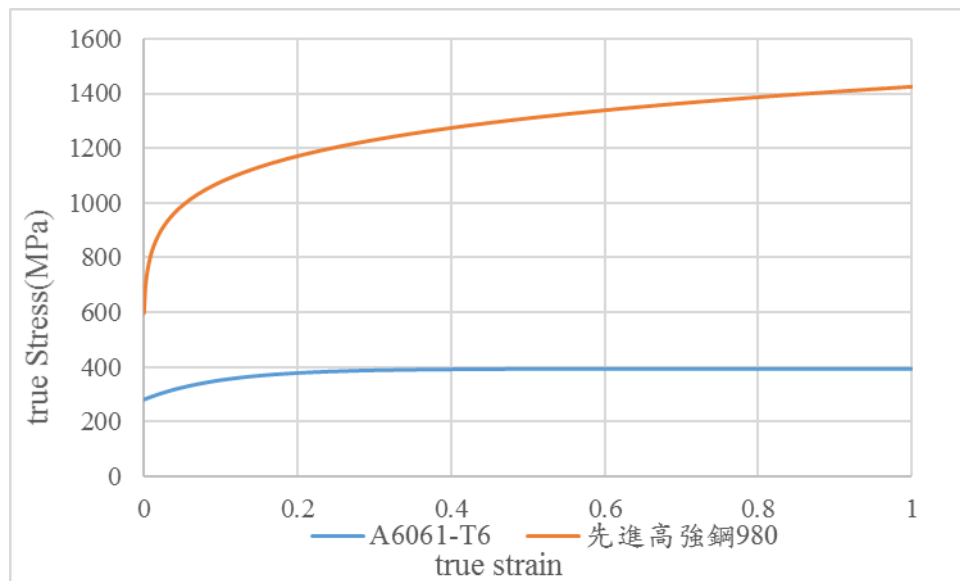


圖 2. 15 A6061-T6 與 980 之材料曲線比較

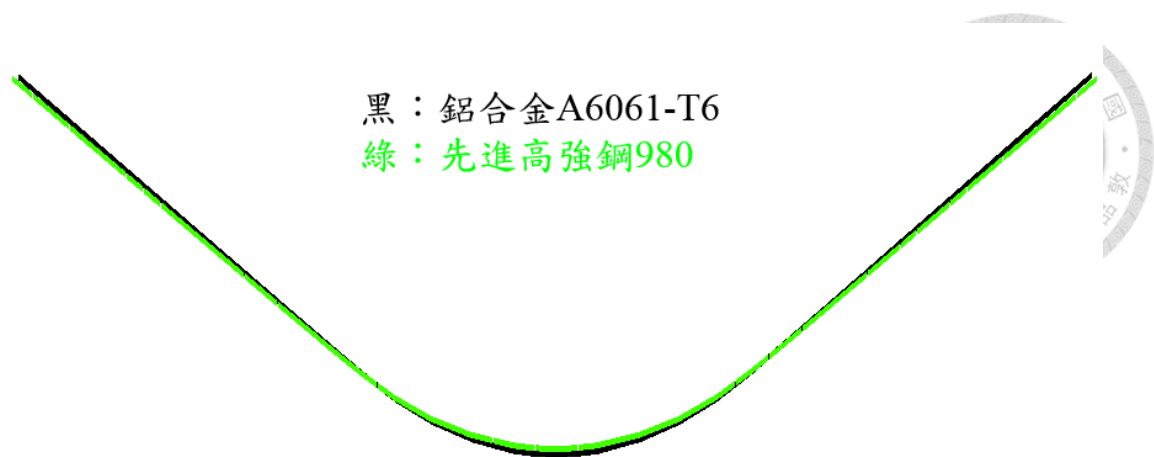


圖 2. 16 A6061-T6 與 980 之回彈角度比較

2.3.3 材料參數對不同成形模式之影響

本節引用林建維[32]所建立不同拉伸模式之 CAE 模型，分別為雙向、平面與引伸的拉伸模式。其為針對不同半徑的試片進行模擬，經由減薄、FLC 分析與蝕刻網格的方法來確定在哪些切割半徑是可產生雙向、平面與引伸的拉伸模式。如圖 2.17 所示，當胚料是使用未切割之圓形試片時，在試片中間產生雙向的拉伸模式，以及圖 2.18 與圖 2.19 則是經由切割達到平面與引伸的拉伸模式效果。後續將使用此不同拉伸模式之 CAE 模型來探討鋁合金 A6061 之材料參數對成形性之影響，並且與鋼材之材料參數作對比。

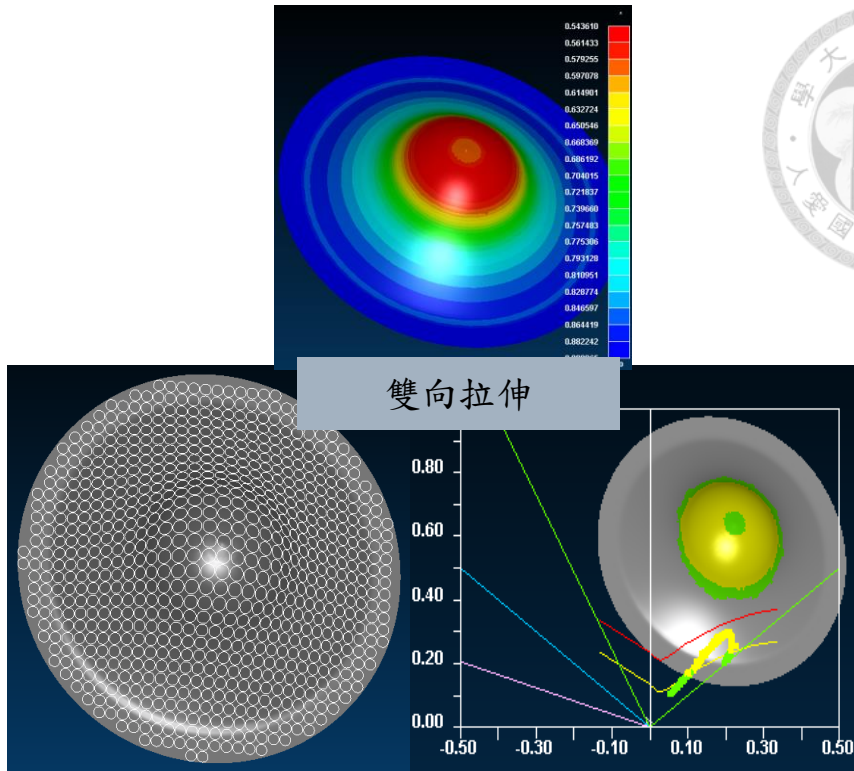


圖 2.17 雙向拉伸模式示意圖[32]

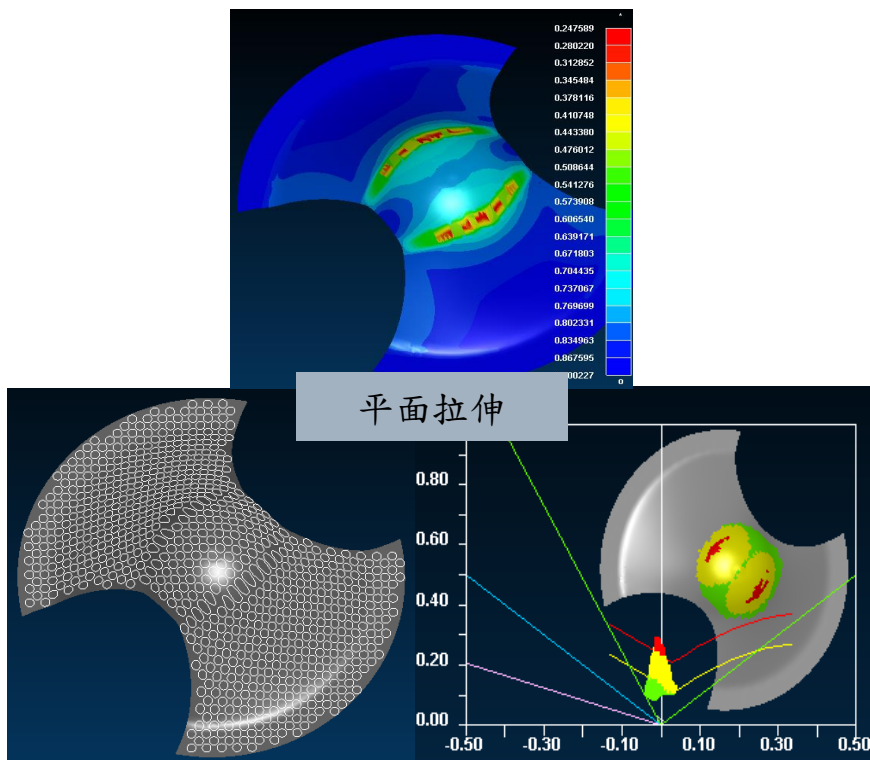


圖 2.18 平面拉伸模式示意圖[32]

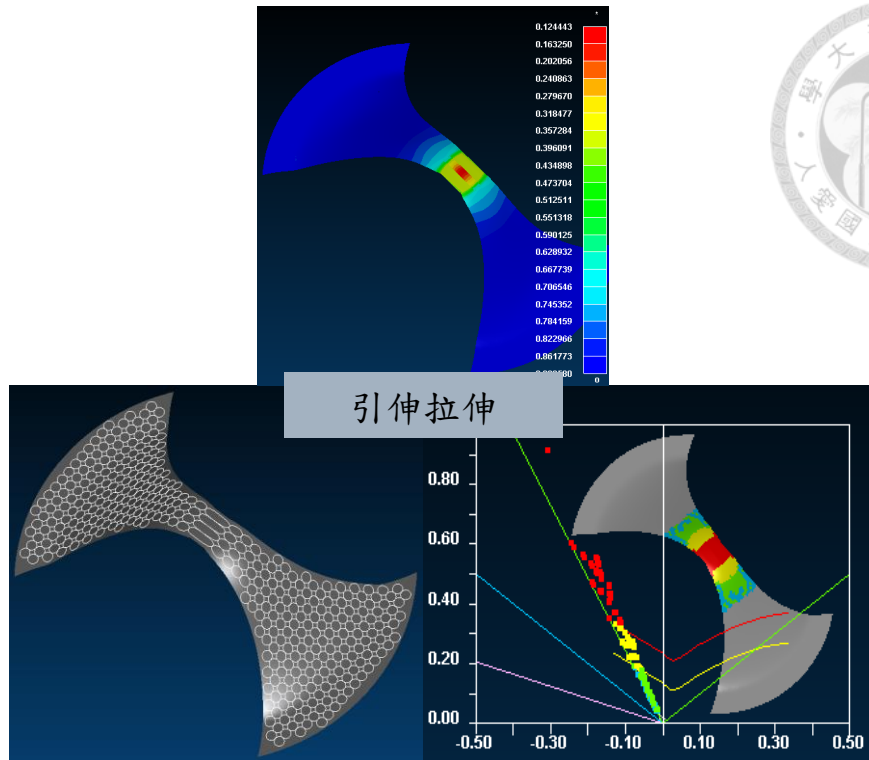


圖 2.19 引伸拉伸模式示意圖[32]

如表 2.7 為 A6061-T6 與 270 及 590R 之材料參數表，由表 2.6 可得知以加工硬化指數(n 值)而言，鋁合金 A6061-T6 之 n 值與先進高強度鋼 590R 接近；而鋁合金 A6061-O 則與一般鋼材 270 接近，其中 n 值是影響材料均勻變形的因素，與成形性有正相關，因此暫且推估鋁合金 A6061-T6 成形性差。另外以塑性應變比值(r 值)而言，鋁合金 A6061-T6 與 A6061-O 各方向之 r 值差異與鋼材 270 或 590R 皆不明顯，但鋁合金 A6061 不管是 T6 材或 O 材的 r 值明顯低於鋼材 270 或 590R，其中 r 值是影響材料抗減薄的因素，與成形性也有正相關，因此可推估鋁合金 A6061 在成形性方面尤其是抗減薄能力明顯地比鋼材 270 或先進高強度鋼 590R 差。



表 2.7 A6061-T6 與 270 及 590R 之材料參數表

| | YS | TS | n | r0 | r45 | r90 | \bar{r} |
|----------|-----|-----|------|------|------|------|-----------|
| 270 | 175 | 262 | 0.25 | 2.09 | 1.6 | 2.34 | 1.91 |
| 590R | 450 | 586 | 0.16 | 1.57 | 1.12 | 1.59 | 1.05 |
| A6061-O | 56 | 124 | 0.24 | 0.7 | 0.44 | 0.5 | 0.54 |
| A6061-T6 | 277 | 321 | 0.17 | 0.67 | 0.4 | 0.69 | 0.52 |

上述簡述了鋁合金 A6061 與鋼材在材料參數差異對成形性之影響，為更詳細了解這些材料成形性之參數在基本拉伸模式下的影響性，將原本 A6061-T6 的材料參數，根據鋼材 270 之材料參數逐一改變 n 值、r 值，將分別套用於林建維[32]建立之雙向、平面與引伸拉伸的模型中以探討成形性。表 2.8 為 A6061-T6 材料參數改變表，在 Case2 與 Case3 中是分別提升 n 值與 r 值至鋼材 270 材料參數的 0.25 與 2。而改變 n 值對真實應力應變曲線有所影響，因此本論文將其改變後之材料曲線呈現如圖 2.20 所示。最後藉由觀察 A6061-T6、Case1 與 Case2 在破裂前於各拉伸模式下的最大減薄率，如最大減薄率變大，則代表此材料參數對特定的拉伸模式有負面的效果，反之，則有正面的影響。如圖 2.21~圖 2.23 為 A6061-T6、Case1 與 Case2 在各拉伸模式之最大減薄率模擬結果以及將最大減薄率結果整理如表 2.9~表 2.11。

表 2.8 A6061-T6 材料參數改變表

| | n 值 | r 值 |
|----------|------|------|
| A6061-T6 | 0.17 | 0.52 |
| Case1 | 0.25 | 0.52 |
| Case2 | 0.17 | 2 |

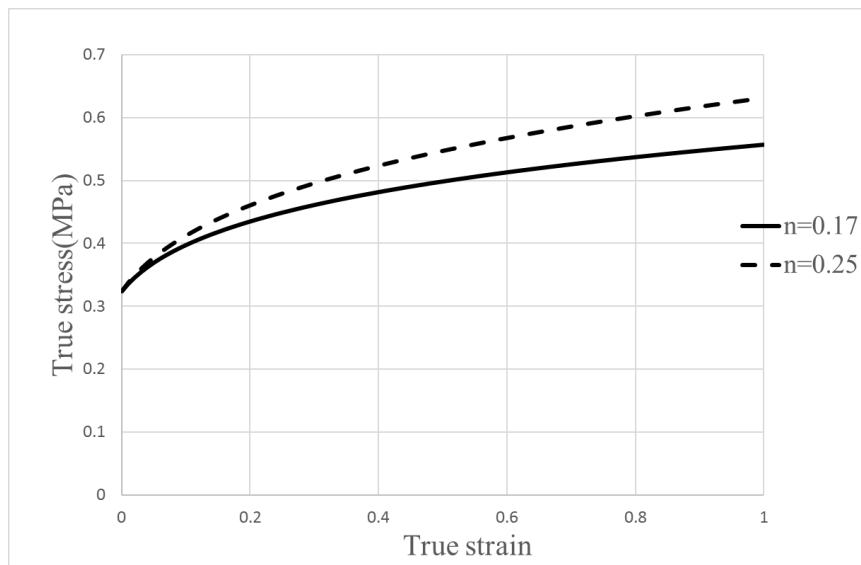


圖 2.20 A6061-T6 改變 n 值之材料曲線

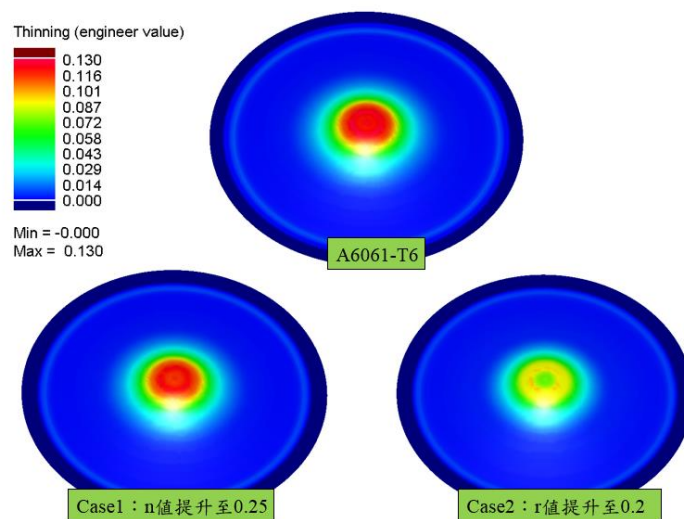


圖 2.21 各條件在雙向拉伸模型之分析結果



表 2.9 各條件於雙向拉伸之最大減薄率比對表

| | A6061-T6 | Case1 | Case2 |
|----------|----------|-------|-------|
| 最大減薄率(%) | 13.4 | 12.8 | 10.1 |

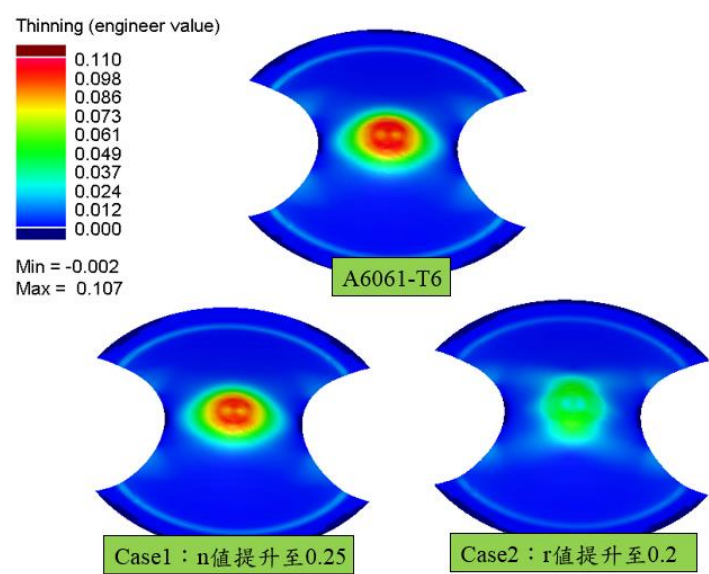


圖 2.22 各條件在平面拉伸模型之分析結果

表 2.10 各條件於平面拉伸之最大減薄率比對表

| | A6061-T6 | Case1 | Case2 |
|----------|----------|-------|-------|
| 最大減薄率(%) | 11.5 | 10.5 | 6.4 |

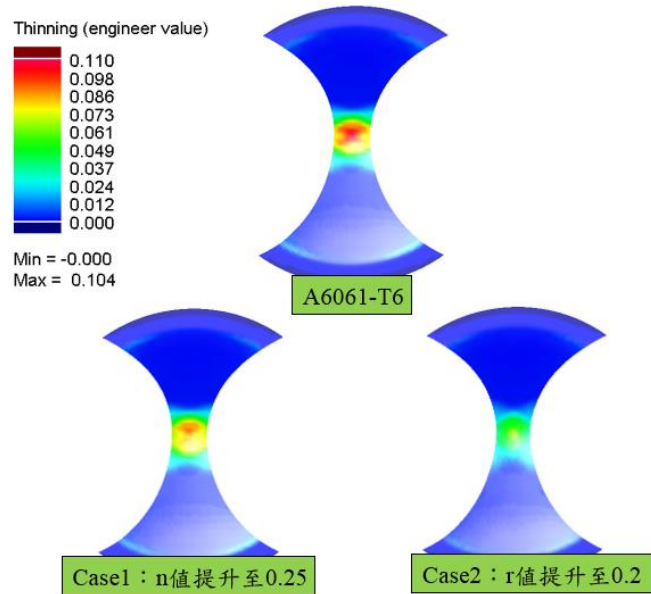


圖 2.23 各條件在引伸拉伸模型之分析結果

表 2.11 各條件於引伸拉伸之最大減薄率比對表

| | A6061-T6 | Case1 | Case2 |
|----------|----------|-------|-------|
| 最大減薄率(%) | 10.4 | 9.2 | 6.4 |

由上述分析結果可以歸納出 n 值與 r 值的提升對於三種型態的成形模式皆有正面的影響性，其中又以 r 值的提升對減薄改善更明顯。然而由表 2.6 可以看出不管是 A6061-T6 或 A6061-O，其 r 值明顯地較鋼材低。因此以鋁合金 A6061 而言，因材料 n 值與 r 值是造成厚度薄化的主要原因，其成形性皆較鋼材來得差，同時 A6061-T6 强度高且 n 值也較低(接近 590R)，因此可以推論 A6061-T6 成形性是表 2.6 當中四種材料最差的。



2.4 基礎材料試驗規劃

2.4.1 DIC 量測平台建立與驗證

2.4.1.1 DIC 量測設備與平台

本論文關於材料試驗的量測方法使用實驗室的 DIC 量測設備進行應變的量測，其中 DIC 即 digital image correlation，是利用影像來計算物體上各點相對位移的數值方法。本論文所使用 DIC 量測設備為 GOM ATOS Core 光學掃描儀[32]，其用途包括動態量測以及逆向掃描，如圖 2.24。可作為試片拉伸時進行應變量測，建立本論文預計研究之鋁合金 A6061 之材料曲線以及塑性應變比值(r 值)，將於下節詳細敘述其求得流程以及驗證其準確性。另外還可針對成形後板件進行形面的逆向掃描，將在第四章、第五章進行鋁合金 A6061 之回彈後的成品形面量測，進而取得鋁合金 A6061 在各基礎成形製程(彎曲、引伸)下所產生的回彈量值。

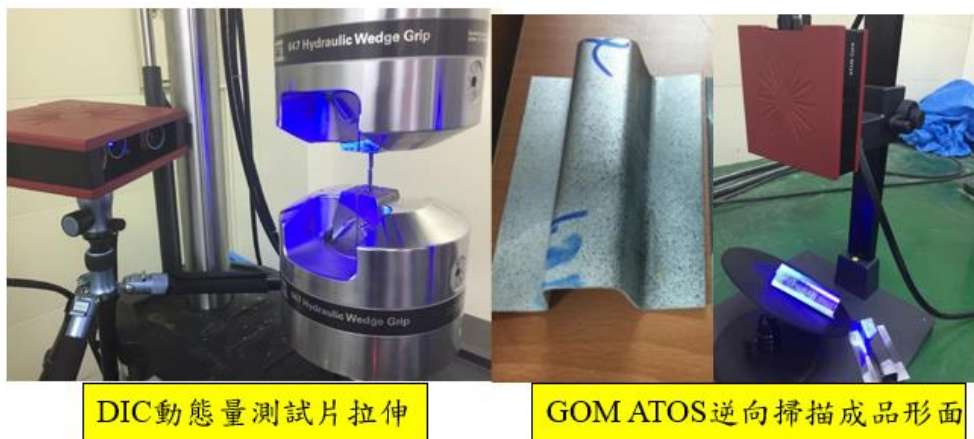


圖 2.24 圖 DIC 量測之應用



2.4.1.2 DIC 量測驗證

在進行 DIC 量測 A6061 單軸拉伸試片之應變量前，應確認其準確性以及其取得應變方式差異對應變值取得之影響性。因此本論文使用應變規以及 DIC 搭配進行單軸拉伸試驗驗證 DIC 準確性。參考文獻[33]之討論 DIC 取得應變方式，其中文獻[34]討論三種量測應變的方式，分別為取 10mm 標距之間距變化、中央點應變、應變場平均應變，其中得到結論為固定標距之間距變化的量測應變方法為最準確的，如圖 2.23。因此本論文也討論此三種方式，如圖 2.25。使用材料為先進高強度鋼 980。而其結果如圖 2.26 與 2.27。由圖 2.27 可得知應變場平均應變是最不準確的量測方式，而固定標距之間距變化與中央點(頸縮點)應變兩者量測方式在拉伸初期為貼合的，但後其接近頸縮現象時，會明顯看到中央點(頸縮點)應變此方式，其量值劇烈增大，但實際上材料尚未發生頸縮現象，使得在拉伸後期應變量測會有誤差。因此文獻[33]建議是以固定標距之間距變化為最適合 DIC 量測應變之方式。而由圖 2.28 得知，應變規取得之 980 工程應力應變曲線與 DIC 量測是穩合的，可以驗證本論文建立之 DIC 量測平台的準確性。因此後續會利用此 DIC 量測平台建立鋁合金 A6061 之材料曲線以及塑性應變比值。

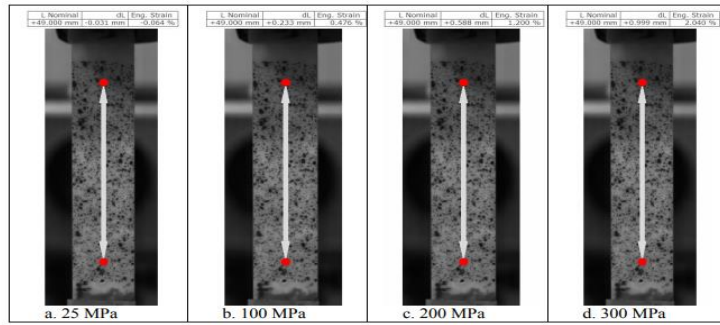


Figure 7. The progression of strain in an S2 glass sample using the single line strain.

圖 2.25 固定標距之間距變化的量測應變[34]

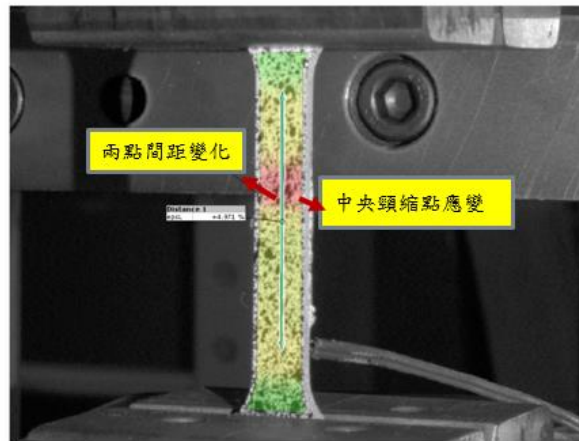


圖 2.26 單軸拉伸試驗搭配 DIC 量測應變

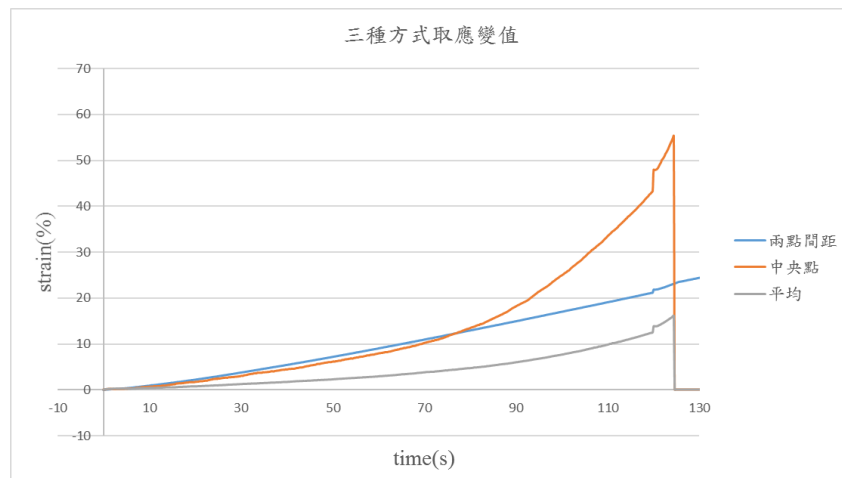


圖 2.27 三種 DIC 量測應變的方式

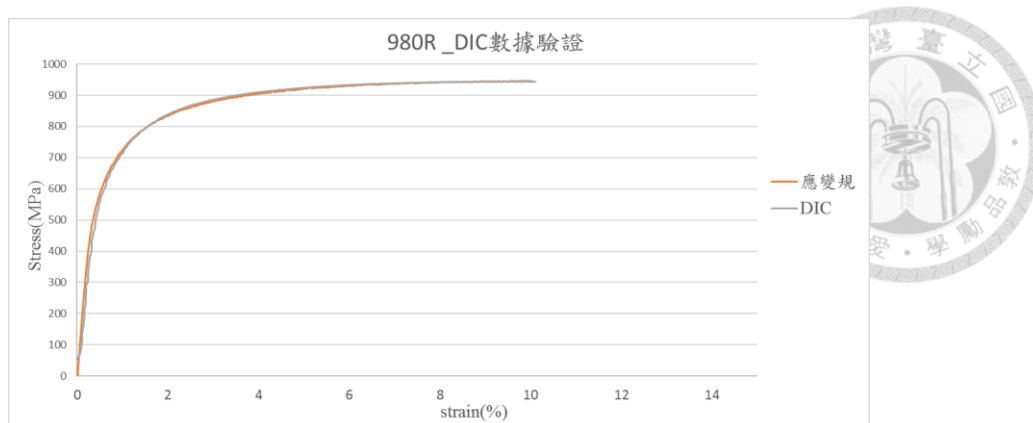


圖 2.28 DIC 與應變規之驗證

2.4.2 單軸拉伸試驗

由於論文後續需要建立鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之材料模型，而材料模型又以材料曲線為最基本。為了確認鋁合金 A6061 不同滾軋方向上之材料性質是否有差異，本節針對不同滾軋方向之鋁合金 A6061 進行切割單軸拉伸試片，如圖 2.29。其試片規格使用規範 ASTM E8 如圖 2.30。另外後續第三章關於建立降伏準則方面則需要鋁合金 A6061 其 0° 、 45° 、 90° 之降伏強度、塑性應變比值，皆需透過不同方向之單軸拉伸試驗，試片拉伸速度為每秒 0.02mm 拉伸至試片斷裂。而關於量測應變的方法，可應用前節所建立之 DIC 平台量測應變以及在試片中間部分貼應變規(strain gage)，並使用資料擷取器將其應變規在實驗中所產生電阻變化轉換為應變。兩者方法皆可得到鋁合金 A6061 工程應力應變曲線，並利用公式轉換將工程應力應變曲線轉換為真實應力應變曲線。利用規範 ASTM E111 找出其彈性區之楊氏係

數，並利用其求得楊氏係數劃一斜率為其值之直線，向右偏移 0.2% 之距離，其與應力應變曲線交叉之點則為材料之降伏強度，如圖 2.31 所示。最後整理鋁合金 A6061-T6 之各方向(0°、45°、90°)拉伸曲線如圖 2.32 以及其材料性質表如表 2.12 。

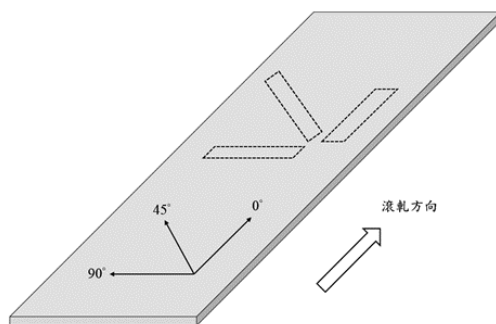


圖 2.29 不同滾軋方向試片之示意圖

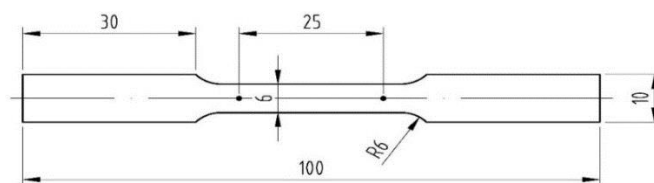


圖 2.30 ASTM E8 單軸拉伸試片尺寸

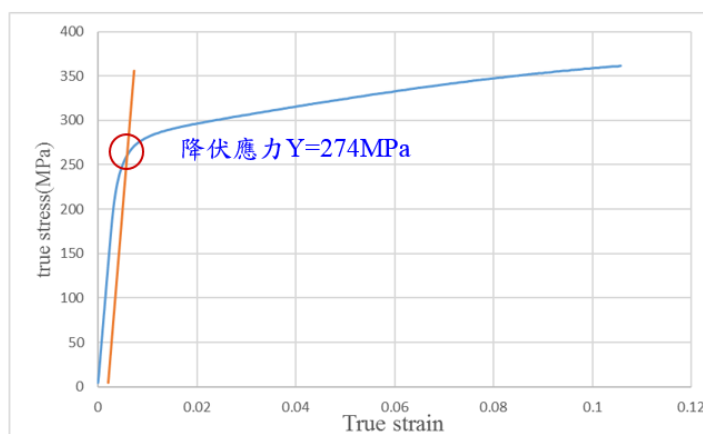


圖 2.31 垂直於板材滾軋方向(90 度)之試片真實應力應變曲線

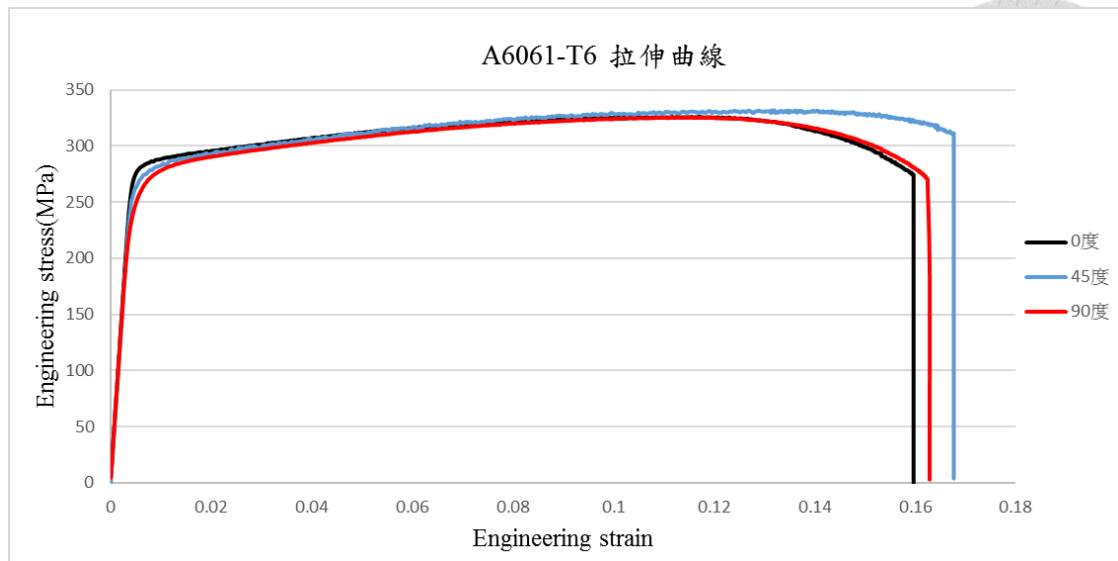


圖 2.32 鋁合金 A6061-T6 各方向之拉伸曲線

表 2.12 鋁合金 A6061-T6 材料性質表

| A6061-T6 | TS | YS | UEL |
|----------|-----|------|-------|
| 0 度 | 315 | 283. | 11.6% |
| 45 度 | 325 | 274 | 11.6% |
| 90 度 | 305 | 275 | 11.1% |

2.4.3 塑性應變比值試驗

由於 2.3 節鋁合金與鋼材之性質差異，可以看出鋁合金 A6061 之塑性應變比值明顯地比鋼材(270、590R)來的小。然而塑性應變比值對材料成形性的影響又是至關重要，由於 2.3.3 節可得到塑性應變比值在不同成形模式中對材料減薄率皆有影響性，因此透過實驗準確地求得塑性應變比值為相當重要的一環。

塑性應變比值(r 值)的定義為拉伸試片橫向應變與厚度方向應變之比值，如式 2.2，可代表材料抗減薄的能力，通常塑性應變比值愈大，材料抗減薄能力愈好。而關於後續本論文第三章鋁合金 A6061 降伏準則之建立，由於非等向性降伏準則之建立需要各方向的塑性應變比值。因此與上節單軸拉伸試驗一樣需針對不同滾軋方向之鋁合金 A6061 進行切割塑性應變比值試片。

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (\text{式 2.2})$$

然而由於厚度方向應變不易量測，故必須利用塑性力學中體積不變的條件由其他方向應變進行轉換，轉換公式如下：

$$\varepsilon_l^p = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + e_l^p)$$

$$\varepsilon_w^p = \ln\left(\frac{w}{w_0}\right) = \ln(1 + e_w^p)$$

$$\varepsilon_t^p = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right)$$

其中，

ε_l^p 、 ε_w^p 、 ε_t^p ：軸向、橫向及厚度方向之真實應變



e_1^p 、 e_w^p ：軸向及橫向之工程應變

l_0 、 w_0 、 t_0 ：變形前之軸向、橫向及厚度方向之長度

l 、 w 、 t ：變形後之軸向、橫向及厚度方向之長度

利用體積不變之關係： $\varepsilon_1^p + \varepsilon_w^p + \varepsilon_t^p = 0$

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w}\right)}{\ln\left(\frac{t_0}{t}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{w_0}{w}\right)}{\ln\left(\frac{wl}{w_0l_0}\right)} \quad (\text{式 2.3})$$

本論文之塑性應變比值實驗採用台灣大學的 MTS810 拉伸試驗機，塑性應變比值實驗之試片為 ASTM E8 之規格，如圖 2.33。塑性應變比值的定義僅在材料塑性變形時，且未發生頸縮現象之均勻變形區域有意義。如圖 2.34 將降伏應力至極限應力之區域等分成四等份，將每條分界線的位移作為塑性應變比值實驗的拉伸距離，使用高度規刻畫記號如圖 2.35，待拉伸完畢後量測試片三個位移量變形後之軸向及橫向方向距離。最後代入(式 2.3)求得三個位移量之 r 值，取其平均即為此材料之 r 值。

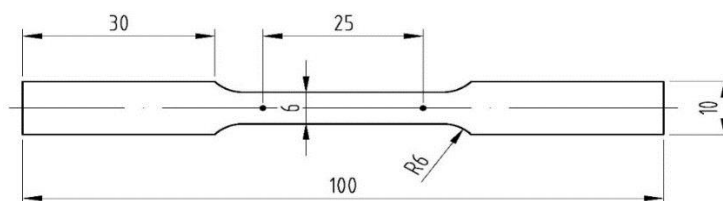


圖 2.33 ASTM E8 試片規格

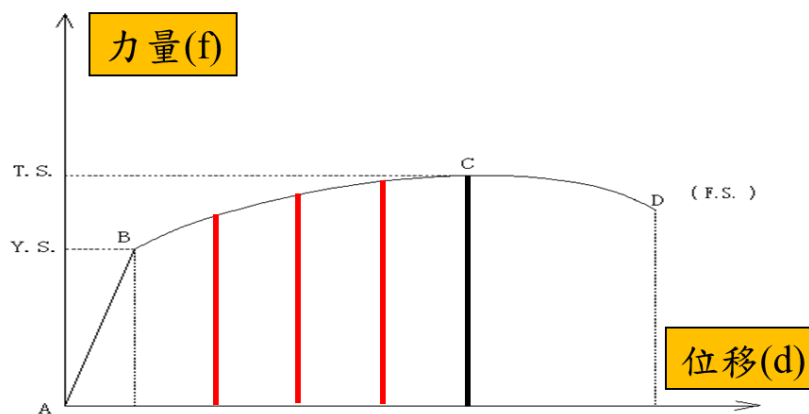


圖 2.34 塑性應變比值實驗之四等份拉伸距離

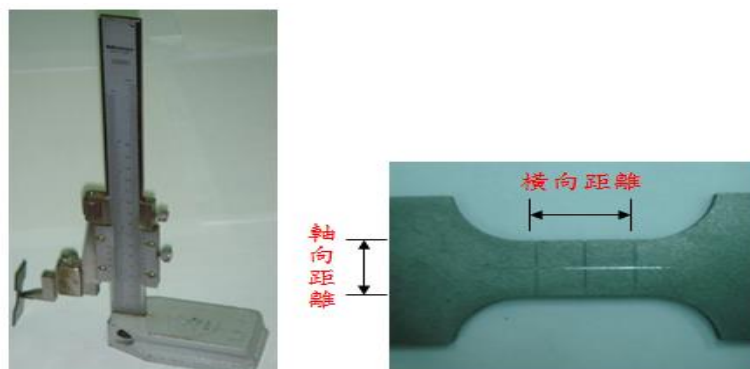


圖 2.35 高度規刻畫記號

不過由於 2.4.1 節 DIC 量測平台之建立，其中可透過 DIC 進行量測試片寬度與長度方向之應變，因此不需另外再切割塑性應變比值試片，直接使用單軸拉伸試片在單軸拉伸試驗中量測應變即可，如圖 2.36。其中關於 DIC 量測塑性應變比值方式，本論文參考文獻[35]對於塑性應變比值求法，此文獻總結兩種方式取得塑性應變比值，分別為 point method 與 line method，取法示意圖如圖 2.37。point method 為取量測試片應變場上的參考點作為應變量測目標；而 line method 則

為取量測試片標距長度(gage length)上的長度變化量，而關於量測 r 值結果則如圖 2.38，為 line method 與 point method 量測 r 值之比較圖，其中 line method 會依照選取試片標距長度之差異影響到所量測的塑性應變比值，而試片標距長度也會依照試片之幾何尺寸而改變，因此 line method 因無法選定適合試片標距長度，而較無法量測穩定之塑性應變比值；相對的以 point method 量測之塑性應變比值數值相當穩定，且不受試片幾何尺寸影響。因此 point method 為較佳的量測塑性應變比值方法，本論文也延用此方法(point method)作為量測鋁合金 A6061 塑性應變比值之方式，另外也會比較 line method 量測塑性應變比值之差別，最後再使用前述量測 r 值方式與 DIC 量測到之 r 值進行驗證。

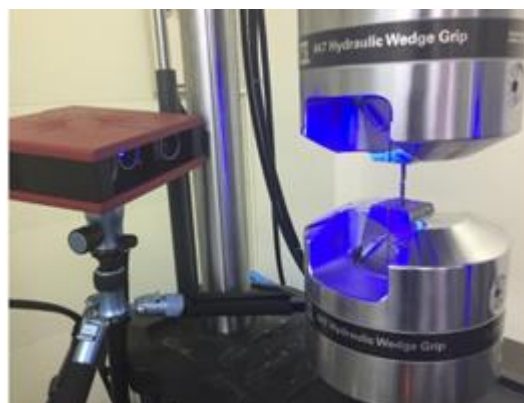


圖 2.36 DIC 量測單軸拉伸試片

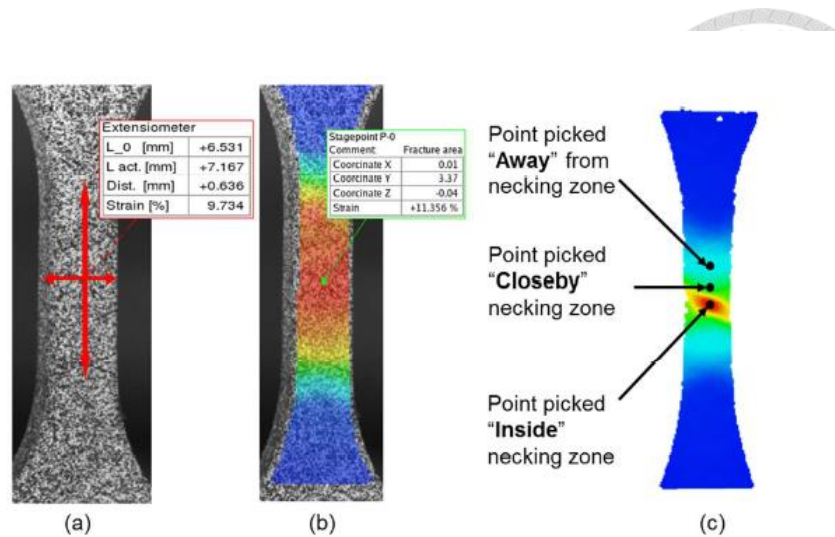


Fig. 4: Strain measurement method for r-value analysis (a) Line method, (b) Point method and (c) three point pickup locations for the point method [5].

圖 2. 37 line method 與 point method 示意圖[34]

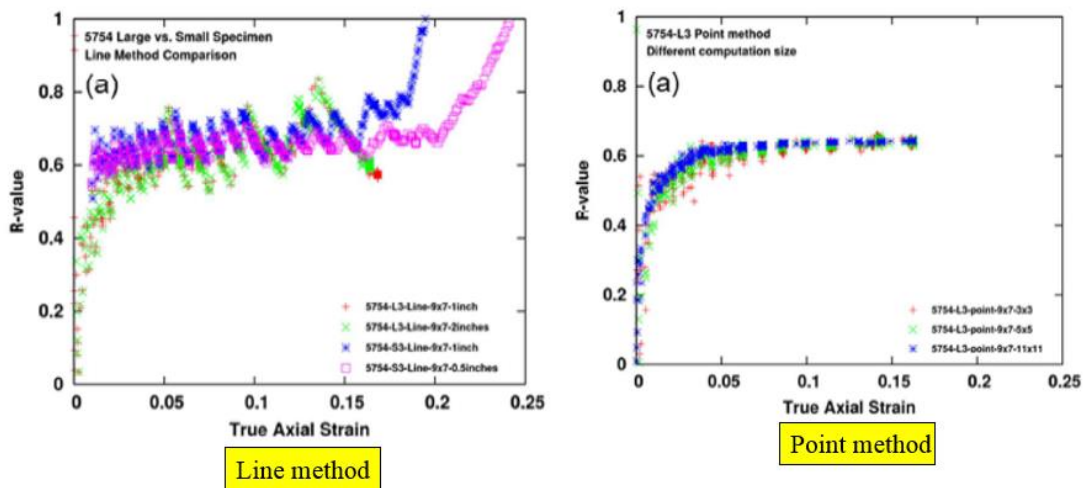


圖 2. 38 Line method 與 point method 比較[34]

根據上述 DIC 量測塑性應變比值方法，本論文於此節選取鋁合金 A6061-O 之 45 度單軸拉伸試片及塑性應變比值試片作為 DIC 量測塑性應變比值之驗證，如圖 2.39 為三種位移量之塑性應變比值試

片及 DIC 量測之 45 度單軸拉伸試片。而在 DIC 量測塑性應變比值方面，本節分別比較 line method 與 point method 之差別，其 DIC 選取方式如圖 3.38。取得軸向與橫向應變趨勢後，在代入式 2.3，即可得到塑性應變比值趨勢圖，如圖 2.40 為兩者 DIC 量測方式所得到之塑性應變比值趨勢，由圖 2.41 可明顯地看出 line method 得到之塑性應變比值較不穩定；而 point method 得到之塑性應變比值趨於定值，以穩態以後的數據取平均值可得到鋁合金 A6061-O 45 度之塑性應變比值為 0.4。

另外由前述的三種位移量之塑性應變比值試片所得到之塑性應變比值為 0.44，驗證 DIC 量測塑性應變比值為可信之量測方式。本論文也皆完成鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 各方向之塑性應變比值，將鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之塑性應變比值列於表 2.13。

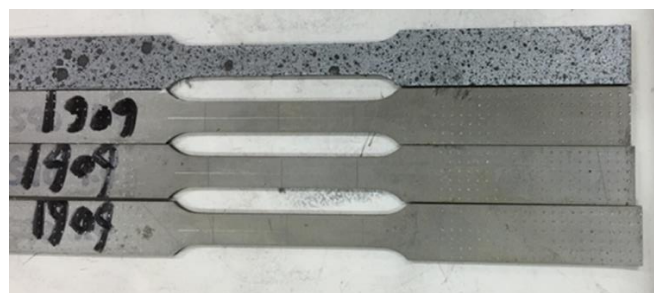


圖 2.39 三種位移量之塑性應變比值試片及 DIC 量測之單軸拉伸試片

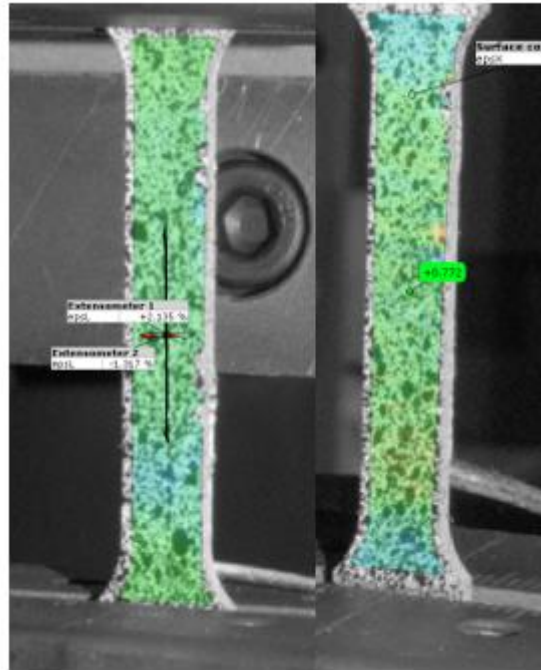


圖 2.40 鋁合金 A6061-O 45 度試片之軸向與橫向應變

$$r = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} = \frac{\epsilon_w}{-(\epsilon_w + \epsilon_l)} \quad (\text{式 2.4})$$

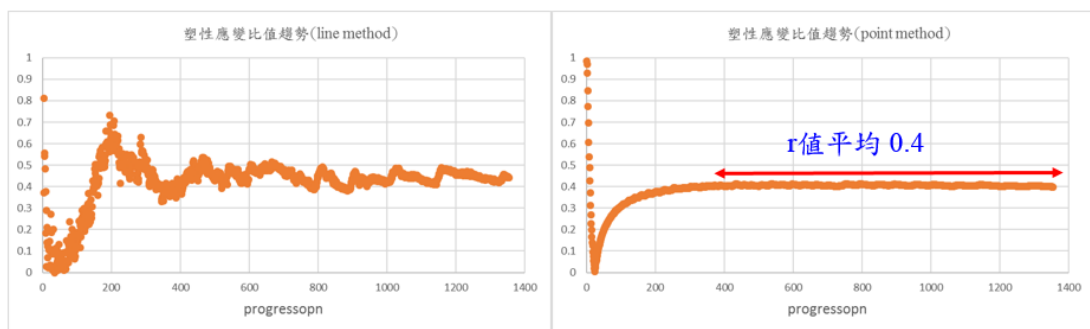


圖 2.41 鋁合金 A6061-O 45 度之塑性應變比值趨勢(line method v.s point method)

表 2.13 鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之塑性應變比值

| | 0 度 | 45 度 | 90 度 | \bar{r} |
|----------|------|------|------|-----------|
| A6061-O | 0.67 | 0.4 | 0.69 | 0.54 |
| A6061-T6 | 0.7 | 0.44 | 0.49 | 0.52 |

2.4.4 摩擦實驗

在進行鋁合金沖壓成形時，鋁合金板材與模具間之摩擦力會影響板材之成形性，當摩擦係數較大時容易因為摩擦力而導致板材流動不易，產生減薄的現象。此外在進行鋁合金沖壓成形模擬分析時，也需輸入鋁合金板材與模具間之摩擦係數，而摩擦係數的準確性也會影響成形分析的結果。

而本論文採用鄭耀偉[43]所架設之摩擦實驗平台，如圖 2.42，此機台主要有兩個動力來源，其中一端油壓提供壓料力夾持板材，另一端提供壓拉伸力用來拉伸板材。而測得摩擦係數之實驗方法則為平板拉伸方法，示意圖為圖 2.43，本論文摩擦實驗使用鄭耀偉[43]設計之摩擦實驗模具，如圖 2.44。設定模具與板材之接觸壓力為 30MPa，藉由兩端動力來源之荷重元提供的夾持正向力(N)和拉伸力(P)，藉由式(2.5)計算摩擦係數值。

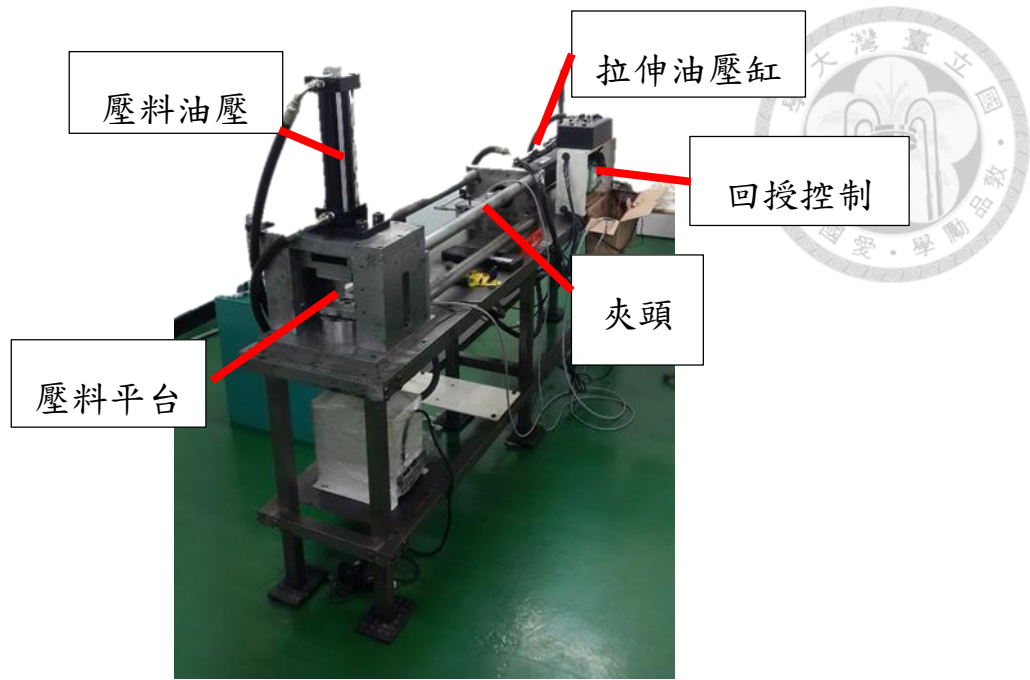


圖 2.42 摩擦機台[43]

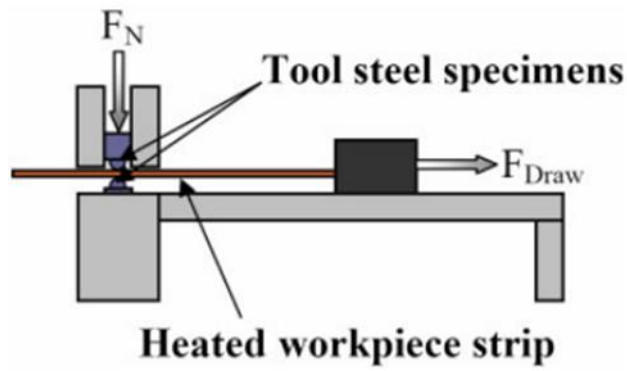


圖 2.43 平板拉伸方法示意圖[44]



圖 2.44 摩擦實驗模具[43]

$$\mu = \frac{P}{2N}$$

(式 2.5)

然而因為鋁合金與模具鋼之間親和性問題，會造成鋁材 6061 在常溫摩擦的條件下發生磨耗現象，使得量測之摩擦係數過大且不穩定。同時造成模具以及鋁材表面受損，如圖 2.45 為鋁材受損情況，可以看出鋁材有明顯被模具表面刨除現象。而圖 2.46 則為模具表面經光學顯微鏡放大之畫面，可以看出模具表面有鋁材沾附之現象。因此後續將考慮添加潤滑劑進行摩擦試驗，以避免鋁材摩擦係數量測不準確之狀況。



圖 2.45 鋁材受損狀況

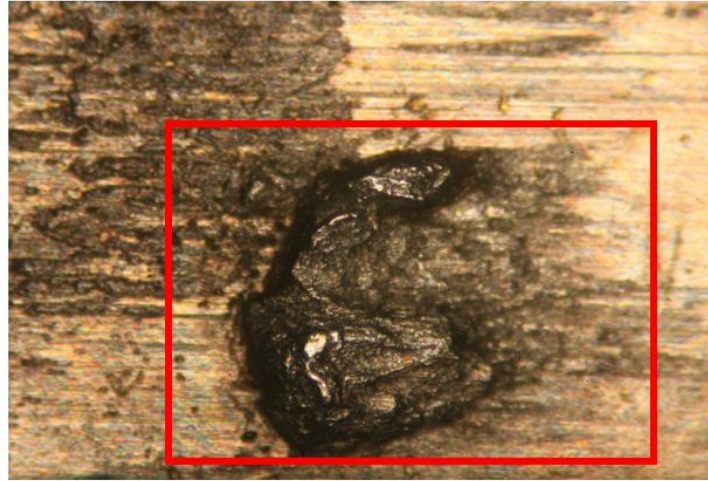


圖 2.46 模具表面觀察到鋁材沾附現象

因此本論文考慮使用潤滑劑來降低板材和模具間之摩擦力，以及避免前述現象。常見鋁合金板件用潤滑劑為石墨與二硫化鉬，本論文選用二硫化鉬潤滑劑，如圖 2.47。而實驗前後鋁材表面如圖 2.48，可以看出摩擦表面相當均勻，沒有上述之表面受損情況。而量測之摩擦係數數值也相當穩定，如圖 2.49，得到 A6061 摩擦係數平均值為 0.09。後續將使用此摩擦係數帶入模擬分析模型中進行成形分析。



圖 2.47 二硫化鉬潤滑劑



圖 2.48 二硫化鉬潤滑劑條件下之鋁材摩擦前後對照

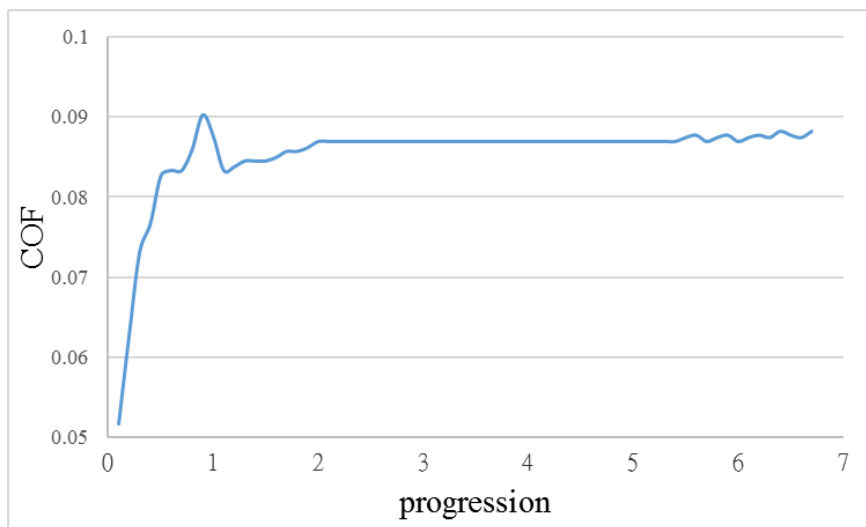


圖 2.49 A6061 在接觸壓力 30MPa 之摩擦係數

第三章 鋁合金材料模型探討與建立



3.1 降伏準則之研究與建立

建立完整之材料模型是提升有限元素回彈模擬預測之研究方向，故本節將針對材料模型之降伏準則進行探討，降伏準則可用於判斷材料產生塑性變形時之受力狀況。然而早期的材料降伏準則只適用於等向性材料，而最廣泛使用於等向性材料之降伏準則為 Tresca 降伏準則(最大剪應力準則)及 von Mises 降伏準則(應變能準則)。但由於材料晶體結構與滾壓軋製過程的影響，金屬板材具有顯著的異向性性質，因此需要有加入異向性參數的降伏準則來描述其變形行為。因此在進行第四章鋁合金回彈分析與第五章阻料條設計分析前，本章將針對沖壓成形常用之降伏準則進行探討，其中包含 Hill 48、Hill 90、Barlat 89、Barlat 91 等降伏準則。

3.1.1 Hill48 降伏準則之探討

Hill 於 1948 年提出 Hill 48 降伏準則，其為二階之降伏準則，可描述材料的異向性性質。Hill 48 降伏準則結合等向性加工硬化準則，為目前模擬板金沖壓成形中最常使用的材料模型，其降伏方程式如(式 3.1)：

$$2f(\sigma_{ij}) = F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (\text{式 3.1})$$

$$\frac{1}{X^2} = G + H \quad ; \quad \frac{1}{Y^2} = H + F \quad ; \quad \frac{1}{Z^2} = F + G \quad (\text{式 3.2})$$

在(式 3.1) 中 F、G、H、L、M 與 N 為描述異向性的材料係數。各方向之單軸拉伸降伏應力可由 F、G、H 之材料係數表示如(式 3.2)。

其(式 3.1) 在經過轉換為薄板平面應力之形式($\sigma_{33} = \sigma_{31} = \sigma_{23} = 0$; $\sigma_{11} \neq 0$; $\sigma_{22} \neq 0$; $\sigma_{12} \neq 0$)，則降伏方程式可簡化為(式 3.3)：

$$2f(\sigma_{ij}) = (G + H)\sigma_{11}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} + (H + F)\sigma_{22}^2 + 2N\sigma_{12}^2 = 1 \quad (\text{式 3.3})$$

若用塑性應變比值來表示，而 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 代表材料於滾軋製程後不同角度的塑性應變比值，(式 3.3)中的材料參數 F、G、H 及 N 可分別組成 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 如(式 3.4)。

$$r_0 = \frac{H}{G} \quad ; \quad r_{90} = \frac{H}{F} \quad ; \quad r_{45} = \frac{N}{F+G} - \frac{1}{2} \quad (\text{式 3.4})$$

由(式 3.4)之最後一式整理可得(式 3.5)



$$N = F + G\left(r_{45} + \frac{1}{2}\right) \quad (\text{式 3.5})$$

將(式 3.5)與(式 3.2)整理可得(式 3.6)

$$2N = \frac{1}{Z^2} \frac{1+2r_{45}}{2} = \frac{1}{\sigma_0^2} \frac{r_0+r_{90}}{r_{90}(1+r_0)}(2r_{45}+1) \quad (\text{式 3.6})$$

將(式 3.4)與(式 3.6)聯立後，可將材料參數 F、G、H 及 N 亦可由 r_0 、 r_{45} 、 r_{90} 組成如(式 3.7)。

$$F = \frac{r_0}{r_{90} + r_{90}r_0} ; G = \frac{1}{(r_0 + 1)} ; H = \frac{r_0}{(r_0 + 1)} ;$$
$$N = \frac{r_{90}r_0 + 2r_0r_{45} + 2r_{45}r_{90}}{2r_{90} + 2r_0r_{90}} \quad (\text{式 3.7})$$

若以兩方向主應力(principal stress)(σ_1 、 σ_2)來表示($\sigma_{12} = 0$)，並將(式 3.7)代入(式 2.3)可轉換為(式 3.8)：

$$\sigma_1^2 - \frac{2r_0}{1+r_0}\sigma_1\sigma_2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)}\sigma_2^2 = \sigma_0^2 \quad (\text{式 3.8})$$

建立 Hill 48 降伏準則需之材料性質參數及實驗如表 3.1 所示。



表 3.1 Hill 48 降伏準則之模擬需求參數及實驗表

| | |
|--------------|--|
| Hill 48 降伏準則 | |
| 模擬所需之材料參數 | 楊氏係數、蒲松比、材料密度、 單軸拉伸之應力應變曲線、 0°、45°、90°塑性應變指數 |
| 取得參數所需之材料實驗 | 單軸拉伸實驗、塑性應變指數實驗 |

3.1.2 Hill90 降伏準則之探討

Hill48 降伏準則雖可適用於一般具異向性之材料，但對於多軸向受力變形，尚無法適當地描述材料之降伏情形。因此，Hill[36]於 1990 年提出 Hill 90 降伏準則，比起 Hill 48 降伏準則，更可以描述材料多軸向受力之變形狀況。Hill 90 降伏準則之理論公式為一種非二次式，其降伏方程式如(式 3.9)所示：

$$f(\sigma_{ij}) = |\sigma_{11} + \sigma_{22}|^m + \left(\frac{\sigma_b}{\tau}\right)^m |(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2|^{\frac{m}{2}} + |\sigma_{11}^2 + \sigma_{22}^2 + 2\sigma_{12}^2|^{\frac{m}{2}-1} \{-2a(\sigma_{11}^2 - \sigma_{22}^2) + b(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2\} = (2\sigma_b)^m \quad (\text{式 3.9})$$

其中， σ_b 表示雙軸向拉伸(Equibiaxial tension)之降伏強度、 τ 表示純剪力變形之降伏強度以及 m 為描述材料降伏面之形狀係數。而 m 值可利用(式 3.10)計算得出；透過(式 3.11)計算可得 a 、 b 與 $\left(\frac{\sigma_b}{\tau}\right)^m$ 。

$$m = \frac{\ln[2(r_{45} + 1)]}{\ln \frac{2\sigma_b}{\sigma_{45}}} \quad (\text{式 3.10})$$

$$a = \frac{1}{4} \left| \left(\frac{2\sigma_b}{\sigma_{90}}\right)^m - \left(\frac{2\sigma_b}{\sigma_0}\right)^m \right| ;$$

$$b = \frac{1}{2} \left| \left(\frac{2\sigma_b}{\sigma_0}\right)^m + \left(\frac{2\sigma_b}{\sigma_{90}}\right)^m \right| - \left(\frac{2\sigma_b}{\sigma_{45}}\right)^m ;$$

$$\left(\frac{\sigma_b}{\tau}\right)^m = 1 + 2 \times r_{45} \quad (\text{式 3.11})$$

建立 Hill 90 降伏準則時需要之材料性質參數及實驗如表

表 3. 2 Hill 90 降伏準則之模擬需求參數及實驗表

| Hill 90 降伏準則 | |
|-----------------|---|
| 模擬所需之材料參數 | 楊氏係數、蒲松比、材料密度、單軸拉伸應力應變曲線、雙軸拉伸因子、 0°、45°、90°之降伏應力、 0°、45°、90°之塑性應變指數 |
| 取得參數所需之材料 實驗 | 拉伸實驗（單軸、雙軸）、 塑性應變指數實驗 |

3.1.3 Barlat89 以及 Barlat 91 降伏準則之探討



Barlat 和 Lian[22,23]於 1989 年提出非二次式且非等向性的降伏準則，其降伏函數如(式 3.12)所示，其中 a 、 c 、 h 、 p 、 M 值為 CAE 分析所需參數，表現材料異向性，可透過 0° 、 45° 、 90° 之降伏強度及 r 值求得。而 M 值隨材料晶格結構而不同，其先進高強度鋼 M 值為 6 為體心立方材料，而鋁合金 M 值為 8 則為面心立方材料。

$$f = a|k_1 + k_2|^M + a|k_1 - k_2|^M + c|2k_2|^M = 2\bar{\sigma}^M$$
$$k_1 = \frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2}, k_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - h\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{xy}^2}$$

(式 3.12)

然而 Barlat[24]於 1991 年提出 Barlat 91 降伏準則，去修正 Barlat89 降伏準則，其方程式如(式 3.13)。

$$\emptyset = |S_1 - S_2|^m + |S_2 - S_3|^m + |S_3 - S_1|^m = 2\bar{\sigma}^m \quad (\text{式 3.13})$$

而 S_1 、 S_2 、 S_3 為矩陣 $[S]$ 之主軸值，其各分量如(式 3.14)：

$$S_i = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}$$
$$S_{11} = \frac{[(b+c)\sigma_{11} - c\sigma_{22} - b\sigma_{33}]}{3}$$
$$S_{22} = \frac{[(a+c)\sigma_{22} - c\sigma_{11} - a\sigma_{33}]}{3}$$

$$S_{33} = \frac{[(a + b)\sigma_{33} - b\sigma_{11} - a\sigma_{22}]}{3}$$

$$S_{12} = S_{21} = h\sigma_{12} \quad ; \quad S_{13} = S_{31} = g\sigma_{13} \quad ; \quad S_{23} =$$

$$S_{32} = f\sigma_{23}$$



其中，材料係數 a、b、c、f、g、h 代表材料之異向性性質，可由 0°、45°、90° 之降伏應力及塑性應變指數 r 值決定，而(式 3.13)中的 M 值將視材料為體心立方(M=6)或面心立方(M=8)決定。

建立 Barlat 91 降伏準則需要材料性質參數及實驗如表 3.3 所示。

表 3.3 Barlat 89 降伏準則之模擬需求參數及實驗表

| Barlat 89 降伏準則 | |
|----------------|--|
| 模擬所需之材料參數 | 楊氏係數、蒲松比、材料密度、 單軸拉伸之應力應變曲線、 材料晶格參數、 0°、45°、90°之降伏應力、 0°、45°、90°之塑性應變指數 |
| 取得參數所需之材料實驗 | 單軸拉伸實驗、塑性應變指數實驗 |

3.1.4 Hill48 與 Barlat91 降伏準則參數建立

由於 Hill90 降伏準則需透過雙軸實驗求得相關參數，因此本研究以 Hill48 與 Barlat91 降伏準則參數建立為主，經由第二章所求得之鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之各方向材料性質(降伏應力、塑性應變比值)可建立 Hill48 與 Barlat91 降伏準則參數之 Hill48 與 Barlat91 降伏準則參數，如圖 3.1 ~圖 3.4。後續於第四章將進行探討不同降伏準則之材料模型其回彈分析模擬之準確性。

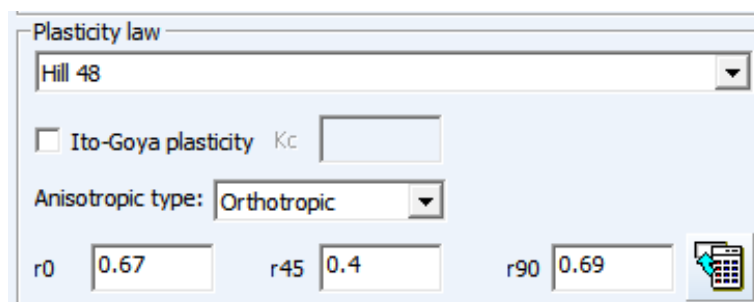


圖 3.1 A6061-O 之 hill48 降伏準則參數建立

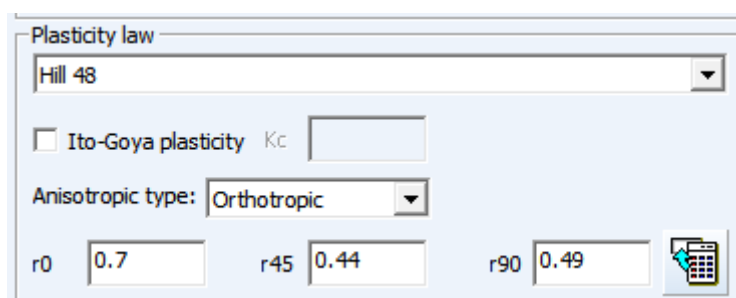


圖 3.2 A6061-T6 之 hill48 降伏準則參數建立

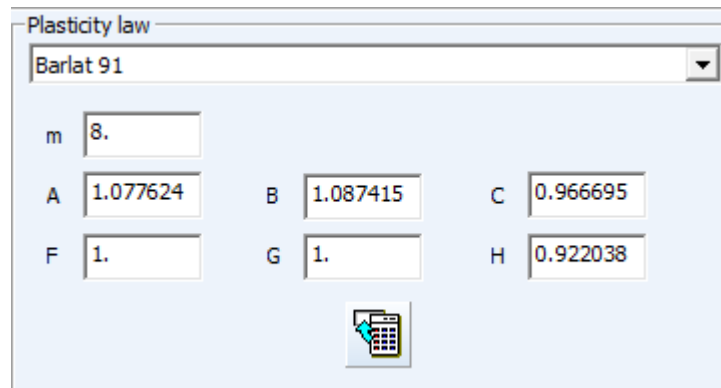


圖 3.3 A6061-O 之 Barlat91 降伏準則參數建立

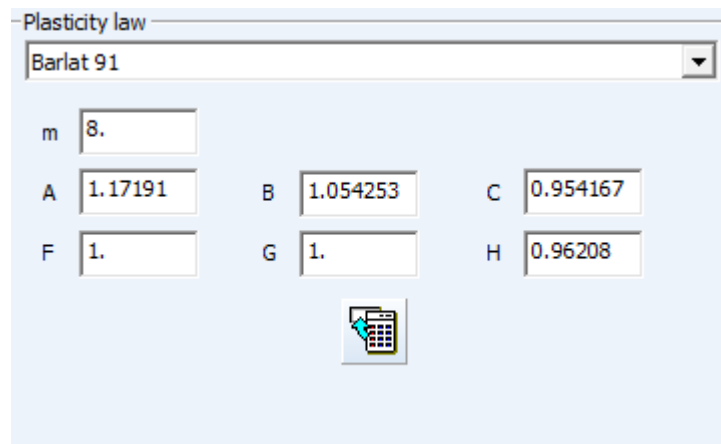


圖 3.4 A6061-T6 之 Barlat91 降伏準則參數建立

3.2 加工硬化準則之探討

材料受力過程中達到降伏點後便會開始產生塑性變形，也就是永久變形，一般金屬材料在此過程中會產生加工硬化的現象，材料強度會有上升的情形，如圖 3.5 所示。一般加工硬化準則可分為等向硬化、動態硬化準則及混合硬化準則，而由於前述文獻回顧已知考慮到材料包辛格效應之混合硬化準則較能準確地模擬分析回彈現象。首先先了解何謂包辛格效應，由於材料在歷經反覆拉伸與壓縮時會發生二次降

伏點下降的現象，換言之也就是說當材料試片拉伸到應力點 σ_f 後，隨即反向壓縮此時反向壓縮的二次降伏應力點 $|\sigma_r|$ 會比先前應力點 σ_f 低，即 $\sigma_f > |\sigma_r|$ ，如圖 3.6。此現象即為包辛格效應(Bauschinger effect)，在鋼材與鋁材上都有產生包辛格效應。而由於文獻[19] 指出考量到描述包辛格效應下的加工硬化準則，即 Yoshida 材料模型，其針對引伸成形模擬之準確性將高過於單純等向性準則之材料模型。因此為了後續關於鋁合金 A6061-T6 回彈模擬分析之準確性，將探討鋁合金 A6061-T6 之包辛格效應，以及求出描述包辛格效應之 Yoshida 材料模型的加工硬化準則。

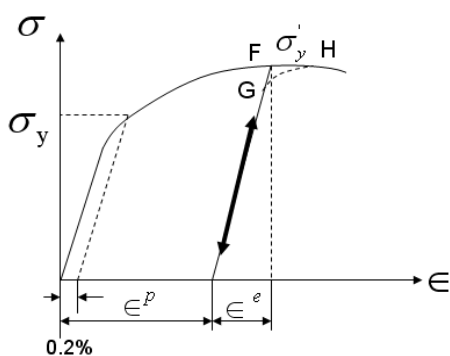


圖 3.5 材料受力加工硬化示意圖

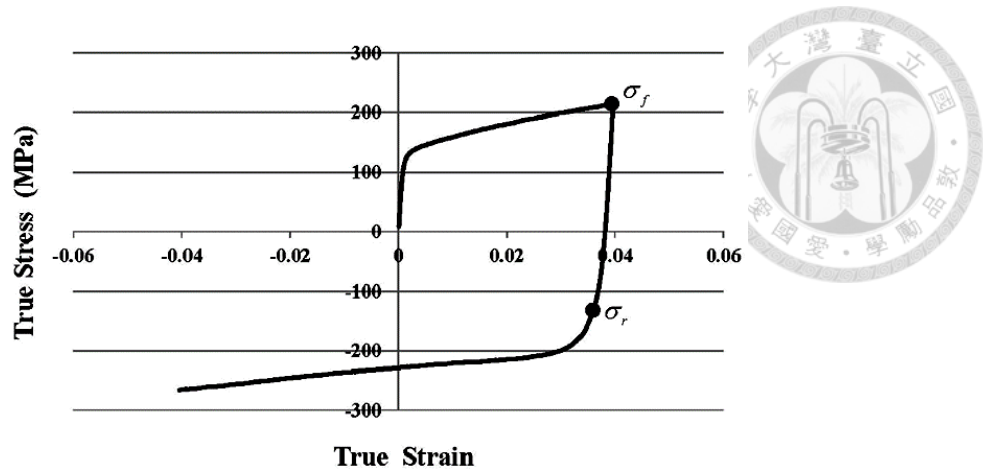


圖 3.6 材料包辛格效應圖[19]

3.3 Yoshida 材料模型之探討

3.2.1 Yoshida-Uemori model(Y-U model)之探討

Yoshida-Uemori model(Y-U model)[19][20]是屬於雙降伏面的硬化模式(two-surface modeling)，該材料模型同樣是屬於混合型硬化模式(mixed isotropic-kinematic hardening) 如圖 3.7 所示，混合型加工硬化準則結合了等向性加工硬化準則(isotropic hardening)以及動態加工硬化準則(kinematic hardening)，其降伏面形狀大小會改變，且降伏面中心也會移動，如圖 3.8 所示，而 Y-U model 是建立在 von Mises criterion 其降伏面方程式與邊界降伏方程，如(式 3.16)與(式 3.17)所示。

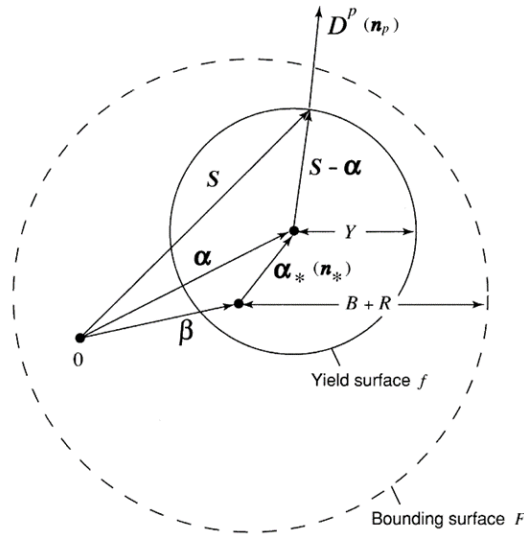


圖 3.7 雙降伏面示意圖

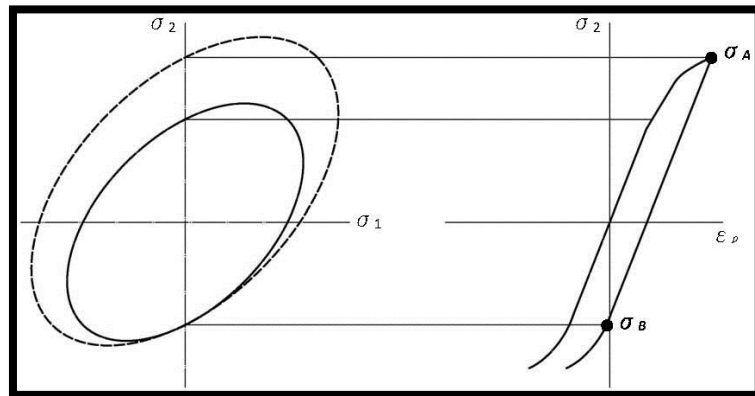


圖 3.8 混合型加工硬化準則

$$f = \frac{3}{2}(s - \alpha):(s - \alpha) - Y^2 = 0$$

(式 3.16)

$$F = \frac{3}{2}(s - \beta):(s - \beta) - (B + R)^2 = 0$$

(式 3.17)

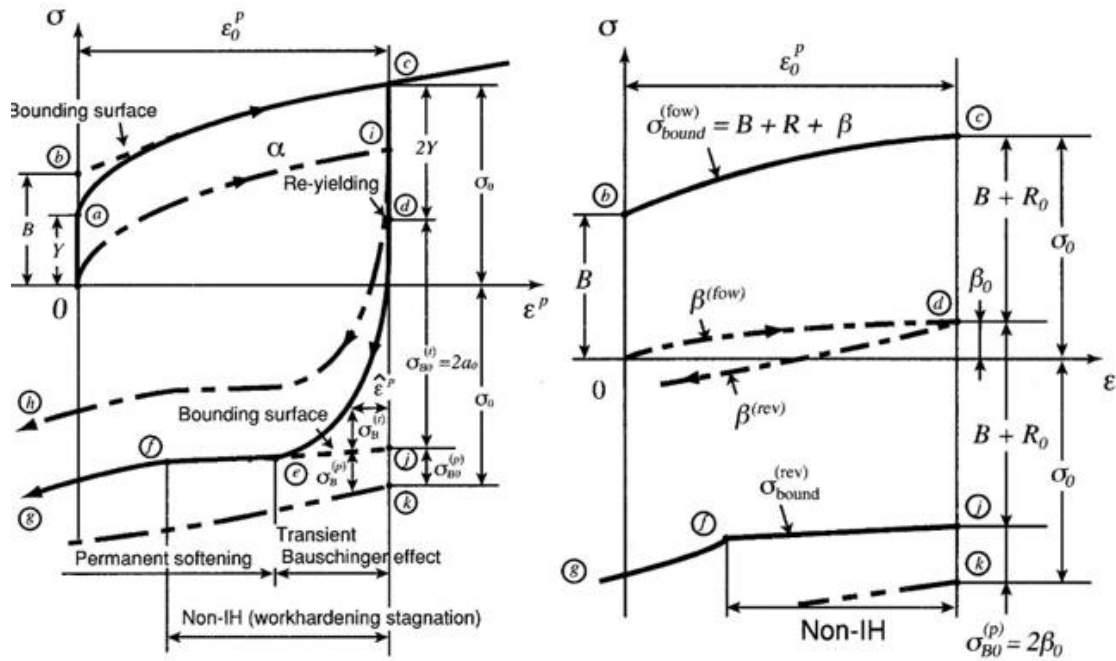


圖 3.9 降伏表面 f (左)與邊界降伏表面 F (右)[20]

(式 3.16)是定義在 Deviatoric stress space 中， s 為 Cauchy stress deviator， α 為 Backstress deviator 且 Y 為降伏面的半徑，(式 3.17)等向硬化降伏邊界其中 β 為邊界降伏表面的中心，而 B 跟 R 為最初降伏面大小。當材料受單軸向拉伸與壓縮產生塑性變形時，降伏面 f 會在邊界降伏面 F 內部移動，而在 Y-U model 中動態硬化降伏表面 f 是用來描述瞬間包辛格變形行為(Transient Bauschinger deformation characterized)包含二次降伏點提前發生與下個加工硬化急遽改變(瞬間軟化特性)，如圖 3.9 之 c-d-e 階段所示。

3.2.2 反覆拉壓試驗

上述 Yoshida 材料模型需進行拉伸-壓縮實驗以及實驗數據與有限元素軟體參數之銜接，方可求得 Yoshida 材料模型。因此本研究規劃進行板材拉伸-壓縮的實驗，其中機台使用 MTS810 拉伸試驗機，實驗首先以每秒 0.005mm 的速度進行試片拉伸，到達設定之應變時，將機台力量卸載，使試片彈性回復至力量歸零時，再反向加載進行試片壓縮，依此進行鋁合金板件之循環拉伸與壓縮試驗。為避免試片在壓縮階段發生挫曲，拉壓試驗使用設計的夾治具進行試片夾持，其中關於夾治具之設計參考文獻[21]的設計，沿用此夾治具於鋁合金拉壓試驗。圖 3.10 為試片之外型尺寸示意圖，另外圖 3.11 則為鋁合金 A6061-T6 試片置入夾具示意圖。

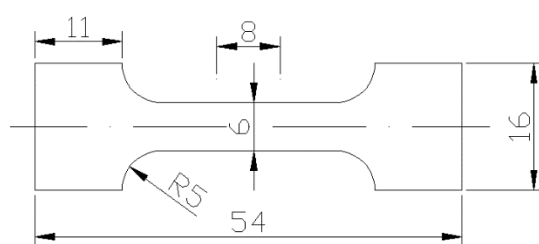


圖 3.10 拉壓試片之外型尺寸示意圖[21]

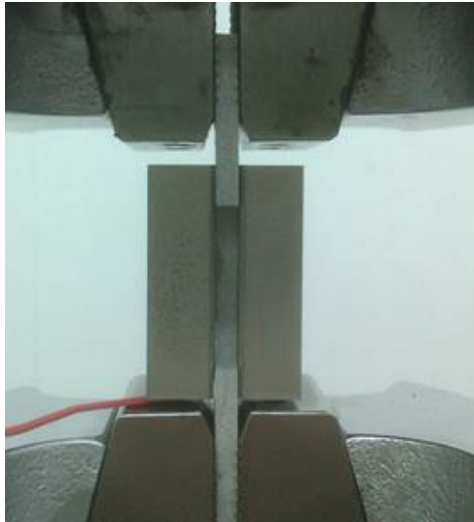


圖 3.11 鋁合金 A6061-T6 試片置入夾具示意圖

本論文後續針對鋁合金 A6061-T6 與 A6061-O 進行不同應變範圍拉壓試驗，探討鋁合金 A6061-T6 與 A6061-O 之包辛格效應，以及後續為了建立鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型，進行 2%~10% 應變範圍之拉壓試驗。

3.2.1.1 A6061-O 應變範圍 4% 與 8% 循環拉壓結果

圖 3.12 為鋁合金 A6061-O 在應變範圍 4% 與 8% 循環變形所呈現之應力應變曲線，A6061-O 在經過第一次 8% 循環加工後皆出現明顯加工硬化現象，而當進入第二次 8% 循環加工時其應力振幅即趨於穩態，此現象非常相似於 270 級軟鋼的循環加工現象，如圖 3.13 所示。

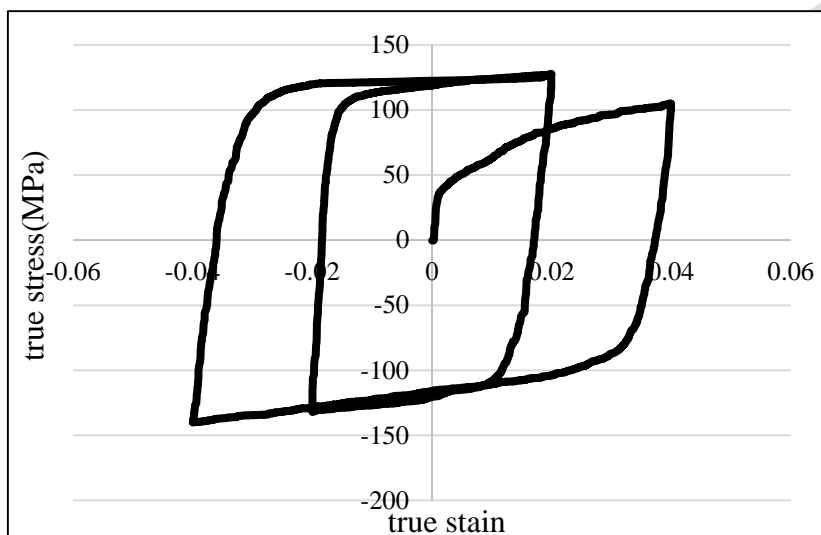


圖 3.12 A6061-O 應變範圍 4%與 8%循環變形之應力應變圖

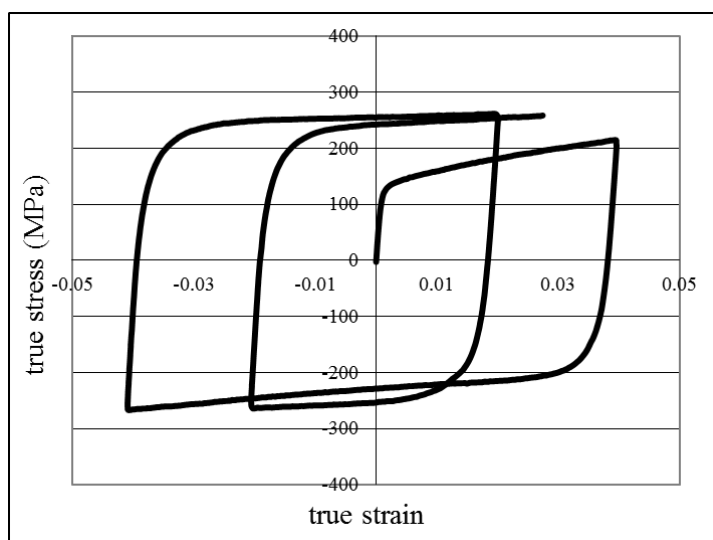


圖 3.13 270 級軟鋼應變範圍 4%與 8%循環變形之應力應變圖

3.2.1.2 A6061-O 應變範圍 0.02 多次循環拉壓結果

圖 3.14 則為鋁合金 A6061-O 進行 2% 循環拉壓之應力應變曲線，A6061-O 在經過第一次循環加工會出現些許加工硬化現象，其現象

在經過第二次循環加工約應變 4%之後，已幾乎沒有循環變形所造成的加工硬化現象，反而有輕微軟化現象。

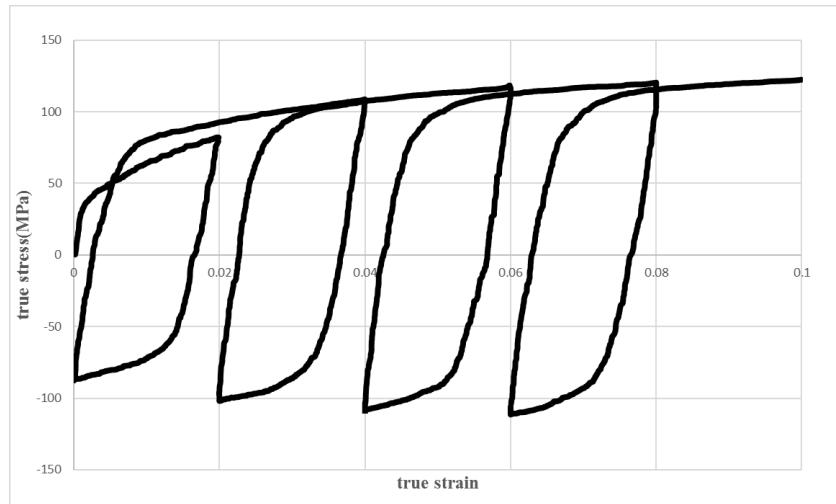


圖 3.14 鋁合金 A6061-O 應變範圍 2%循環變形之應力應變圖

3.2.1.3 A6061-T6 不同應變量之拉壓結果

圖 3.15~圖 3.19 為鋁合金 A6061-T6 不同應變(2%~10%)之拉壓結果，為了確認不同拉壓範圍之試驗準確性，將鋁合金 A6061-T6 單軸拉伸曲線與各拉壓範圍之曲線一起比較，由圖可看出拉壓曲線在第一階段拉伸皆與單軸拉伸曲線貼近的。而由圖可知鋁合金 A6061-T6 在第二次拉伸階段有些許的硬化現象，但隨著 10%大應變範圍此硬化現象不明顯而趨於穩態。後續將探討鋁合金 A6061-T6 各拉壓範圍之包辛格指數及建立鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型。

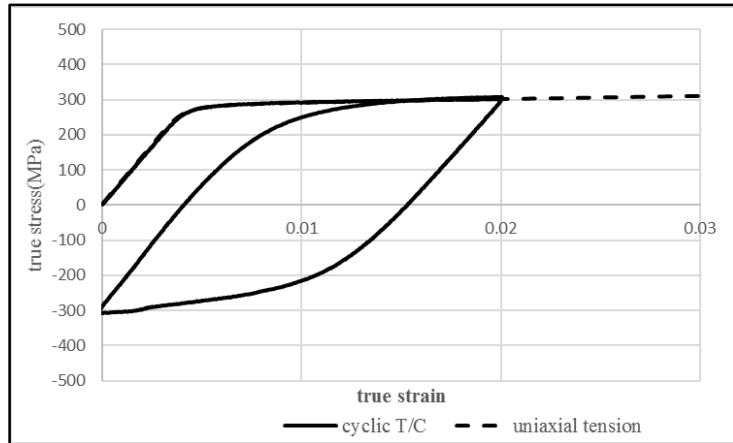


圖 3. 15 A6061-T6 應變範圍 0.02 拉壓結果

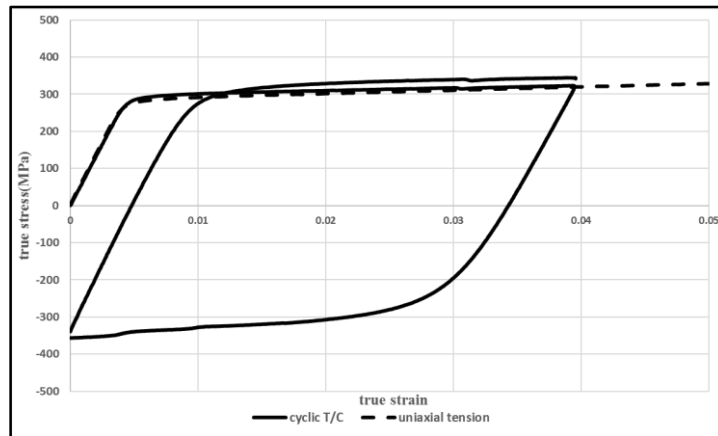


圖 3. 16 A6061-T6 應變範圍 0.04 拉壓結果

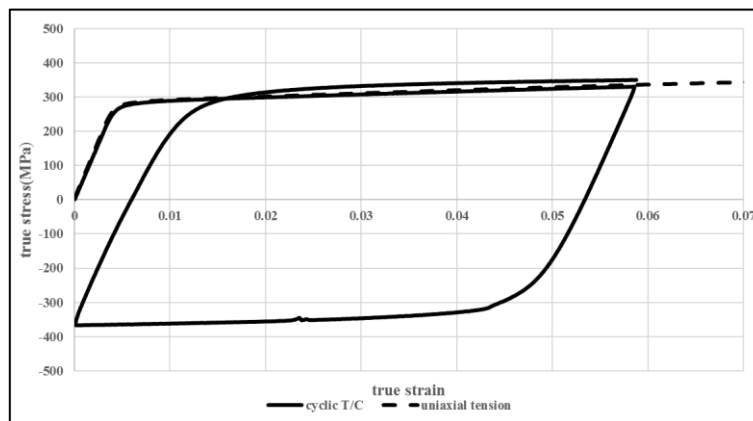


圖 3. 17 A6061-T6 應變範圍 0.06 拉壓結果

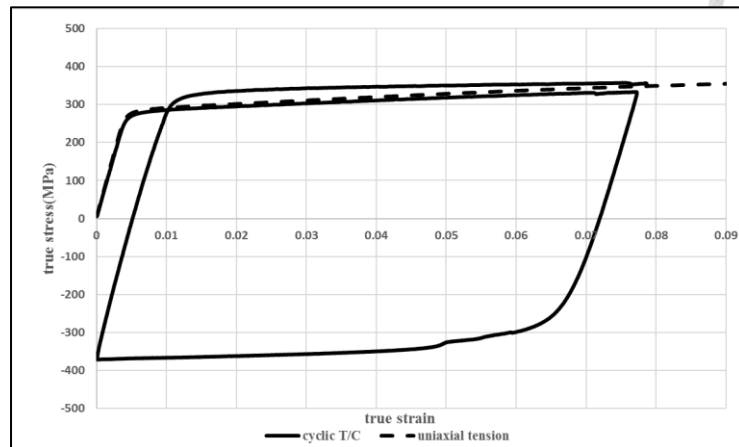


圖 3.18 A6061-T6 應變範圍 0.08 拉壓結果

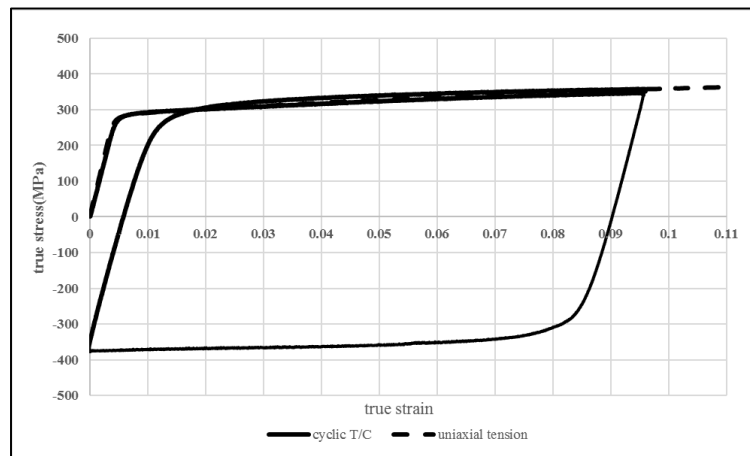


圖 3.19 圖 A6061-T6 應變範圍 0.1 拉壓結果

3.2.3 A6061-T6 包辛格效應探討

本論文選用鋁合金 A6061-T6 作為探討不同鋼種與鋁合金在反覆拉伸與壓縮變形時所產生的包辛格現象比較，因此本研究實驗方法是使用 MTS 810 材料拉伸實驗機台將材料拉伸至塑性區之應變量後，

將其負載(Load)洩壓至零使其材料產生彈性恢復後再施予反向壓縮，即完成一個包辛格效應的過程如圖 3.20，從圖中可明顯看出瞬間包辛格效應(Transient Bauschinger effect)(A 處)、永久軟化(Permanent softening)(Bp 處)、加工遲滯(Workhardening stagnation)(C 處)及二次降伏點(re-yielding)(Y)下降等材料包辛格特性。

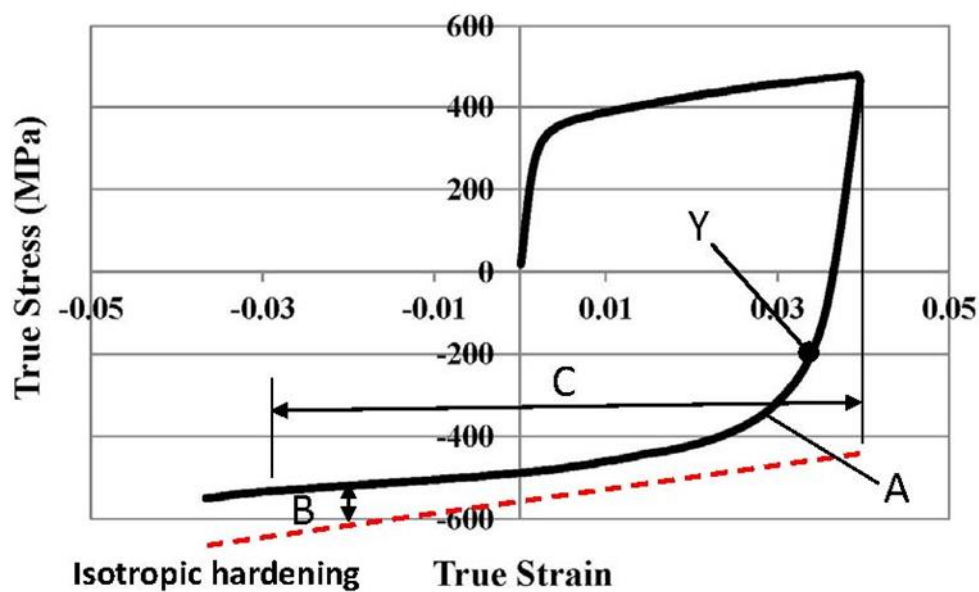


圖 3.20 材料包辛格效應特性圖[19]

而為探討 A6061-T6 與鋼材之間材料包辛格效應之差異，故上述實驗已完成 A6061-T6 在不同應變範圍(2%~10%)下之拉伸與壓縮實驗下，另外引用蔡恆光[21]之 270 鋼材與先進高強度鋼 590R 數據進行比較鋁材與鋼材的包辛格效應差別。其中量測降伏應力大小的改變量即所謂的包辛格變化量(Bauschinger ratio)(式 3.18)，可將材料在包

辛格效應下二次降伏點的變化予以量化。而鋁合金 A6061-T6 以及 270 鋼材與先進高強度鋼 590R 之量化 Bauschinger ratio 如圖 3.21 所示。



$$\text{Bauschinger ratio} = \frac{\sigma_f - \sigma_r}{2\sigma_f} \quad (\text{式 3.18})$$

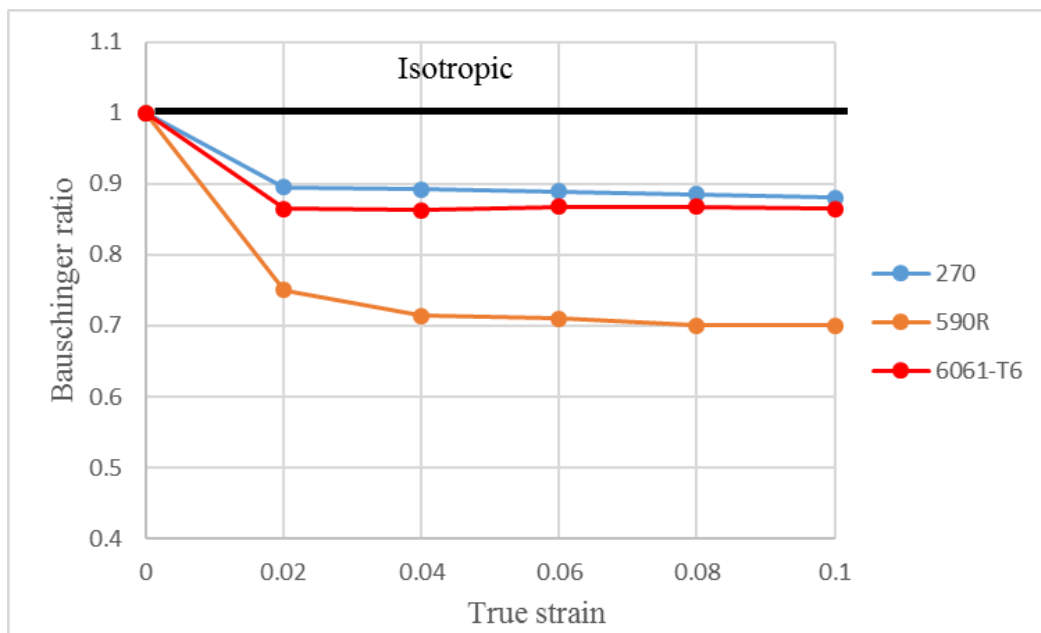


圖 3.21 不同應變振幅包辛格效應量化圖。

在 (式 3.18) 中若 $\sigma_r = -\sigma_f$ 其 Bauschinger ratio = 1 此為等向性 (Isotropic)，若 Bauschinger ratio 越小，即反向壓縮時的二次降伏應力 (σ_f) 其量值越小於拉伸到塑性區之降伏應力 (σ_r)，則表示材料包辛格效應越大，反之 Bauschinger ratio 若越大則表示材料包辛格效應越小。從圖 3.21 中可以明顯看出一般 270 鋼材其 Bauschinger ratio 逐漸收斂到 0.88，590R 逐漸收斂到 0.7，而本研究材料鋁合金 A6061-T6 其

Bauschinger ratio 逐漸收斂到 0.86，趨勢接近一般 270 鋼材。另外圖 3.22 為鋁合金 A6061-T6 之包辛格效應反轉到正向圖。而在瞬間包辛格軟化現象從圖 3.23 中可明顯看出鋁合金 A6061-T6 其瞬間軟化趨勢也是接近一般 270 鋼材。

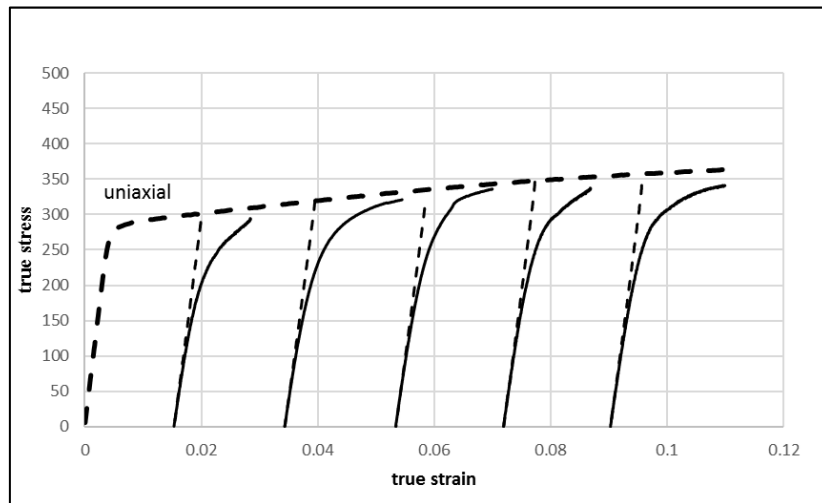


圖 3.22 鋁合金 A6061-T6 不同應變包辛格效應圖

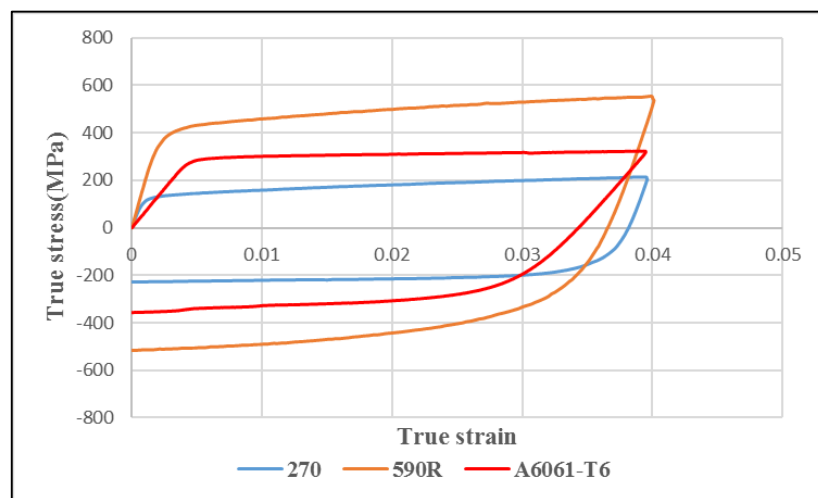


圖 3.23 不同材料之瞬間軟化圖



3.2.4 Yoshida 材料模型之參數建立

Y-U 材料模型內包含十個材料參數，分別為 Y 、 $C1$ 、 $C2$ 、 B 、 R_{sat} 、 b 、 m 、 h 、 E_a 及 ζ 等參數。其中， Y 為降伏應力， R_{sat} 代表邊界等向硬化穩態參數值， m 代表等向硬化的速率材料參數， b 代表邊界動態硬化穩態值， B 代表初始邊界的降伏參數值， $C2$ 代表瞬間包辛格效應下動態硬化速率參數值， h 代表限制非等向硬化區域參數值， E_a 為當應變無窮大下之楊氏係數的穩態參數值， ζ 為楊氏係數收斂速度的材料參數值。Y-U model 中將材料參數分成三個階段，各自擷取描述該線段之材料參數。第一階段為拉伸到塑性區域之階段，此部份可分別求出材料參數 Y 、 B 、 $(R_{sat}+b)$ 和 m ；第二階段為卸載後彈性回復階段，此部份可分別求出材料參數 E_a 與 ζ ；第三階段為材料進行反方向壓縮階段，此部份可求出材料參數 b 與 $C2$ 。最後 h 需要透過模擬與實驗比對，修正其值以滿足材料之加工遲滯現象。本論文在此節介紹針對鋁合金 A6061-T6 其各階段參數之求法，以及建立鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型參數。

第一階段拉伸過程中，首先求出初始楊氏係數 E_0 ，利用初始楊氏係數之斜線，向右偏移應變量 0.002，即可求出降伏應力 Y 。接著將拉伸過程之實驗數據配合 Y-U model 理論方程式(式 3.19)，透過曲線擬合(Fitting)的方法可求出 B 、 $(R_{sat}+b)$ 和 m 。由圖 3.24 為鋁合金

A6061-T6 在第一階段拉伸圖以及透過曲線擬合求出 B、(R_{sat}+b)和 m

如表 3.7



$$\sigma_{bound}^{(fow)} = B + R + \beta = B + (R_{sat} + b)(1 - e^{-m\varepsilon^p}) \quad (\text{式 } 3.19)$$

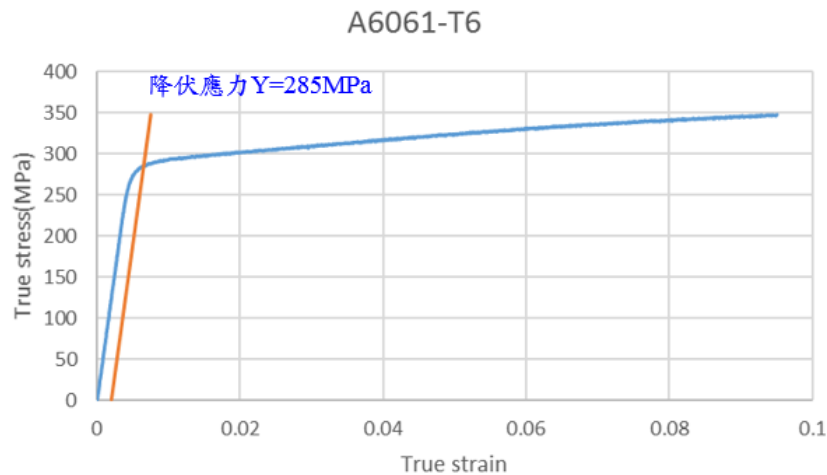


圖 3.24 鋁合金 A6061-T6 在第一階段拉伸圖

表 3.4 A6061-T6 第一階段拉伸之之 Yoshida 材料模型參數

| | |
|-----------------------------|-----|
| Y(MPa) | 285 |
| B(MPa) | 289 |
| (R _{sat} +b) (MPa) | 101 |
| m | 9.8 |

第二階段為卸載後彈性回復階段，由文獻[19]知材料彈性恢復過程不會沿線性彈性恢復，而屬於非線性曲線之彈性回復。文獻[19]中提出將此卸載曲線依應力分成四等份，分別為：(1) $0.75\sigma_0 \leq \sigma \leq 0.95\sigma_0$ ，

(2) $0.50\sigma_0 \leq \sigma \leq 0.95\sigma_0$, (3) $0.25\sigma_0 \leq \sigma \leq 0.95\sigma_0$, (4) $0 \leq \sigma \leq 0.95\sigma_0$,

如圖 3.25 所示。由於在轉折點(σ_0)時，其應力應變曲線呈極度非線性狀態，如圖 3.26，故從 $0.95\sigma_0$ 開始取數值。

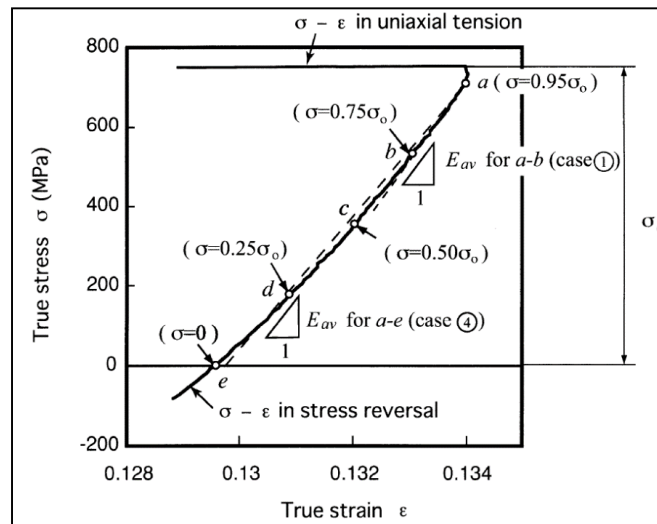


圖 3.25 卸載時楊氏係數應力應變曲線選取範圍示意圖[19]

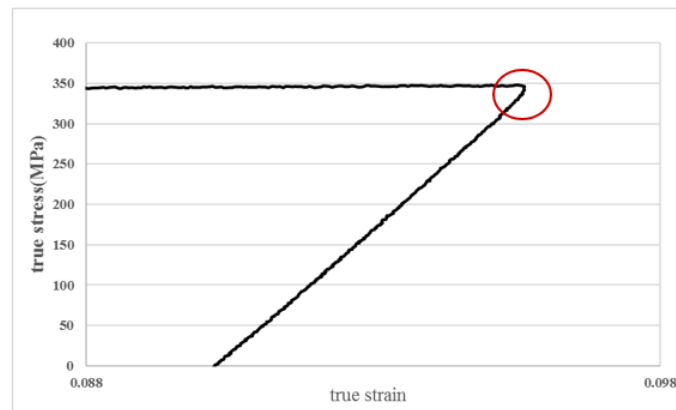


圖 3.26 A6061-T6 卸載時轉折點選取範圍之示意圖

因取不同應力範圍將得到不同之楊氏係數的穩態參數值 E_a 與楊氏係數收斂速度參數值 ξ ，故本研究針對不同應變範圍之實驗數據各別擷取 4 組不相同應力範圍，如圖 3.27，並計算出各組楊氏係數的

穩態參數值 E_a 與楊氏係數收斂速度參數值 ξ ，進而探討鋁合金 A6061-T6 準確之卸載階段回彈路徑。首先將不同應變範圍卸載時擷取之數據相同應力範圍下再透過理論方程式(式 3.20)進行擬合(Curve Fitting)將可得到該組應力範圍下之楊氏係數的穩態參數值 E_a 與楊氏係數收斂速度參數值 ξ ，再依照不同應力範圍進行此擬合步驟將可得到 4 組 E_a 與 ξ 值。

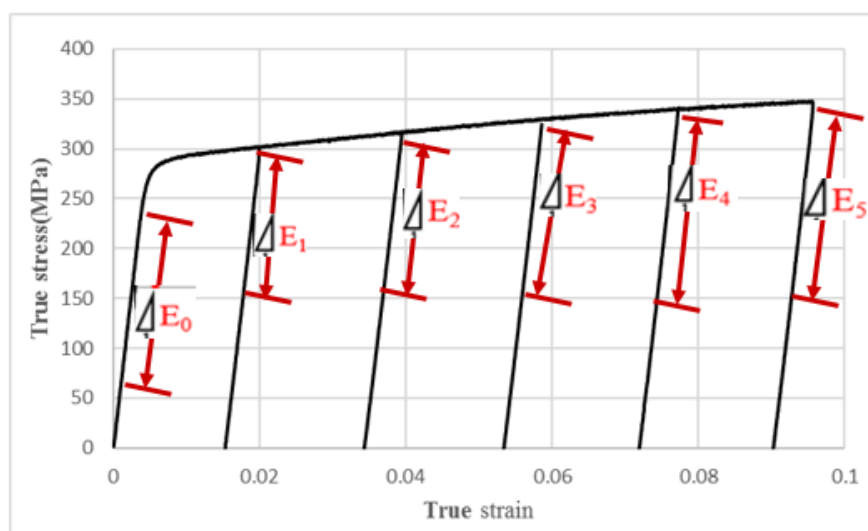


圖 3.27 鋁合金 A6061-T6 不同應變範圍擷取卸載時楊氏係數示意圖

$$E_{av} = E_0 - (E_0 - E_a)[1 - e^{-\xi \bar{\epsilon}_p}] \quad (\text{式 3.20})$$

圖 3.28 為鋁合金 A6061-T6 不同應力範圍卸載階段之楊氏係數，由此圖可得知，在應變達到 8% 時，各段之 E_{av} 開始趨於收斂，如表 3.8 所示。另外在圖 3.29 中可觀察 ξ 收斂於 35，故取應變為 8% 之卸

載曲線。其四段應力範圍之 E_a 值可分別求得，最後再探討適用於鋁合金 A6061-T6 不同卸載階段應力範圍。而決定適用於鋁合金 A6061-T6 之卸載階段應力範圍將取決於理論方程式(式 3.20)線性回復與實驗曲線之非線性回復於應力零點位置之間差異。圖 3.30 為鋁合金 A6061-T6 於應變範圍 8% 不同應力擷取範圍之 E_{ave} 回歸點比較。由圖 3.30 可看出以應力範圍 $0.50\sigma_0 \leq \sigma \leq 0.95\sigma_0$ 為較適合鋁合金 A6061-T6 應力擷取範圍。以下將列出鋁合金 A6061-T6 第二階段卸載區間之 Yoshida 材料模型參數，如表 3.9

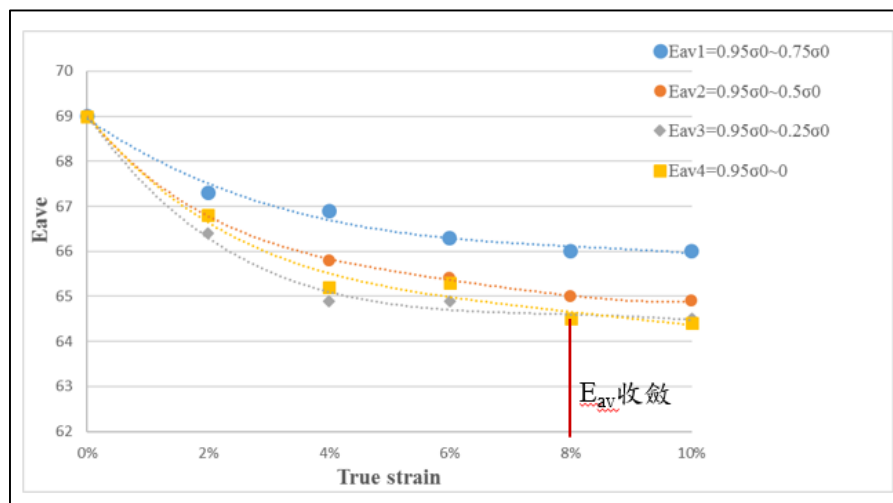


圖 3.28 鋁合金 A6061-T6 卸載階段之楊氏係數分布曲線

表 3.5 鋁合金 A6061-T6 應變範圍 8% 中四段區域之 E_{av} 值

| Eav1 | Eav2 | Eav3 | Eav4 |
|------|------|------|------|
| 66.2 | 65.3 | 64.5 | 64.4 |

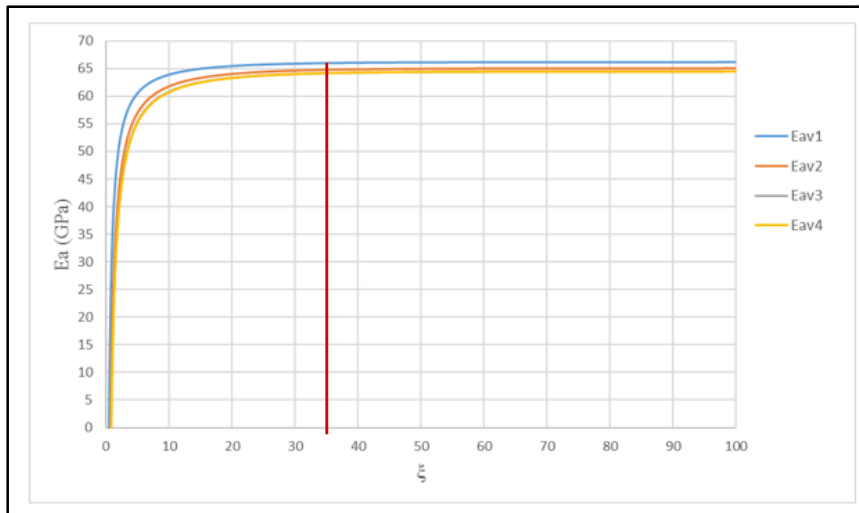


圖 3.29 鋁合金 A6061-T6 四段區域 Ea、 ξ 收斂情形

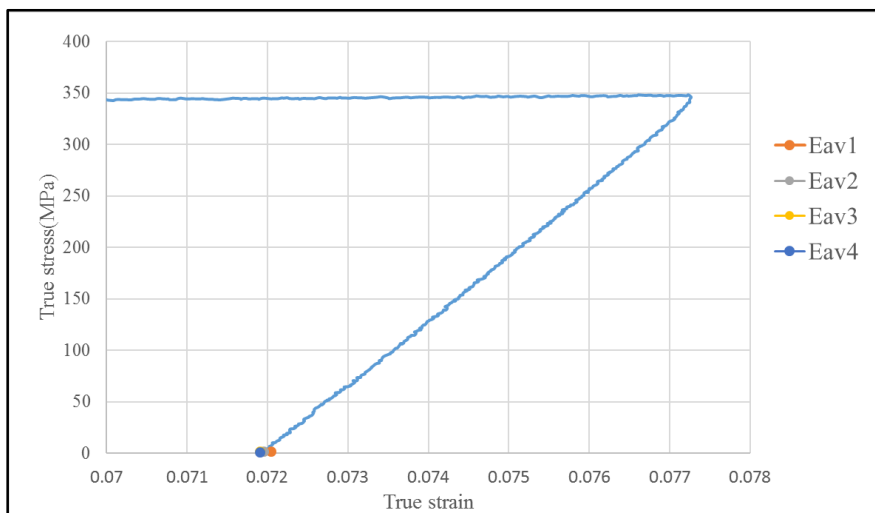


圖 3.30 A6061-T6 8%不同應力擷取範圍之 Eave 回歸點比較

表 3.6 A6061-T6 第二階段卸載之 Yoshida 材料模型參數

| | |
|----------|----|
| Ea (GPa) | 65 |
| ξ | 35 |

在第三階段板材反向壓縮時，可由圖 3.31 中材料曲線延伸反向塑性變形邊界 $\sigma_{bound}^{(rev)}$ ，即可求得 $\sigma_{B0}^{(t)}$ ，故可知應力差值 $\sigma_{B0}^{(p)}$ 。此時，搭

配理論方程式(式 3. 21)計算出參數 b，再將階段拉伸過程中求出之 $R_{sat}+b$ 代入 b 值，即可反向求出 R_{sat} 。接著針對 C2 必須透過繪出不同 C 值情形，去選取適當之 C 值 如圖 3.32 為由實驗數據值取得 $\sigma_B^{(t)}/\sigma_{B0}^{(t)}$ 與反向塑性應變 ε^p 之關係，需藉此圖與實驗比較以取得適當之材料參數 C2。而如圖 3.33 為鋁合金 A6061-T6 之 $\sigma_B^{(t)}/\sigma_{B0}^{(t)}$ 與反向塑性應變 ε^p 之關係圖，其中可以看出取材料參數 $C2=200$ 為較適合之參數值。以下將列出鋁合金 A6061-T6 第三階段壓縮區間之 Yoshida 材料模型參數，如表 3.10

$$\sigma_{B0}^{(p)} = 2\beta_0 = 2b \left(1 + e^{-m\varepsilon_0^p} \right)$$

即
$$b = \frac{\beta_0}{\left(1 + e^{-m\varepsilon_0^p} \right)}$$

(式 3. 21)

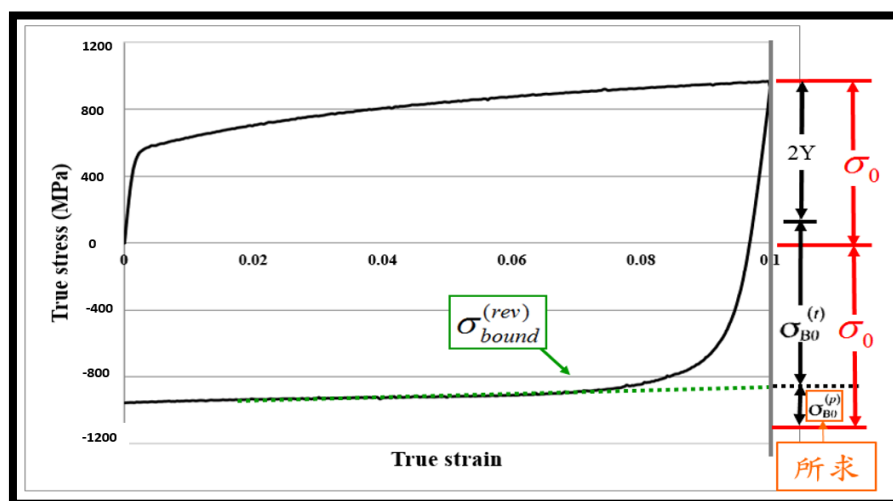


圖 3.31 $\sigma_{B0}^{(p)}$ 位置示意圖

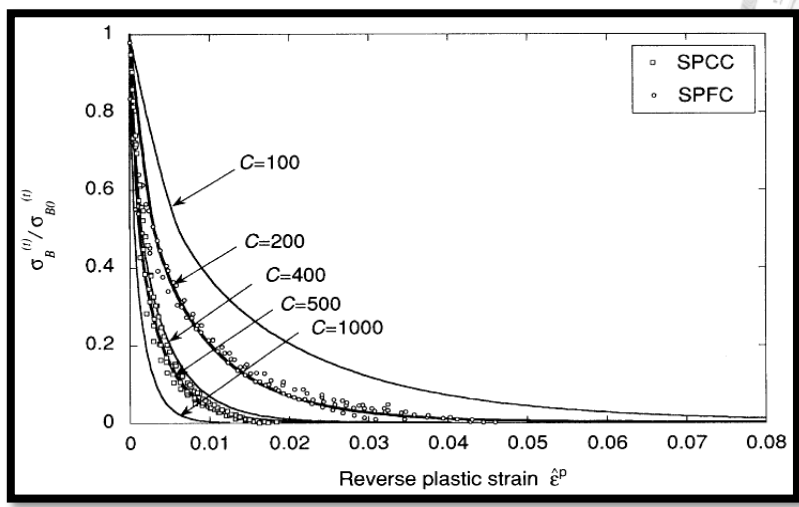
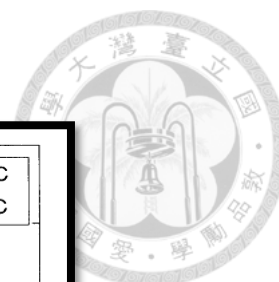


圖 3.32 不同材料參數 C_2 之示意圖[20]

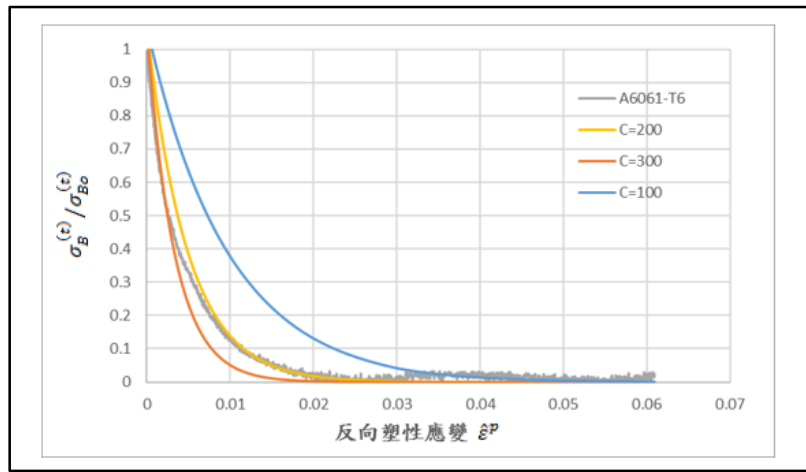


圖 3.33 鋁合金 A6061-T6 之 $\sigma_B^{(t)}/\sigma_{B0}^{(t)}$ 與反向塑性應變 $\hat{\epsilon}^p$ 之關係

表 3.7 A6061-T6 第三階段壓縮之 Yoshida 材料模型參數

| | |
|-----------|-----|
| b(MPa) | 2.2 |
| Rsat(MPa) | 98 |
| C2 | 200 |

最後在 C_1 以及 h 部份，在後續修改之模型中 Yoshida[20]中提出 (式 3.22)，將 C 分為 C_1 以及 C_2 ，其影響情形如圖 3.34 所示；至於非等向硬化區域參數 h 值，目前 h 值需透過模擬壓縮-拉伸試驗模擬去決定適合鋁合金 A6061-T6 之 h 值。其中 h 值的範圍為 $0 \leq h \leq 1$ 。因此，若 h 值越小，即表示反向加工硬化遲滯範圍越小，故導致加工遲滯現象越不明顯；反之若 h 值越大，即表示反向加工硬化遲滯範圍越大，故導致加工遲滯現象越明顯，如圖 3.35 所示。而在此選取 $h=0.4$ 為較適合鋁合金 A6061-T6 之非等向硬化區域參數。

$$C = C_1 \text{ when } \text{Max}(\bar{\alpha}_*) < B - Y,$$

$$C = C_2, (C_1 > C_2), \text{ otherwise} \quad (\text{式 } 3.22)$$

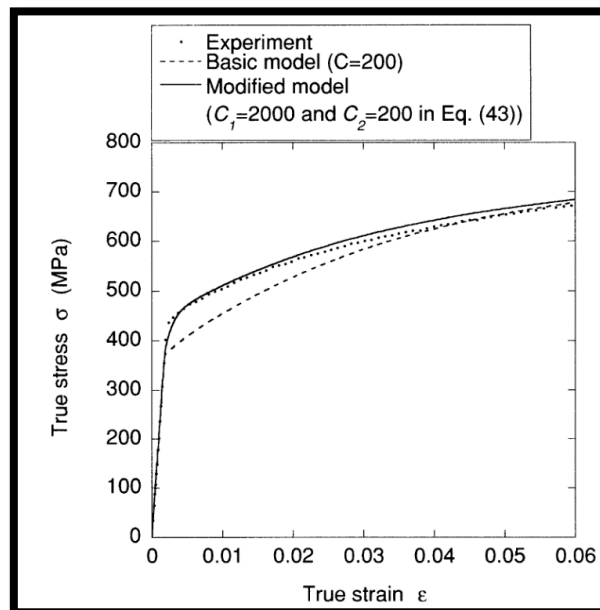


圖 3.34 不同 C_1 值之影響[20]

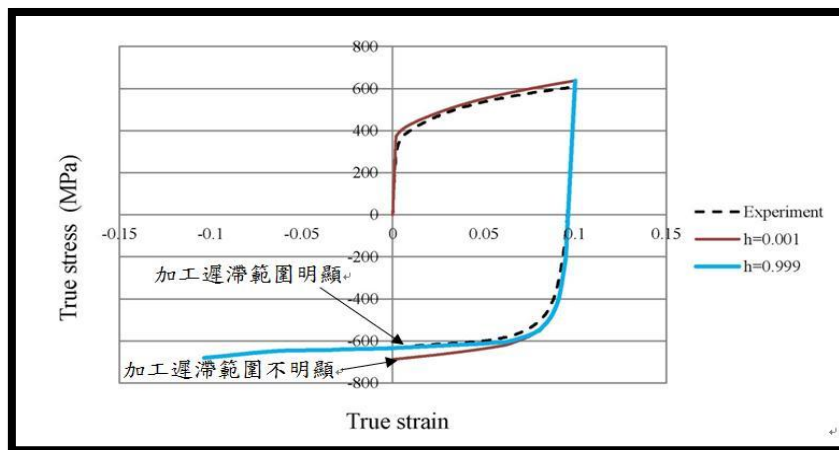


圖 3.35 不同 h 值之影響[21]

最後整理鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型參數，如表 3.11。為驗證本論文求得鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型參數之準確性，透過模擬拉伸壓縮試驗所得到之應力應變曲線與實際實驗之材料曲線進行比對，如圖 3.36。由圖 3.36 可證實本論文所建立之鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型參數與實驗結果相當吻合。後續第四章將使用此 Yoshida 材料模型與等向性材料模型作回彈模擬之比較，再透過實驗驗證以確認 Yoshida 材料模型能否較等向性材料模型更準確地描述鋁合金 A6061-T6 的回彈現象。

表 3.8 鋁合金 A6061-T6 之 Yoshida 材料模型參數

| | Y (MPa) | C_1 | C_2 | B (MPa) | Rsat (MPa) | b (MPa) | m | h | E_a (GPa) | ξ |
|----------|------------|-------|-------|------------|---------------|------------|-----|-----|----------------|-------|
| A6061-T6 | 285 | 500 | 200 | 289 | 98 | 2.2 | 9.8 | 0.4 | 65 | 35 |

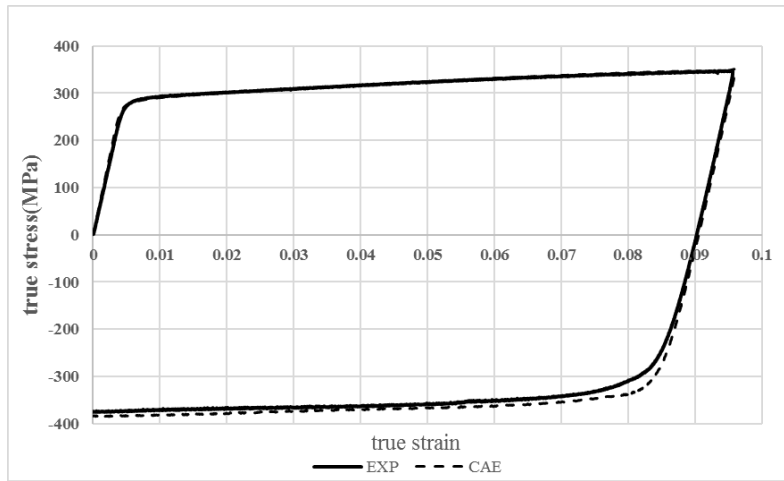


圖 3. 36 A6061-T6 之模擬拉壓與實驗數據之應力應變比對圖

第四章 鋁合金回彈模擬分析與實驗探討

本章節將針對鋁合金板件沖壓後側壁外開與側壁捲曲現象進行探討，首先將引用蘇昱竹[39] V 型彎曲成形分析探討側壁外開現象、接著針對 U 形帽狀引伸成形為引用姚順偉[29] U 形帽狀引伸成形分析方法。材料方面則選擇 A6061-O 與 A6061-T6；並以 Hill 48 降伏準則與 Barlat 降伏準則搭配等向硬化準則與混合硬化準則(Yoshida 材料模型)進行四種材料模型之回彈分析模擬，並建立適合鋁合金之 CAE 模擬分析技術以及後續搭配實驗結果進行驗證。

4.1 回彈類型簡介

材料的回彈行為是板金沖壓成形中必定遭遇的一個問題，然而為了解決沖壓成形所造成的回彈問題，必須先了解最基本形狀的回彈特性。一般來說回彈的類型可分為三種，一種為側壁外開，一種為側壁捲曲，一種為扭曲現象，分別如圖 4.1、圖 4.2、圖 4.3 所示。

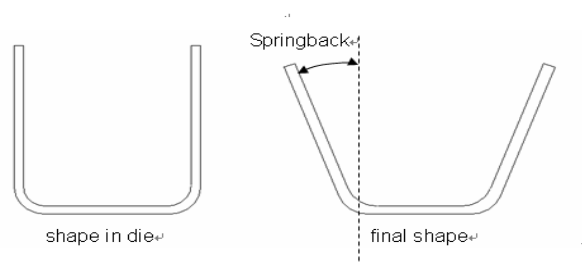


圖 4.1 側壁外開示意圖

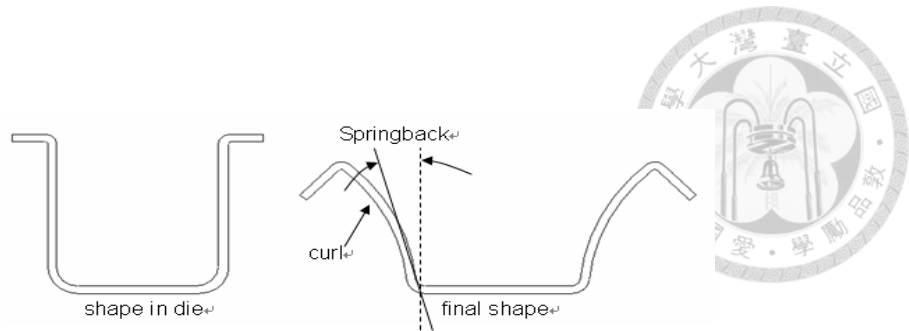


圖 4.2 側壁捲曲示意圖

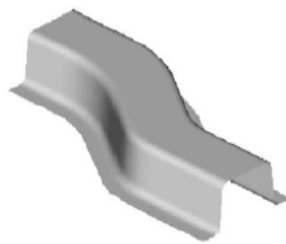


圖 4.3 扭曲現象示意圖

針對上述回彈現象，本研究會依續探討側壁外開與側壁捲曲以瞭解基本的回彈現象，對於這基本的回彈現象，根據文獻可以得知有基本試驗來觀察回彈現象。實驗分別為 V 型彎曲實驗、U 形帽狀成形實驗，其中 V 型彎曲實驗相當於業界所謂之彎曲成形，最主要的目的是用來測試側壁外開的現象，如附圖 4.4、圖 4.5，是由一組彎曲角度為 90 度之母模與沖頭所構成，其作動方式為將實驗板材置放於母模上，由沖頭往下至成形完成。

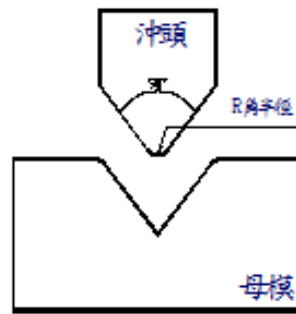


圖 4.4 V 型彎曲實驗模具示意圖



圖 4.5 V 型彎曲實驗模具照片

而 U 形帽狀成形實驗則相當於業界所謂之引伸成形，主要係為測試側壁捲曲的現象，如附圖 4.6 與圖 4.7，是由一組沖頭、母模與壓料板所構成，其作動方式為壓料板往下移動直到夾住板材，然後沖頭下壓到底成形為 U 形帽狀。此實驗與彎曲實驗不同之處為壓料板提供夾住板材之力量，故成形時，U 形帽狀側壁最主要為板材流過母模圓角而成形。

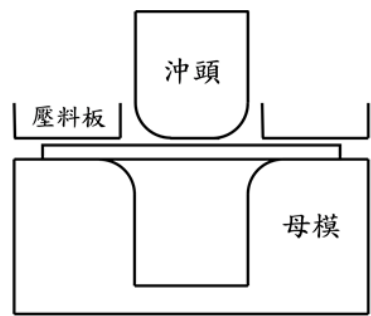


圖 4.6 U 形帽狀成形實驗模具示意圖



圖 4.7 U 形帽狀成形實驗模具照片

4.2 V 型彎曲成形分析

V 型彎曲成形分析最主要的目的是用來測試側壁外開的現象，參考蘇昱竹[39] V 型彎曲成形分析得到的結論為沖頭圓角是影響側壁外開的主要參數，因此本節預計探討不同沖頭圓角下鋁合金 A6061 產生之側壁外開現象。

而關於回彈量的定義為退模前與退模後的角度差異，且板材往外

張開，角度大於 90 度，為正回彈；板材往內退縮，角度小於 90 度，為負回彈。回彈角度則為成形後角度減去 90 度，如圖 4.8 所示。

回彈量=回彈後的角度-90 度

回彈量大於 0 稱為正回彈（板件外開）

回彈量小於 0 稱為負回彈（板件內彎）



圖 4.8 回彈角度示意圖

4.2.1 V 型彎曲成形模擬分析

首先以最小沖頭圓角 R1 之分析模型進行收斂性分析，材料強度使用 A6061-T6，降伏準則為 Barlat91，加工硬化準則為 Y-U 模型，其收斂性結果如表 4.2

表 4.1 V 型彎曲成形分析收斂性結果

| 模擬參數 | 收斂性測試結果 |
|-----------------|---------|
| 板材最大自適應網格細化度(級) | 3 |
| 板材初始網格大小(mm) | 1 |
| 模面網格大小(mm) | 10 |
| 模面圓角網格尺寸(度/個) | 7.5 |
| 厚度方向積分點數目(個) | 5 |
| 沖壓速度(m/s) | 5 |

如圖 4.9 為 V 型彎曲模擬回彈分析模型，其作動方式為板材置放於母模上，由沖頭往下至成形完成，沖程為 20mm，最後經過回彈模擬，量測回彈後之側壁外開角度，以作為回彈量之標準。本節會使用第三章所建立之鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 材料模型進行 V 型彎曲模擬回彈分析，透過各材料模型之回彈模擬以及下節之實際實驗進行對照，以討論各材料模型的預測回彈之準確性。

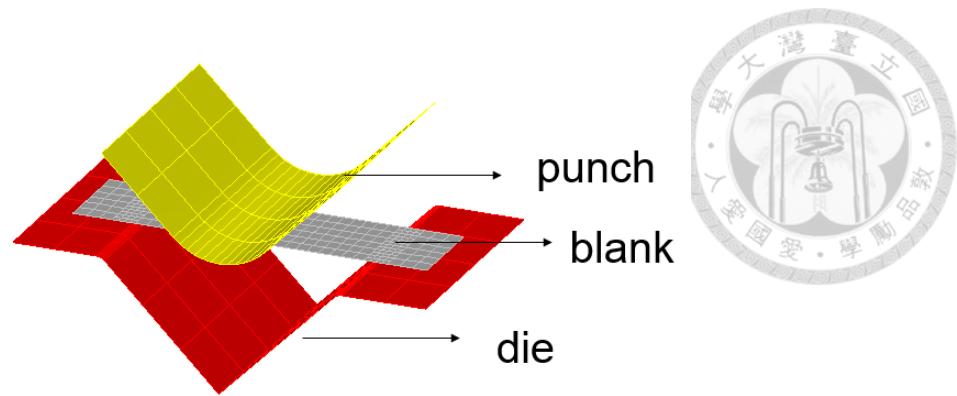


圖 4.9 V 型彎曲模擬分析模型

4.2.2 V 型彎曲成形實驗

4.2.1.1 實驗平台架設與實驗流程

本論文所使用之 V 型彎曲成形為建立在實驗室材料拉伸機 (MTS810) 之平台上，其中模具設計搭配介面熱傳實驗中所使用的通水路之冷卻塊，將可進行之實驗為板材之各溫度區間之冷、溫、熱成形，其中各模具部件為圖 4.10 所示。後續將整套模具架設在材料拉伸機(MTS810)進行 V 型彎曲成形，如圖 4.11。

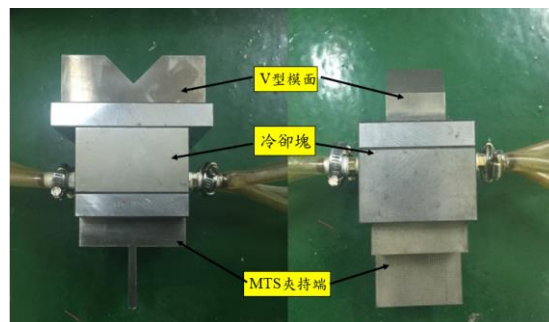


圖 4.10 V 型彎曲實驗模具

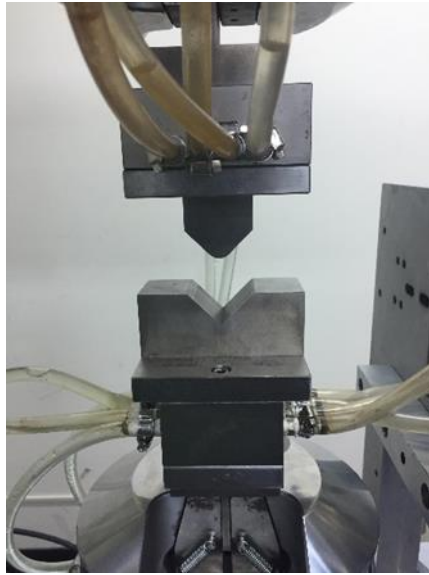


圖 4.11 V 型彎曲實驗模具架設於材料拉伸機

本論文於此節將進行 V 型彎曲成形實驗，用來探討不同沖頭圓角對應鋁合金板材回彈現象，同時與前節的回彈分析模擬進行實驗驗證比較。預計比較 A6061-T6、A6061-O（厚度 2mm）兩者回彈趨勢以及差異量，如圖 4.12 為 V 型彎曲之實驗過程。實驗結束後，將實驗板件成品噴漆以利使用 GOM ATOS 進行逆向掃描，如附圖 4.13 及圖 4.14，最後將掃描檔案匯入 GOM Inspect 分析軟體，進行回彈角度之量測，如附圖 4.15，將可整理出 A6061-T6、A6061-O 對應之不同沖頭圓角之回彈變化量。

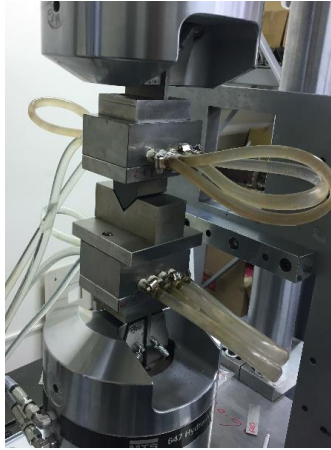


圖 4.12 V 型彎曲實驗過程



圖 4.13 V 型彎曲實驗板件成品

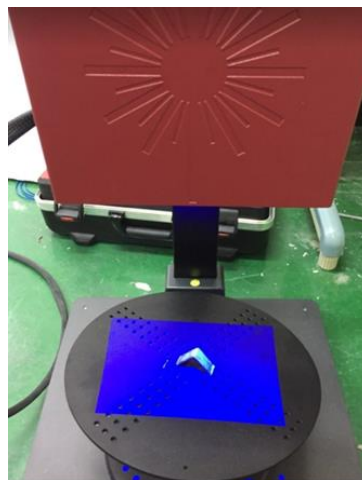


圖 4.14 GOM ATOS 逆向掃描

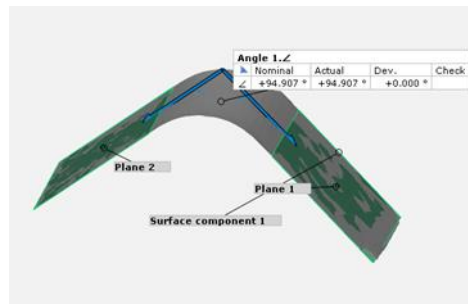


圖 4.15 GOM Inspect 回彈分析

4.2.1.2 實驗結果探討與模擬驗證

如附圖 4.16 為 A6061-O 之 V 型彎曲成形結果，由於 A6061-O 強度偏低，無法輕易看出側壁外開之回彈現象，比較 A6061-O 與 A6061-T6 在相同沖頭圓角之側壁外開現象，如附圖 4.17，更能看出 A6061-T6 與 A6061-O 側壁外開之差異。而由第二章求出之 A6061-O 與 A6061-T6 材料性質可知，T6 材之強度明顯高於 O 材，因此由圖 4.17 可知，在各沖頭圓角之 V 型彎曲成形結果，A6061-T6 其側壁外開角度較 O 材大，外開角度也隨著沖頭圓角增加跟著增大，符合蘇昱竹 [39] 的 V 型彎曲成形趨勢。在模擬驗證方面，針對沖頭圓角為 R11 的 V 型彎曲成形進行分析，選用 Hill48 與 Barlat91 搭配等向性準則與 Yoshida 模型共四種材料模型，由圖 4.19 與圖 4.20 可得知，各材料模型所預測之側壁外開角度皆相當接近。



圖 4. 16 A6061-O 之 V 型彎曲成形結果

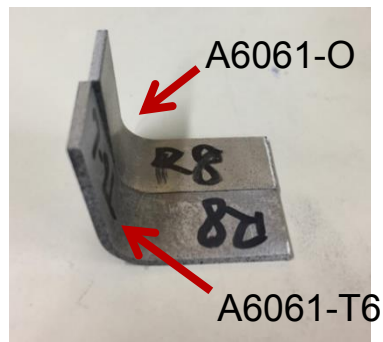


圖 4. 17 A6061-O 與 A6061-T6 之回彈差異結果

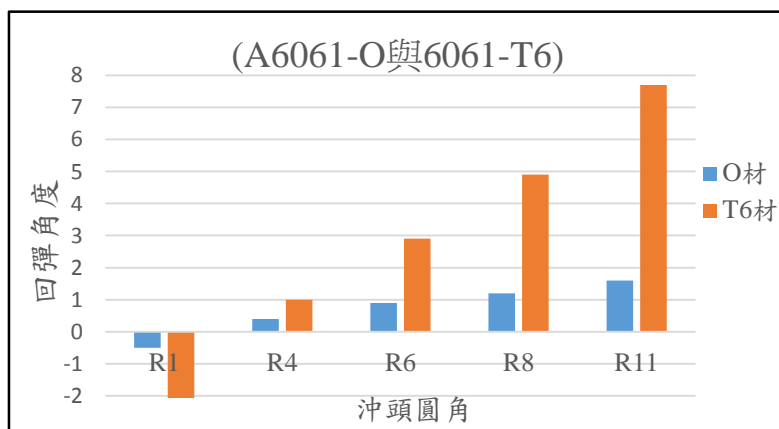


圖 4. 18 A6061-T6 與 A6061-O 側壁外開角度

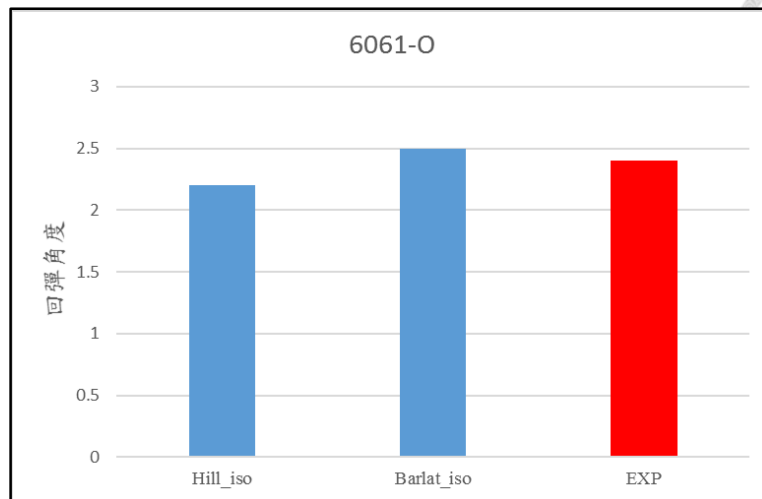


圖 4. 19 A6061-O 各材料模型之 V 型彎曲驗證

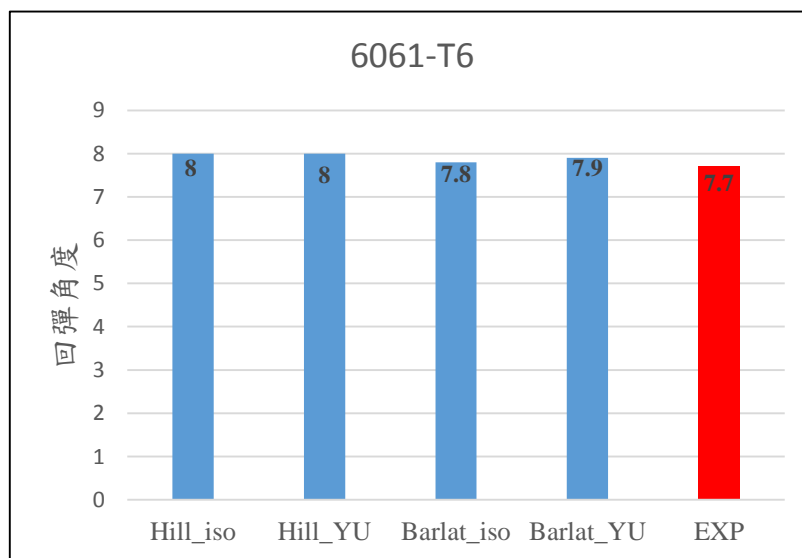


圖 4. 20 A6061-T6 各材料模型之 V 型彎曲驗證

4.3 U 型帽狀成形分析

U 形帽狀引伸成形分析最主要的目的是用來測試側壁捲曲的現象，本節將參考姚順偉[29]U 形帽狀引伸成形分析方法，預計探討不

同沖頭圓角及母模圓角下鋁合金 A6061-T6 產生之側壁捲曲現象。在此說明側壁捲曲現象為，當 U 形帽狀成形實驗後，板材側壁不再為直線，回彈後之側壁捲曲越為明顯表示回彈量越大；回彈小則側壁形狀較接近直線，如圖 4.21 所示。

回彈量=回彈後之曲率半徑 (mm)

回彈小為曲率半徑大，側壁形狀越接近直線

回彈大為曲率半徑小，側壁形狀捲曲情形較嚴重

而後續會接續第五章之阻料條設計進行鋁合金 A6061 之側壁捲曲改善。

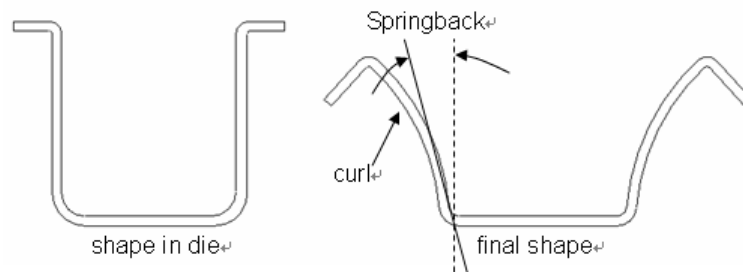


圖 4.21 U 形帽狀成形回彈示意圖

4.3.1 U 型帽狀成形模擬分析

首先以最小母模 R3 圓角之分析模型進行收斂性分析，材料強度使用 A6061-T6，降伏準則為 Barlat91，加工硬化準則為 Y-U 模型，其收斂性結果如表 4.2

表 4.2 U 型帽狀成形模擬分析收斂性結果

| 模擬參數 | 收斂性測試結果 |
|-----------------|---------|
| 板材最大自適應網格細化度(級) | 4 |
| 板材初始網格大小(mm) | 8 |
| 模面網格大小(mm) | 15 |
| 模面圓角網格尺寸(度/個) | 7.5 |
| 厚度方向積分點數目(個) | 7 |
| 沖壓速度(m/s) | 5 |

如圖 4.22 為 U 形帽狀引伸回彈分析模型，其分析模型作動方式將依照下節 U 型帽狀成形實驗之方式，其作動方式為反引伸成形，為板材置放於母模上，壓料板下壓提供壓料力(實驗機台壓料力為 14kN)，母模向上沖壓成形，最後經過回彈模擬，量測回彈後之側壁捲曲量，以作為回彈量之標準。本節會使用第三章所建立之鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 材料模型進行 U 形帽狀引伸回彈分析，透過各材料模型之回彈模擬以及下節之實際實驗進行對照，以討論各材料模型的預測回彈之準確性。

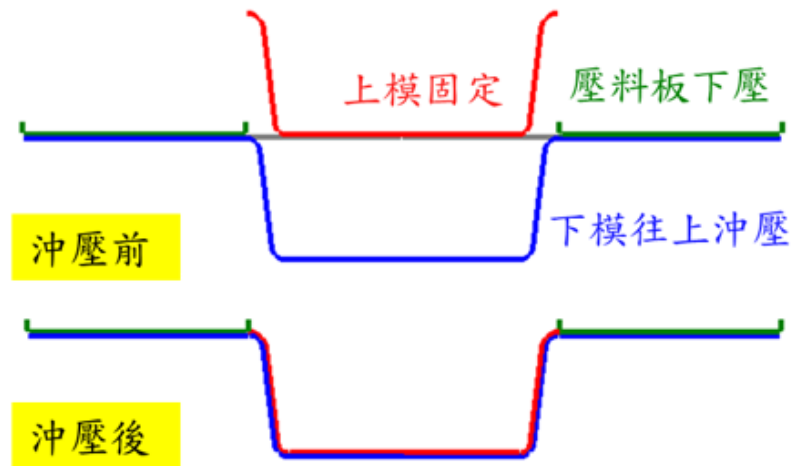


圖 4.22 U 形帽狀引伸回彈分析模型[29]

4.3.2 U 型帽狀成形實驗

4.3.2.1 實驗平台架設與實驗流程

本研究實驗平台使用聖約翰科技大學的 60 噸沖壓機，如圖 4.23 所示，為雙動式的壓機，主動力源作用於下床台，往上最大行程約 180(mm)；上油壓缸為壓料缸，以 load cell 量測出來的壓料力約 1.4 噸，往下行程 120(mm)。其中模具引用姚順偉[29]設計之 U 形帽狀引伸模具，如圖 4.24 圖 4.25 分別為其上下模示意圖，其中下模與上模皆可更換母模圓角及沖頭圓角，分別可替換母模圓角 R3、R5、R9；沖頭圓角 R5、R15。另姚順偉在上模座部分有設計可調式阻料條，為雙組料條設計，可透過調整墊片以改變阻料條作用深度，如圖 4.26。後續將在第五章進行阻料條高度對回彈改善之探討。

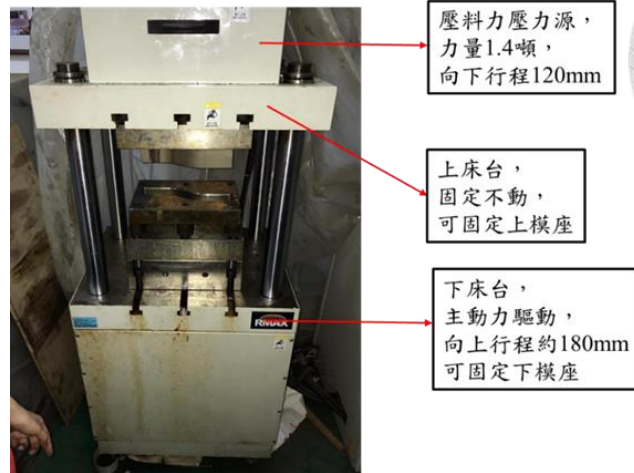


圖 4.23 沖壓機台說明

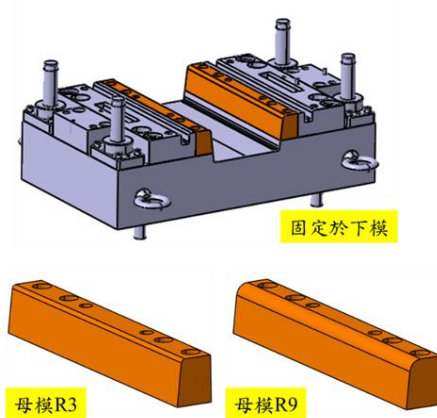


圖 4.24 可更換示母模 R 角示意圖[29]

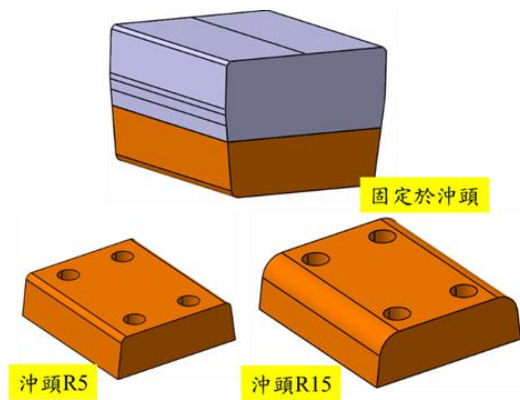


圖 4.25 可更換沖頭 R 角示意圖[29]

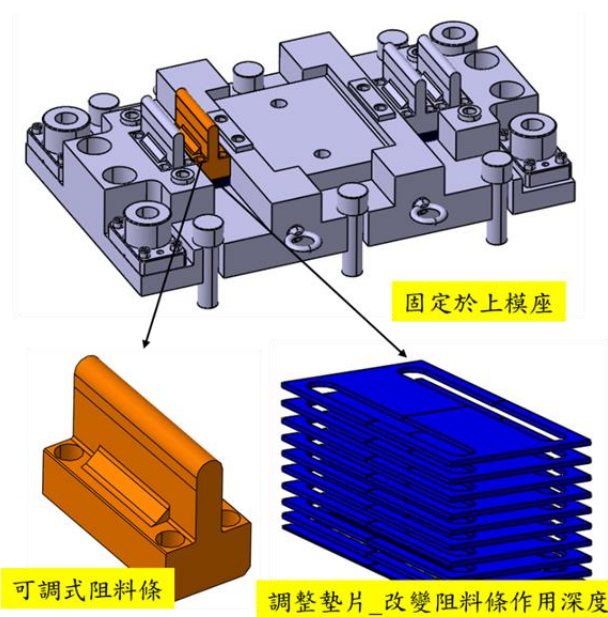


圖 4. 26 可調式阻料條設計[29]

由於 A6061-O 強度偏低，在 4.2.1 節 V 型彎曲成形之回彈現象比 A6061-T6 不明顯，無法輕易看出側壁外開之回彈現象。因此於此節將專注探討 A6061-T6 之側壁捲曲。本節將探討不同母模圓角、沖頭圓角對應鋁合金板材側壁捲曲現象，同時與 4.1 節的回彈分析模擬進行實驗驗證比較，附圖 4.27 為實驗所使用之不同母模圓角部件。預計探討 A6061-T6(厚度 2mm)成形後之側壁捲曲現象。實驗結束後，將實驗板件成品噴漆以利使用 GOMATOS 進行逆向掃描，如附圖 4.28 與圖 4.29，最後將掃描檔案匯入 GOM Inspect 分析軟體，進行側壁曲率半徑之量測，如附圖 4.30，將可整理出 A6061-T6 對應之不同母模圓角之側壁捲曲現象。



圖 4.27 實驗所使用之不同母模圓角部件



圖 4.28U 型帽狀成形實驗板件成品

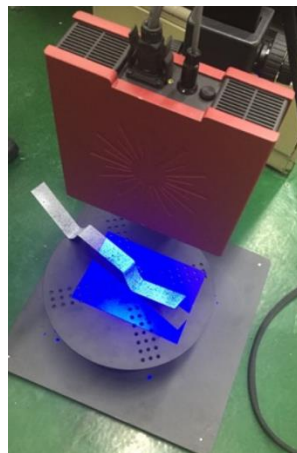


圖 4.29GOM ATOS 逆向掃描

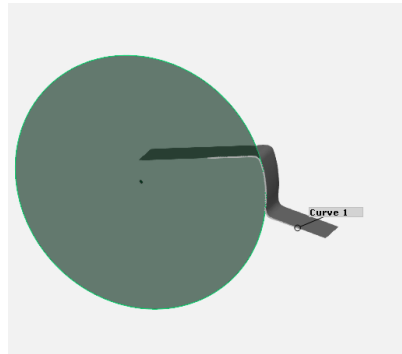


圖 4. 30GOM Inspect 回彈分析

4.3.2.2 實驗結果探討與模擬驗證

如前一小節圖 4.28 可以看出 A6061-T6 側壁捲曲相當嚴重，其側壁捲曲經量測最小半徑接近 160mm，接近蘇昱竹[39]厚度 1.4mm 之先進高強鋼 590 之側壁捲曲半徑。而在不同母模圓角下及沖頭圓角條件下進行引伸，由圖 4.31 及圖 4.32 可看出 A6061-T6 其側壁捲曲半徑改變不大，有隨著圓角增加，側壁捲曲半徑有些微變小之趨勢。

模擬驗證方面，針對母模圓角為 R9 之 U 型帽狀引伸進行分析，選用 Hill48 與 Barlat91 搭配等向性準則與 Yoshida 模型共四種材料模型，由圖 4.33 可得知 A6061-T6 以 Barlat91 搭配 Yoshida 模型為最準確之材料模型，因其考慮到包辛格效應，其預測之側壁捲曲半徑最接近實驗值。

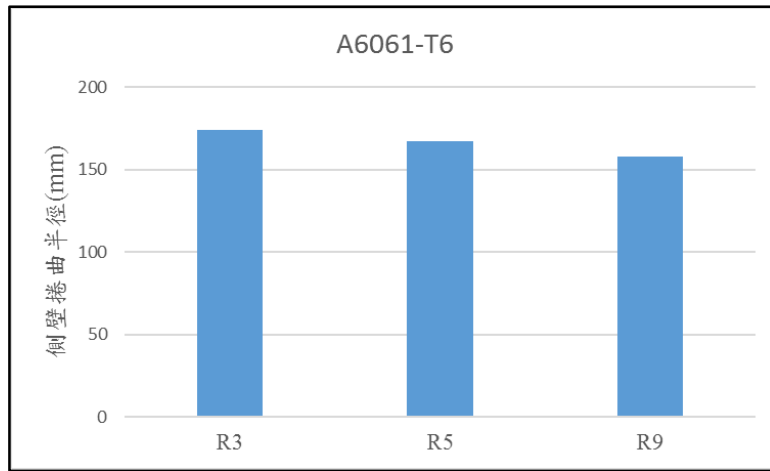


圖 4.31 不同母模圓角下 A6061-T6 之側壁捲曲半徑

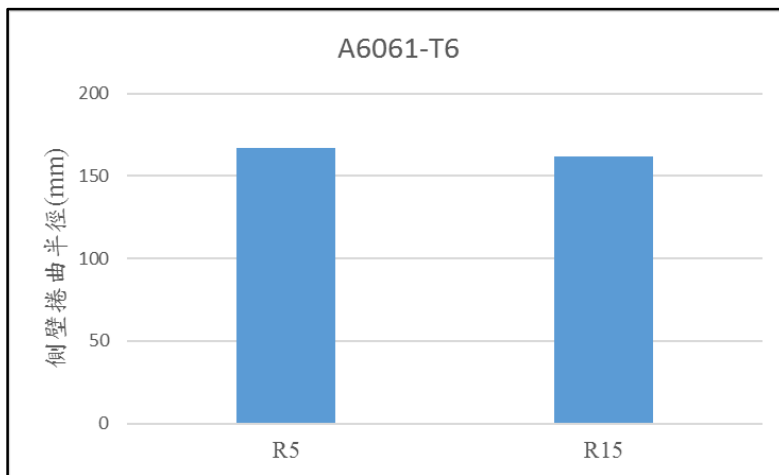


圖 4.32 不同沖頭圓角下 A6061-T6 之側壁捲曲半徑

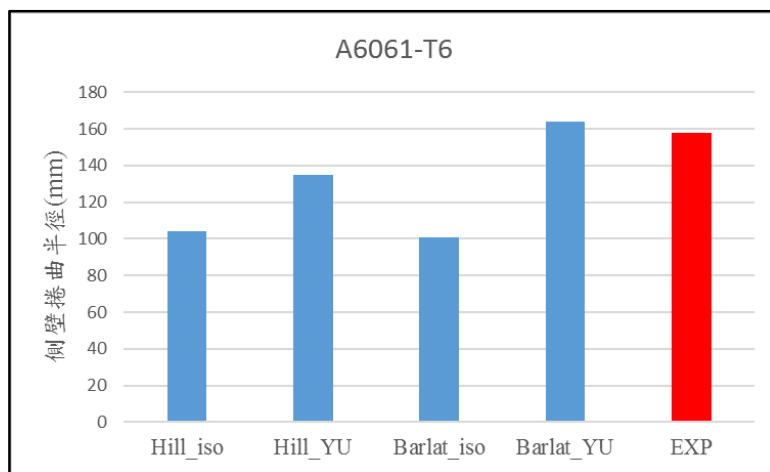


圖 4.33 A6061-T6 各材料模型之 U 型帽狀引驗證



4.4 小結

由上述 V 型彎曲成形與 U 型帽狀引伸分析可知，鋁合金 A6061-T6 與鋁合金 A6061-T6 由於板材強度關係在側壁外開的回彈結果差異相當大，而 A6061-T6 在 U 型帽狀引伸成形下，其產生的側壁捲曲現象接近厚度為 1.4mm 先進高強度鋼 590 之側壁捲曲現象。因此鋁合金 A6061-T6 的回彈現象是急需克服的重點之一。而關於模擬分析模型驗證方面，以 V 型彎曲成形而言，A6061-T6 在各材料模型中預測回彈角度皆有一定的準確度。而以 U 型帽狀引伸而言，A6061-T6 以 Barlat91 搭配 Yoshida 模型為最準確之材料模型，因其考慮到包辛格效應，對於側壁捲曲的預測值為最準確的。而透過第四章的回彈分析可知道 A6061-T6 回彈與側壁捲曲相當嚴重，需要探討改善方式。因此本論文第五章將引用姚順偉[29]之回彈改善方法，探討變壓料力與阻料條對鋁合金 A6061-T6 之回彈改善，藉此建立適合鋁合金 A6061-T6 之阻料條設計。

第五章 鋁合金回彈缺陷改善之探討



5.1 鋁合金冷成形之回彈缺陷改善

本研究引用姚順偉[29]的回彈改善分析流程，依序探討變壓料力與阻料條對鋁合金 A6061-T6 之回彈改善。其研究流程為透過變壓料力設計流程建立變壓料力曲線，再由曲線求得使得回彈收斂之最小強壓料力。後續將其轉換為阻料力作為阻料條設計流程之參考，最終將可建立適合鋁合金 A6061-T6 的阻料條設計，也與變壓料力進行回彈改善比較。最後則透過 U 形帽狀引伸搭配可調式阻料條之模具進行阻料條設計之實驗驗證。

5.1.1 回彈改善機制

由文獻可知道在實際沖壓過程中，變壓料力以及阻料條為最常見且有效的回彈改善方式，透過在沖壓結束前產生突然上升之壓料力，因此造成板材之後拉伸來有效地改善板材側壁捲曲的回彈現象，如圖 5.1 為一先弱後強之變壓料力曲線。本論文針對變壓料力與定值壓料力對鋁合金回彈改善之影響比較，探討變壓料力之回彈改善機制。

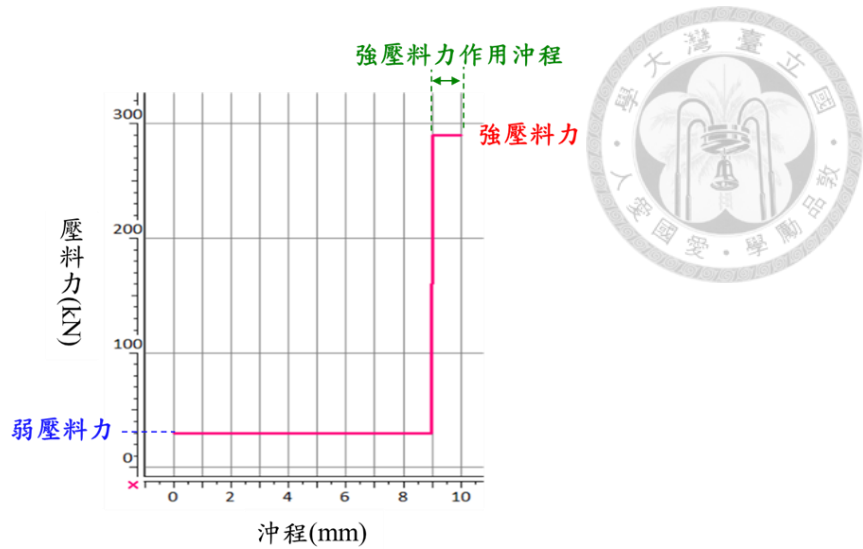


圖 5.1 先弱後強階梯式變壓料力曲線 [29]

首先進行收斂性分析，材料強度使用鋁合金 A6061-T6，降伏準則為 Barlat91，加工硬化準則為 Y-U 模型，以 U 形帽狀造型為測試載具，其模擬模型為半模型，如圖 5.2，而其收斂性結果如表 5.1

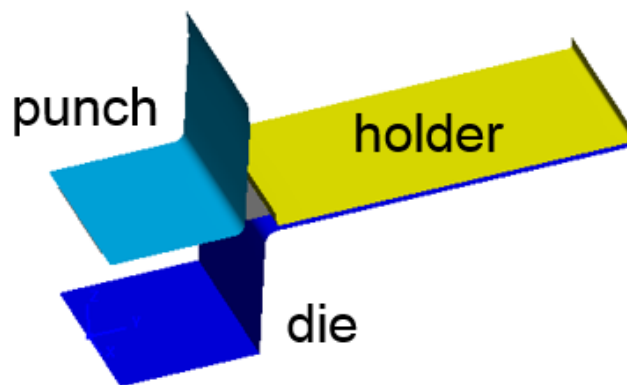


圖 5.2 變壓料力分析之半模型

表 5. 1U 形帽狀引伸半模型收斂性結果

| 模擬參數 | 收斂性測試結果 |
|-----------------|---------|
| 板材最大自適應網格細化度(級) | 4 |
| 板材初始網格大小(mm) | 8 |
| 模面網格大小(mm) | 15 |
| 模面圓角網格尺寸(度/個) | 7.5 |
| 厚度方向積分點數目(個) | 9 |
| 沖壓速度(m/s) | 10 |

在此探討側壁捲曲改善機制，分別探討定值壓料力及先弱後強階梯式變壓料力模型。由蘇昱竹[39]之回彈機制探討可得知，側壁捲曲現象的成因為板件側壁厚度方向壓力差在回彈階段因應力釋放而產生力矩，進而導致側壁發生捲曲現象，如圖 5.3。因此如何降低側壁厚度方向之壓力差，也就是如何降低側壁內外表面之壓力差為改善側壁捲曲缺陷的方法。分別觀察定值壓料力及先弱後強變壓料力模型當中的網格，此網格會由壓料區域經母模 R 角流至側壁區域，其最初及最終位置如圖 5.4 所示，分析此網格流動時之應力應變態，所取的內

外表面之應力應變方向及結果如圖 5.5 及圖 5.6 所示。在定值壓料力下，如圖 5.5，可看出網格經過母模圓角到側壁過程中，外表面受到先壓後拉的應力，而內表面則為先拉後壓，兩者在成形後期應力差極大，即是造成板件側壁捲曲的原因。然後若使用變壓料力，如圖 5.6，在成形前期狀況與定值壓料力一樣，在壓料力突然上升後，圖 5.6 中虛線部分出現，導致內表面壓應力轉為拉應力，進而使內外應力差減少，以大幅改善側壁捲曲。另外也可由圖 5.7 也可知道，在壓料力突然上升後，於壓料區域之板材流速大幅減慢，因此才可使側壁產生一加塑性應變，進而使得應力差減少。

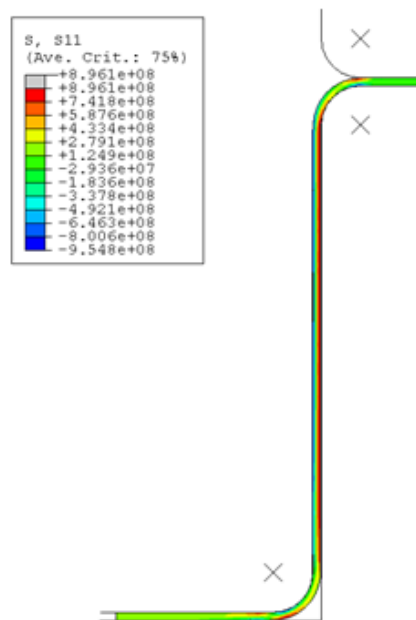


圖 5.3U 形帽狀厚度方向應力分佈圖

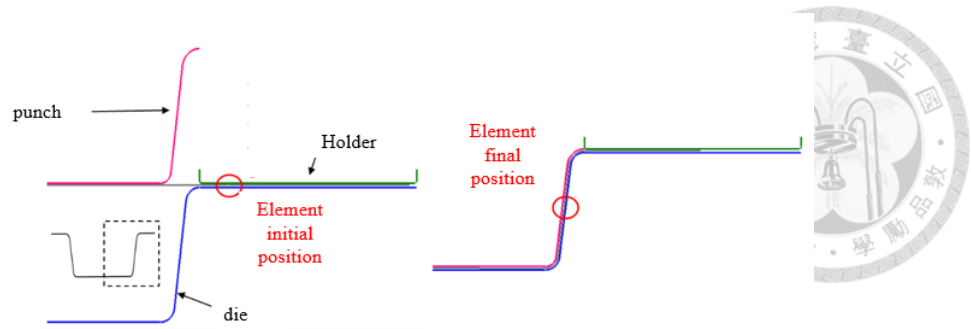


圖 5.4 U 形帽狀成形過程中網格位置說明

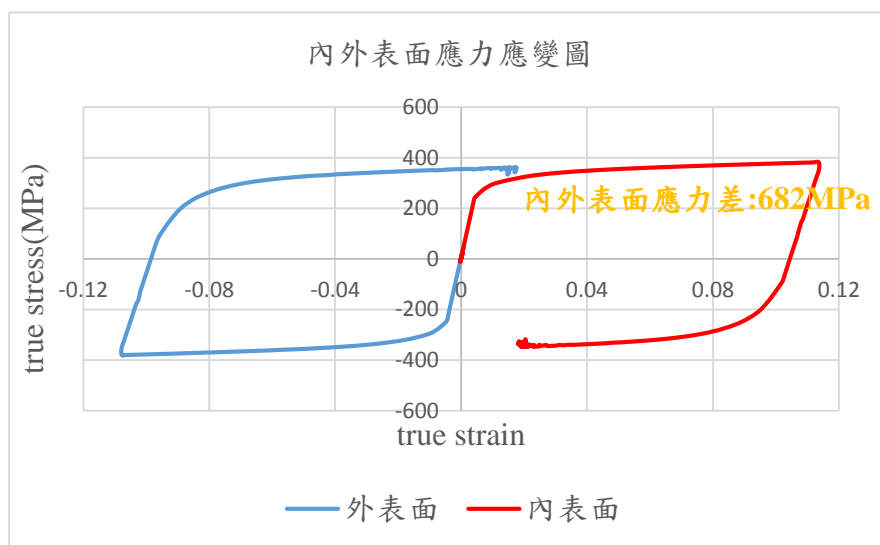


圖 5.5 定值壓料力之應力應變分析

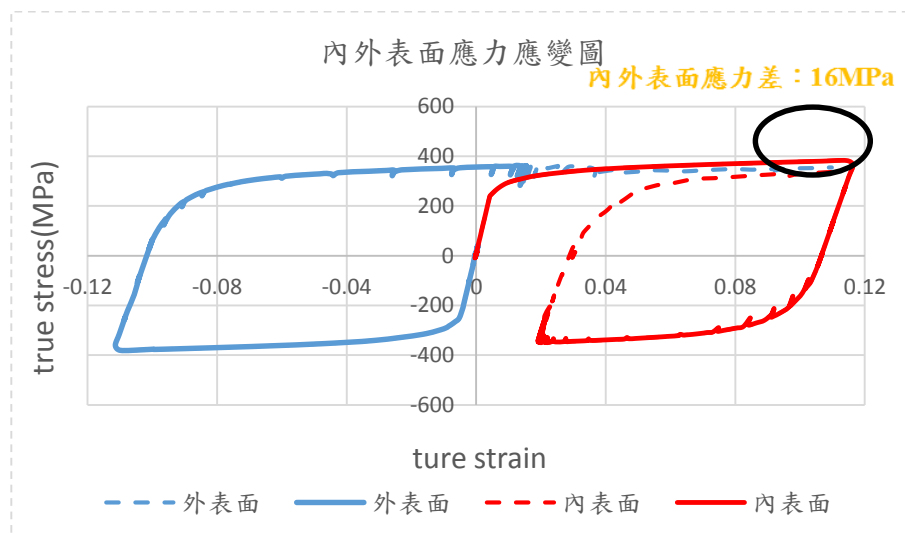


圖 5.6 變壓料力之應力應變分析

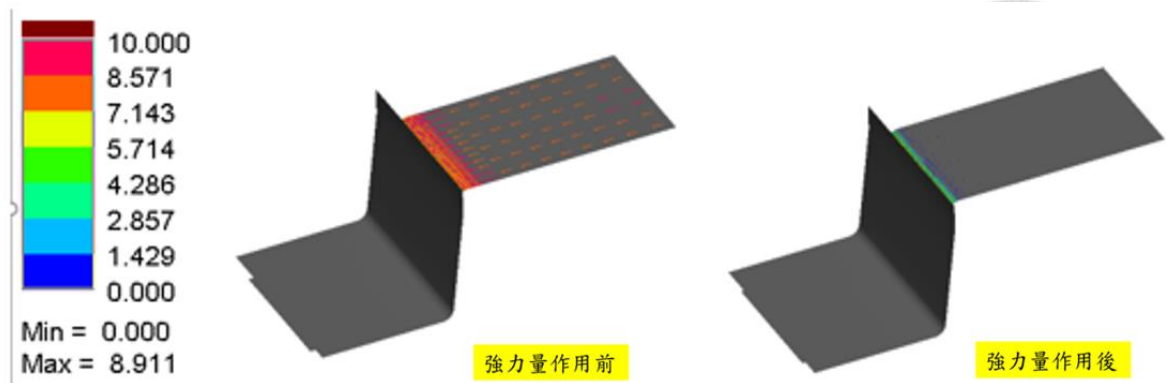


圖 5.7 強壓料力作用前後之流速差異

5.1.2 變壓料力設計流程

由圖 5.8 變壓料力曲線設計方式可知先弱後強階梯式變壓料力曲線主要有三個參數，分別為弱壓料力(Small Blank Holder Force, BHF_S)、強壓料力(Large Blank Holder Force, BHF_L)及強壓料力作用時間 (簡稱作用時間)或強壓料力作用沖程 (簡稱作用沖程)。在此依照姚順偉[29]的先弱後強階梯式變壓料力設計流程，如圖 5.9，來進行探討適合鋁合金板材 A6061-T6 之變壓料力曲線

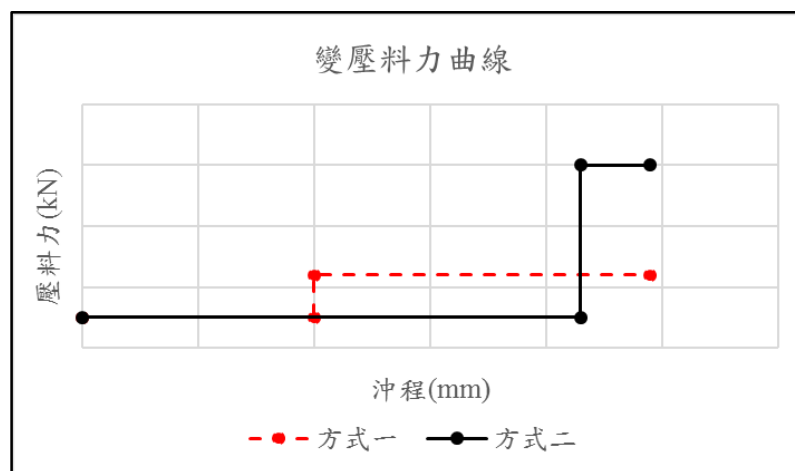


圖 5.8 可能的變壓料力曲線設計方式[29]

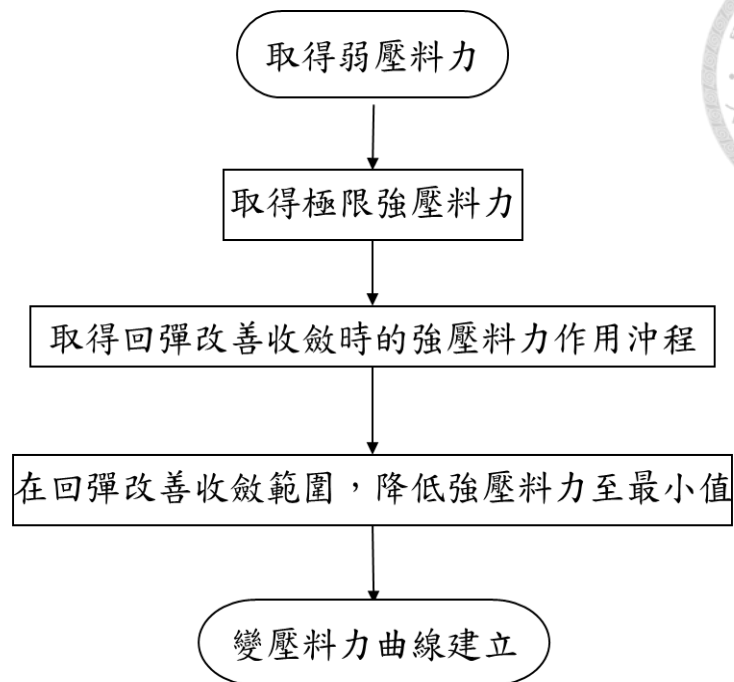


圖 5.9 先弱後強階梯式變壓料力設計流程 [29]

首先先建立弱壓料力值，一般而言，沖壓過程可接受之最小壓料力值，必須讓板材不會產生皺褶，以壓住板材即可，在模擬中使壓料板與上模保持一個板厚沖壓，取壓料板之反力，其反力約為 5(kN)的弱壓料力(半模型)。接著設計一個極限強壓料力(Limit Large Blank Holder Force, BHF_{LL})，為不使壓料區之板材壓至塑性變形之強壓料力，其極限強壓料力公式為 = 平均壓料面積(32.3mm×50mm) * 降伏強度(0.277GPa) * 0.8(安全係數)，結果約 357(kN)。

在決定弱壓料力以及極限強壓料力之後，開始調降強壓料力，最後得到可以使回彈改善收斂之強壓料力的最小值(Minimal Large Blank Holder Force, BHF_{ML})，其結果為 90(kN)，最後建立出適合鋁

合金 A6061-T6(厚度 2mm)的先弱後強階梯式變壓料力設計範圍，如圖 5.10。由圖中可得知斜線區域為強壓料力曲線可選擇之範圍。欲消除側壁捲曲，強壓料力曲線最小值至少要超過 $BHF_{ML}=90(\text{kN})$ ，同時作用沖程不可超過 3mm，否則板材將發生破裂，如圖 5.11，其中鋁合金 A6061-T6 之成形極限曲線(Forming limit curve,FLC)參考自文獻 [39]。而作用沖程則至少要超過 1mm，以求達到側壁捲曲消除之目的。透過參考此節建立之 A6061-T6 先弱後強階梯式變壓料力設計範圍，後續將可繼續使用其作為探討阻料條設計流程之參考標準，將於下節詳述之。

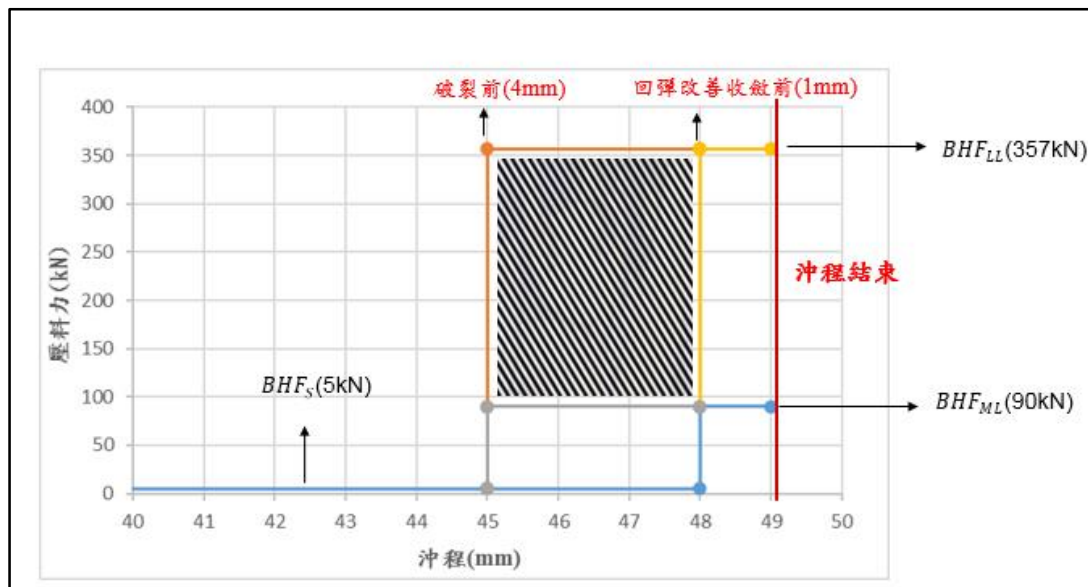


圖 5.10 A6061-T6 先弱後強階梯式變壓料力設計範圍

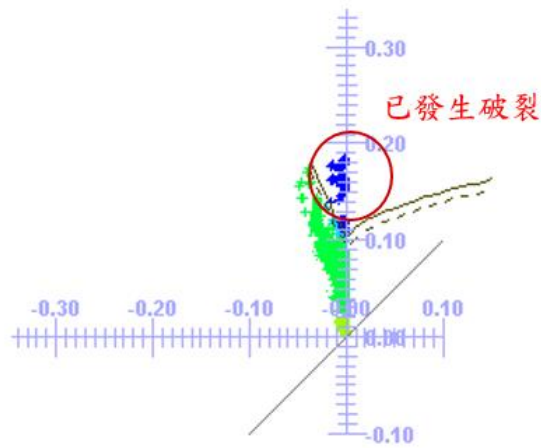


圖 5.11 強壓料力 90kN 作用沖程 4mm 將發生破裂

5.1.3 阻料條設計流程

若以阻料條作為後拉伸改善回彈之手段，阻料條必需在沖壓後期才開始作用，最簡單之設計為將阻料條固定於下(上)模座，在壓料板開一個長孔，使在沖壓後期，阻料條通過長孔，並作用於板材，達到後拉伸效果，配合實驗機台設定，於模擬中之沖壓方式如圖 5.12 所示。本研究將以此方式探討阻料條對於回彈之改善。

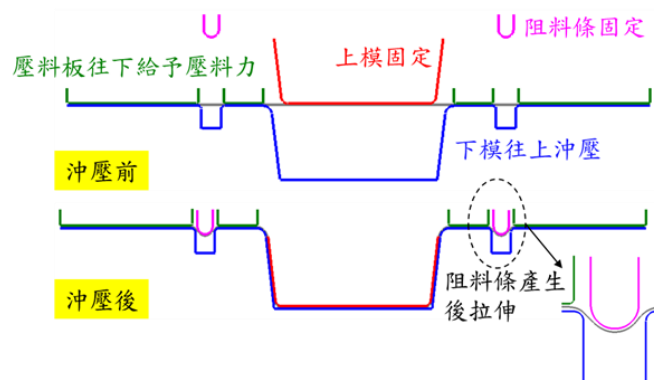


圖 5.12 可調式阻料條於沖壓作用情形

由於姚順偉[29] 比較變壓料力與阻料條兩者消除側壁捲曲之方法，其中得出結論為變壓料力方法較好控制後拉伸的行為，較適合進行模擬研究，然而實驗機台需要搭配可控制壓料力之沖壓機台，其成本相當高。因此本論文後續進行實驗驗證的部分將採用較簡單之阻料條設計之模具，在此節將參考姚順偉[29]阻料條之回彈改善分析，透過阻料條設計流程建立適合鋁合金板材 A6061-T6 之阻料條參數，並且進行實驗驗證之。

5.1.3.1 阻料條設計之建立

首先進行收斂性分析，材料強度使用 A6061-T6，降伏準則為 Barlat91，加工硬化準則為 Y-U 模型，以 U 形帽狀基礎載具測試。首先需決定阻料條造型，阻料條造型分類如圖 5.13，在此選用研究最常見且造型最單純之半圓形阻料條(Semi-Circular Drawbead)。另半圓形阻料條造型參數使用 $R1=3(\text{mm})$ 、 $R2=3(\text{mm})$ ，如圖 5.14，其收斂性結果如表 5.2

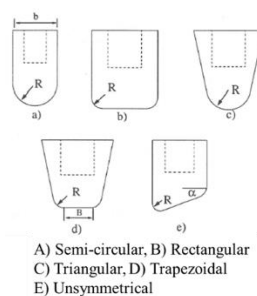


圖 5.13 阻料條造型分類[41]

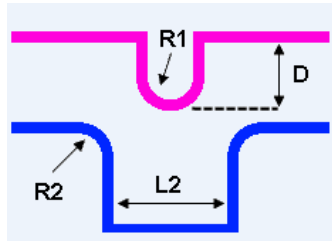


圖 5.14 半圓形阻料條幾何參數

表 5.2 阻料條分析模型模擬參數收斂性結果

| 模擬參數 | 收斂性測試結果 |
|-----------------|---------|
| 板材最大自適應網格細化度(級) | 4 |
| 板材初始網格大小(mm) | 4 |
| 模面網格大小(mm) | 15 |
| 模面圓角網格尺寸(度/個) | 7.5 |
| 厚度方向積分點數目(個) | 7 |
| 沖壓速度(m/s) | 5 |

由於上節針對鋁合金 A6061-T6 變壓料曲線分析，對照姚順偉[29]中的鋼材 1180 變壓料曲線設計，如圖 5.15，其中黑色斜線範圍為適合鋼材 1180 的變壓料曲線設計，然而紅色斜線範圍則為鋁合金 A6061-T6 的變壓料曲線設計。以此可看出鋁合金 A6061-T6 針對壓料力作用歷程以及強壓料力範圍遠比鋼材 1180 來得小，即容易產生破裂或無法改善回彈現象。

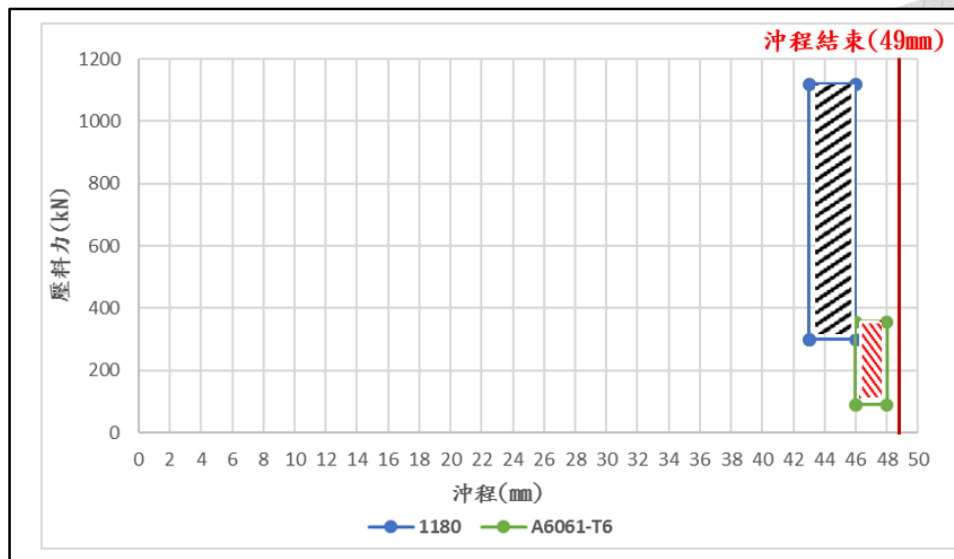


圖 5.15 鋼材 1180 與 A6061-T6 適合之變壓料曲線設計比較

先探討單阻料條設計對鋁合金 A6061-T6 的回彈改善影響，引用姚順偉[29]的單一阻料條設計流程，如附圖 5.16。藉由上節之壓料力曲線設計可以推得單位長度阻料條所需之阻料力(restraining force per drawbead length unit, F_r)，然而其中 C_{Fr} 為阻料力轉換係數，需由更多模擬結果進行此參數之修正，目前先採用先前提供的經驗值 0.77。由圖 5.16 單一阻料條設計計算出欲改善回彈所需單位長度阻料力為 0.51 (kN/mm)。

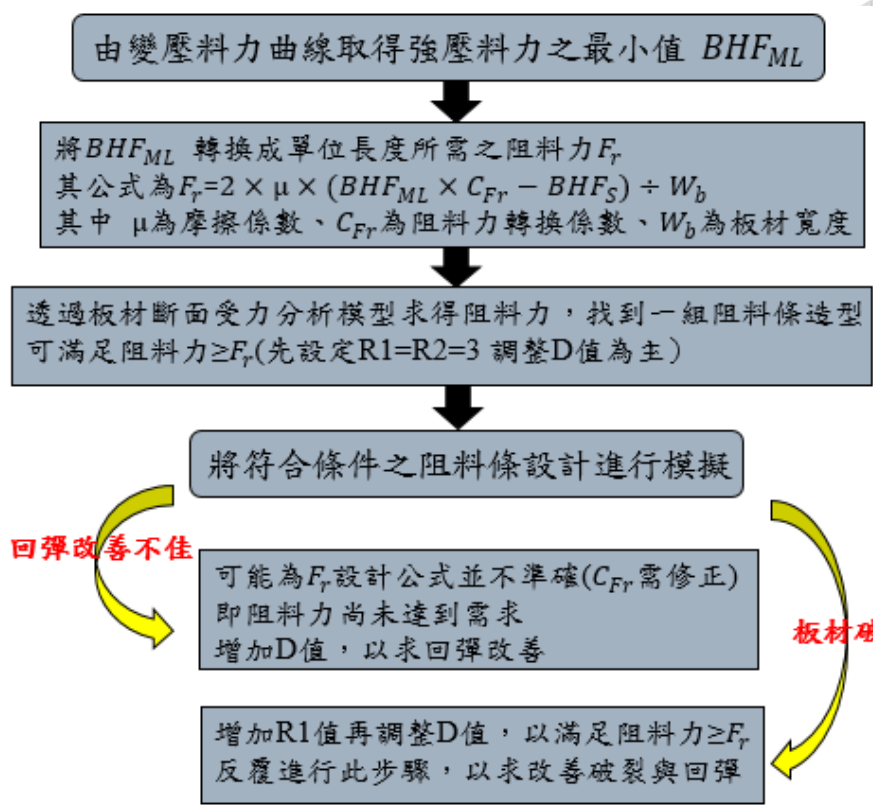


圖 5.16 單一阻料條設計流程[29]

先以 R1=2(mm)、R2=3(mm)、D=2(mm)之阻料條進行斷面受力分析以求得此造型之阻料力。其中斷面受力分析模型為圖 5.17 所示，透過板材邊界給定速度，同時阻料條開始作用，使得板材拉力上升，偵測當阻料條達到最後作用為置時，板材受力量值為此造型之阻料力。以上述 R1=2(mm)、R2=3(mm)、D=2(mm)的阻料條造型而言，其阻料力為 3.25(kN/mm)比上述求得所需單位長度阻料力(F_r)大，推照應可順利改善鋁合金板材回彈現象。因此將此阻料條設計造型代入模型中進行模擬，然而其側壁捲曲半徑約 261mm，離目標至少將捲曲半徑

改善到 1000(mm)以上還差甚遠，因此依照單一阻料條設計流程步驟繼續調整 D 值，將 D 值增加為 D=3(mm)，其模擬結果發現使用此阻料條會造成板材破裂，如附圖 5.18。

繼續依照單阻料條設計方法，提升 R1 為 3(mm)，並調整 D 值，發現 D 值在 4 (mm)以上，成形後仍會在阻料條處破裂，再將 D 值降低到 3(mm)後就不會破裂，但側壁捲曲半徑仍為 370(mm)，如圖 5.19。然後再依照單阻料條設計方法提升 R1 為 4(mm)時，其阻料力將無法達到 F_r ，確實無法達到抑制回彈效果。

由此可知對於回彈更大的成形如鋁合金板件成形，以單一阻料條難以完全消除側壁捲曲。因此將使用雙阻料條之設計以取代前述之單阻料條設計，因姚順偉[29]已討論到雙阻料條設計其各自阻料條的阻料力將比單阻料條來的小，因此較不會使板材發生破裂，將在下節進行討論並延用其設計方式。

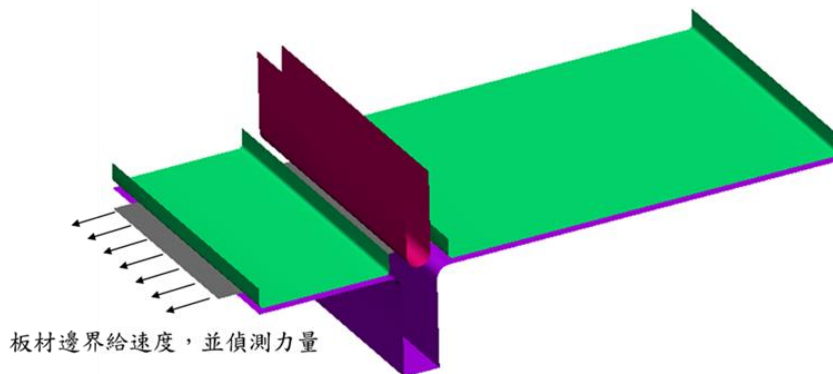


圖 5.17 板材斷面受力分析模型[29]

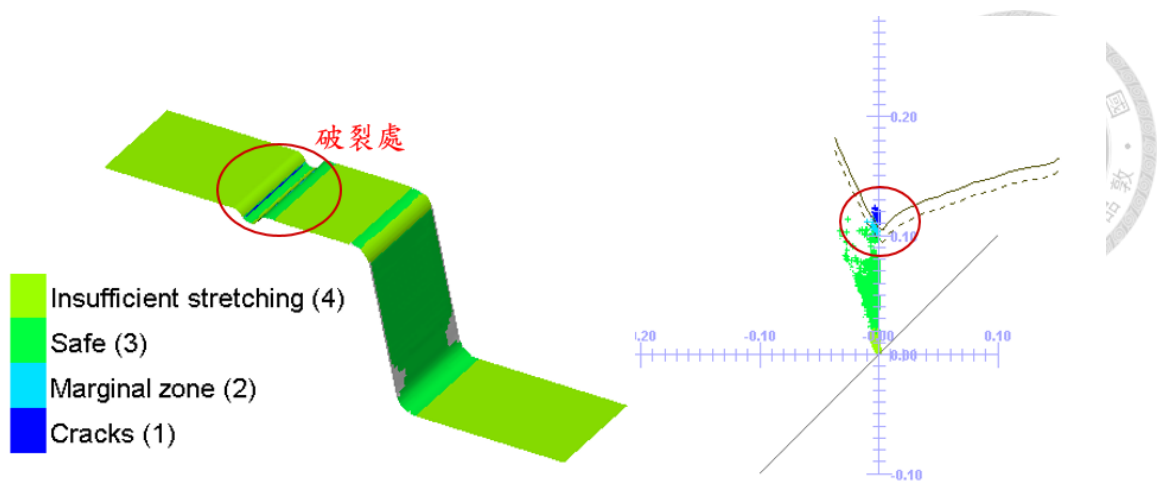


圖 5.18 $R1=2\text{mm}$ ， $R2=3\text{mm}$ ， $D=3\text{mm}$ ，板材破裂處

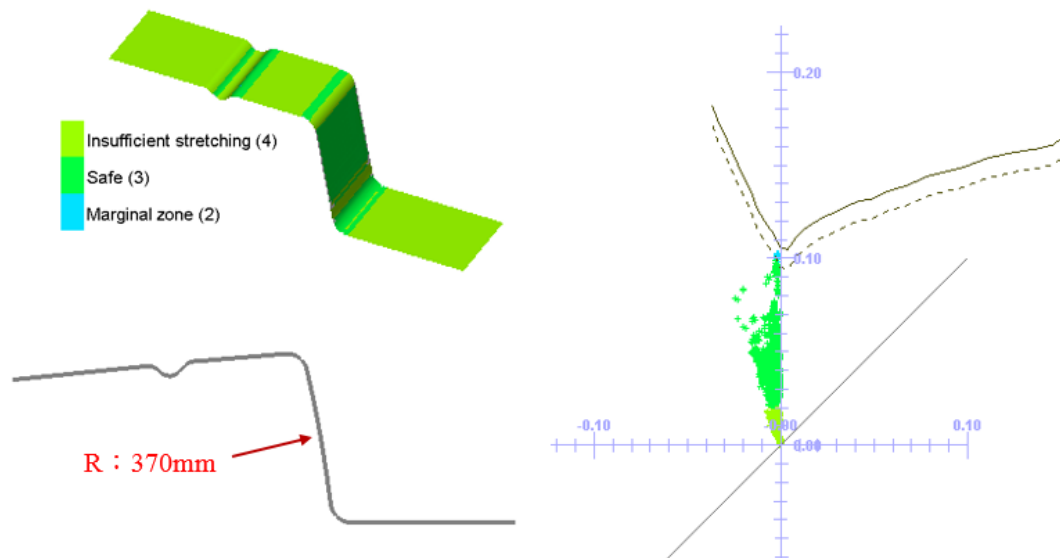


圖 5.19 $R1=3\text{mm}$ ， $R2=3\text{mm}$ ， $D=3\text{mm}$ ，板材尚未破裂，但回彈

改善不佳

5.3.1.2 雙阻料條設計

本節探討雙阻料條設計對應鋁合金成形回彈改善設計，而使用兩個阻料條會多一個參數，為兩個阻料條間的距離 a 值，如圖 5.20。

由姚順偉[29]中探討 a 值對減薄與回彈差異可得知，以回彈而言， a 值

對回彈影響甚小 如圖 5.21 。然而以減薄率而言， a 值越大，減薄率越大，將導致板材容易破裂，如圖 5.22 。因此後續皆以最小 a 值進行研究。

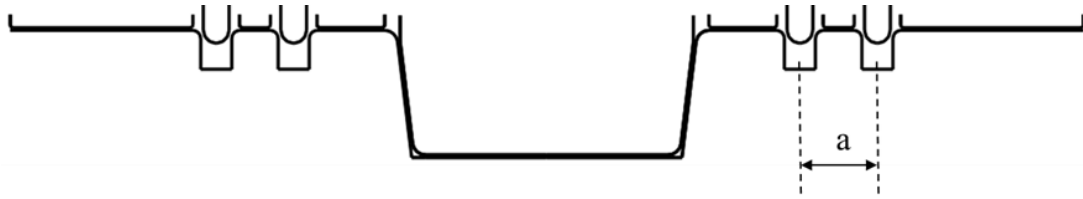


圖 5.20 雙阻料條距離示意圖

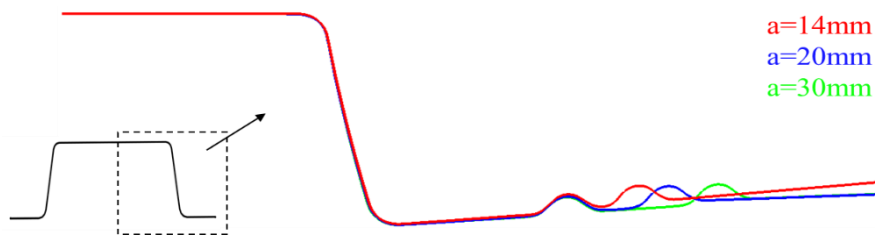


圖 5.21 不同阻料條距離之板材回彈斷面比較[29]

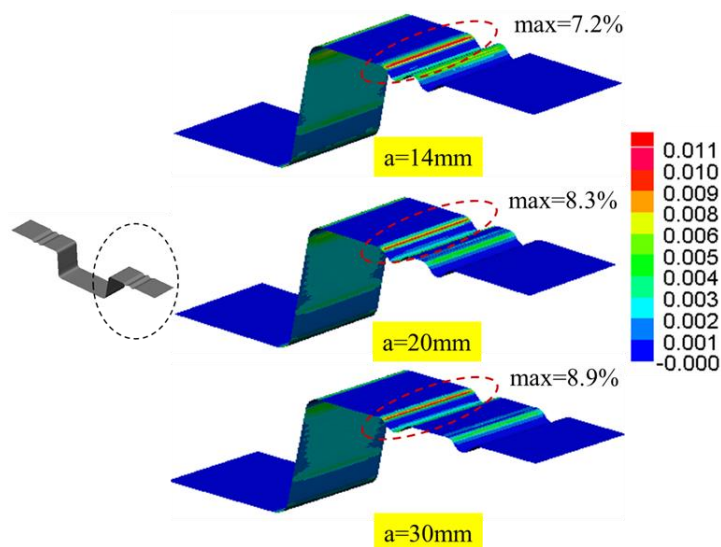


圖 5.22 不同阻料條距離之最大減薄率比較[29]

接著為了單一阻料條設計流程之設計方法能套用在雙阻料條上，因此針對鋁合金 A6061-T6 單雙阻料條對其成形產生之阻料力差異進行探討，結果如圖 5.23，採用阻料條造型為 $R1=2\text{mm}$ ， $R2=3\text{mm}$ ， $D=2\text{mm}$ ，通過板材斷面受力分析得知雙阻料條設計之阻料力為 $11.2(\text{kN})$ ，約為單阻料條 1.72 倍，代表雙阻料條確實可造成單阻料條將近 2 倍的阻料力。

而因此單阻料條設計流程中套用在雙阻料條上，設定兩個阻料條造型相同，雙阻料條之單一阻料條之阻料力(restraining force per drawbead length unit of double drawbead, F_{dr})為 $F_r/1.72$ ，其餘的設計流程皆照舊，因此後續章節將使用此雙阻料條設計流程來探討兩種回彈較嚴重的情況，其中包括沖頭圓角 $R15$ 與母模圓角 $R9$ 所造成之側壁捲曲現象。

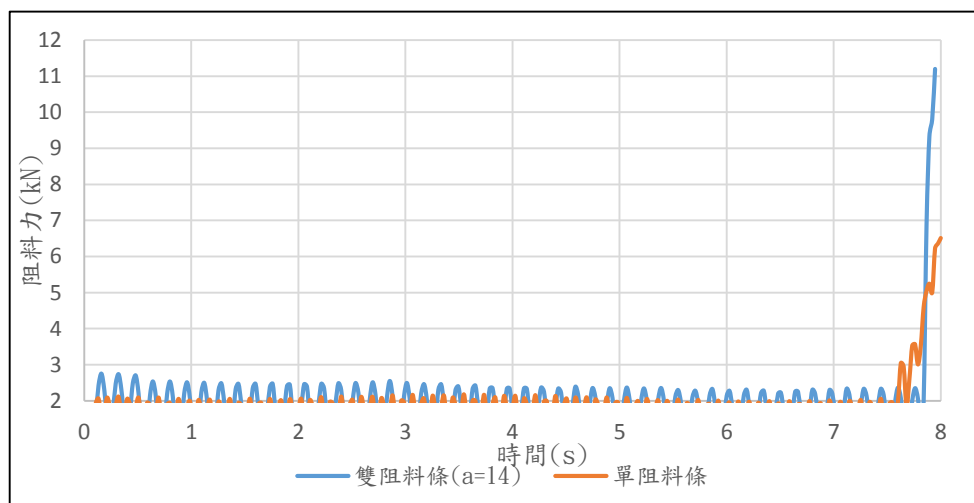


圖 5.23 單雙阻料條設計之阻料力比較

5.1.3.3 沖頭 R15mm 之回彈改善結果

由於 4.3 節 U 型帽狀引伸實驗可得知，以沖頭圓角為 15(mm)所造成之側壁捲曲較嚴重，因此針對此造型進行雙阻料條之設計。針對沖頭 R 角=15(mm)進行阻料條造型設計，由變壓料力設計流程所得到的 BHF_{ML} 約為 95(kN)，經由計算後得 F_{dr} 約為 0.31(kN/mm)，先設計阻料條造型為 R1=3(mm)、R2=3(mm)、D=2(mm)，其側壁捲曲半徑為 460(mm)，因此增加 D 值至板材破裂前，最終雙阻料條設計為 R1=3(mm)、R2=3(mm)、D=3(mm)，板件在此造型成形下回彈結果如圖 5.24 所示。於圖 5.24 可得知，此雙阻料條造型其達成抑制回彈的效果已經接近於變壓料力設計之效果，其側壁捲曲半徑大於 1000mm，明顯地與無阻料條造型之成品(側壁捲曲半徑 171mm)有區別。因此根據雙阻料條設計流程確實能夠得到適合鋁合金 A6061-T6 之雙阻料條造型，已改善其成形的嚴重側壁捲曲現象。

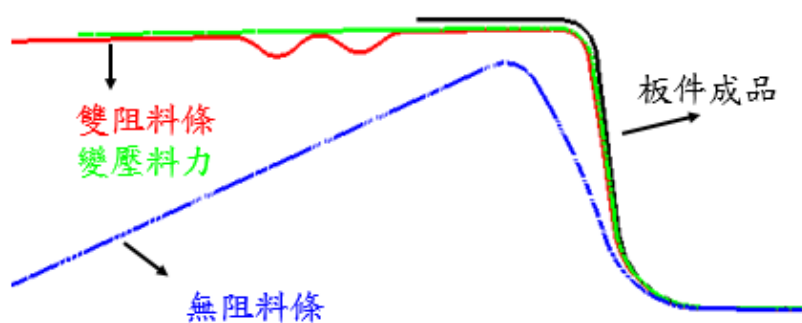


圖 5.24 雙阻料條與變壓料力之回彈斷面比較(沖頭 R 角=15mm)

5.1.3.4 母模 R9mm 之回彈改善結果

由於 4.3 節 U 型帽狀引伸實驗可得知，以母模圓角為 9(mm)所造成之側壁捲曲較嚴重，因此針對此造型進行雙阻料條之設計。針對母模圓角=9(mm)進行阻料條造型設計，由變壓料力設計流程所得到的 BHF_{ML} 約為 95(kN)，經由計算後得 F_{dr} 約為 0.31 (kN/mm)，先設計阻料條造型為 R1=3(mm)、R2=3(mm)、D=2(mm)，其側壁捲曲半徑為 415(mm)，因此增加 D 值至板材破裂前，最終雙阻料條設計為 R1=3(mm)、R2=3(mm)、D=3(mm)，板件在此造型成形下回彈結果如圖 5.25 所示。於圖 5.25 可得知，此雙阻料條造型其達成抑制回彈的效果已經接近於變壓料力設計之效果，其側壁捲曲半徑大於 1000mm，明顯地與無阻料條造型之成品(側壁捲曲半徑 164mm)有區別。因此根據雙阻料條設計流程確實能夠得到適合鋁合金 A6061-T6 之雙阻料條造型，已改善其成形的嚴重側壁捲曲現象。

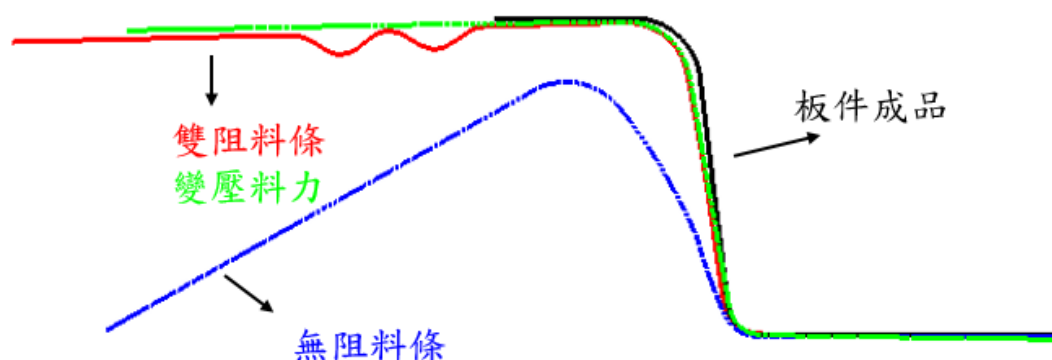


圖 5.25 雙阻料條與變壓料力之回彈斷面比較(母頭 R 角=9mm)

5.1.4 可調式阻料條之回彈實驗驗證

上述針對鋁合金 A6061-T6 探討變壓料力與可調式阻料條對其回彈之改善，雖然結果為變壓料力的改善效果最佳，但阻料條設計較容易實行，因此本節採用姚順偉[29]設計之 U 形帽狀引伸搭配可調式阻料條之模具進行相關模擬與實驗驗證，探討鋁合金 A6061-T6 之回彈改善。其中針對 U 形帽狀引伸模具已於第四章進行介紹，在此簡單介紹其可調式阻料條設計，如圖 5.26 所示，其阻料條設計為安裝於上模座，且為雙阻料條設計皆可拆裝。然而為了因應阻料條強度問題，因此將 R1 增至 5mm，而為了阻料條設計是能可調式的，雙阻料條之間的間距最小為 $a=33\text{mm}$ ，另外在阻料條與上模座間設置墊片，每片厚度為 1mm 可用於調整阻料條作用深度。後續將針對此阻料條造型之模具進行鋁合金 A6061-T6 之回彈模擬分析與實驗驗證。

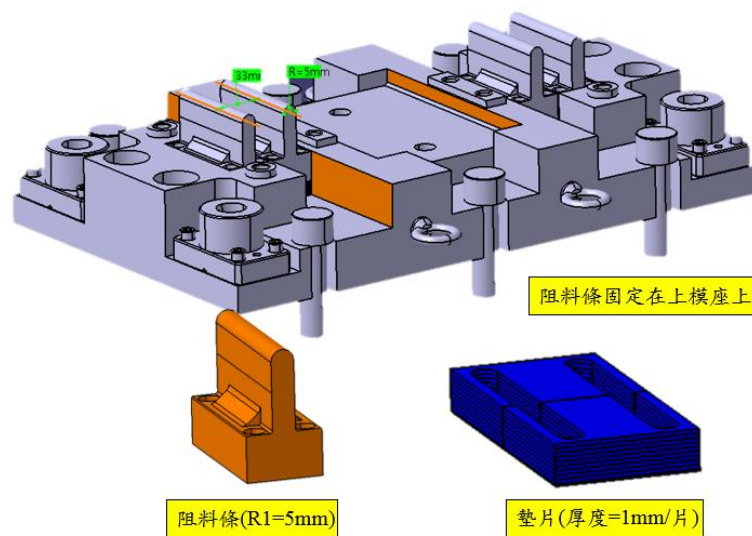


圖 5.26 可調式阻料條設計

5.1.4.1 雙阻料條之設計與模擬分析

本節採用姚順偉[29]設計之可調式雙阻料條造型之模具進行模擬分析，此模具之阻料條參數為 $R1=5(\text{mm})$ 、 $R2=3(\text{mm})$ 、 $a=33(\text{mm})$ 。

以母模圓角 9mm 搭配沖頭圓角 5mm 進行模擬分析。由此模具之阻料條參數搭配阻料條高度 $D=2\text{mm}$ 所得到之回彈結果如圖 5.27 所示，其側壁捲曲半徑為 588mm，與無阻料條之(側壁捲曲半徑 164mm)有改善趨勢，然而與變壓料力設計之效果有差距，另外尚未達到目標至少將捲曲半徑改善到 1000(mm)以上。

因此將繼續按照阻料條設計流程調整阻料條高度 $D=3\text{mm}$ ，其模擬結果發現使用此阻料條會造成板材破裂，如附圖 5.28。因為此模具設計之雙阻料條間距為 $a=33\text{mm}$ ，由 5.3.1.2 節可知雙阻料條間距 a 值愈大，造成板材成形減薄率增大，增加破裂風險。然而礙於可調式雙阻料條設計，其設計之最小 a 值即為 33mm。後續可再增加 $R1$ ，但其阻料力將無法達到 F_r ，確實無法達到抑制回彈效果。因此由此節可知，姚順偉[29] 雙阻料條造型模具對於鋁合金 A6061-T6 有改善側壁捲曲之趨勢，然而無法順利達到徹底消除側壁捲曲現象。後續將於 5.2 節討論另一製程改善鋁合金 A6061-T6 之回彈現象。

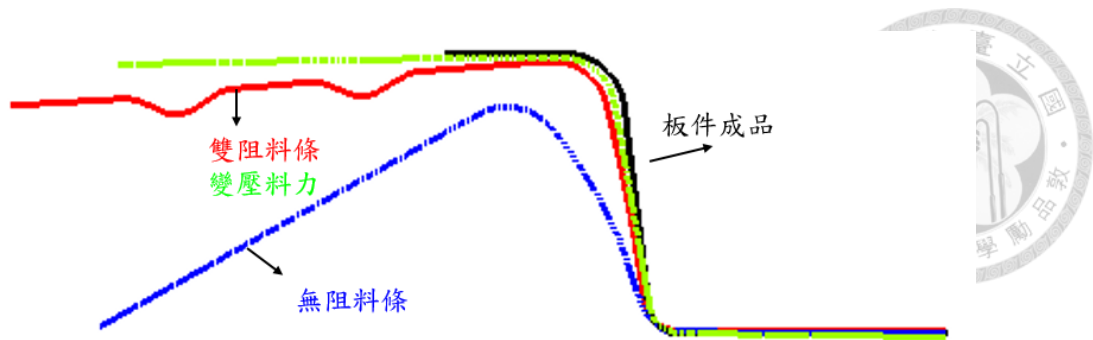


圖 5.27 雙阻料條與變壓料力之板材回彈斷面比較

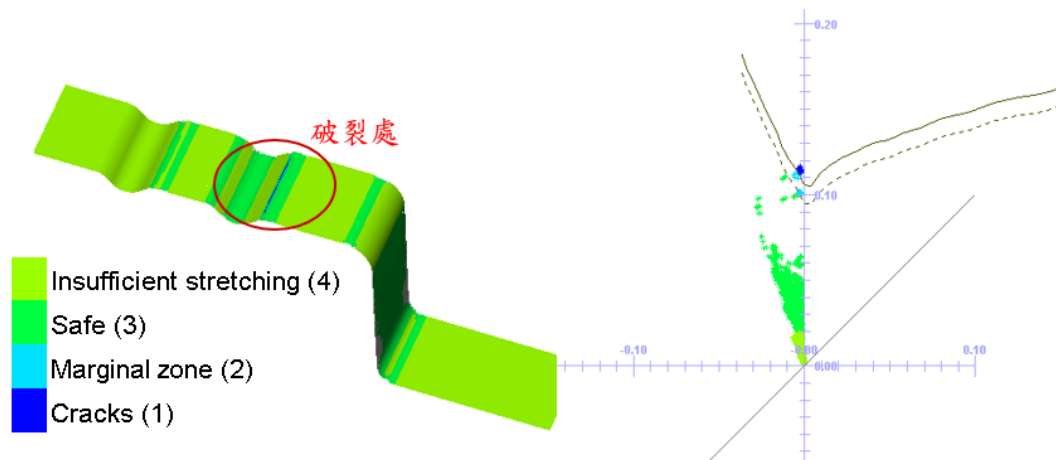


圖 5.28 $R_1=5\text{mm}$ ， $R_2=3\text{mm}$ ， $D=3\text{mm}$ ，板材破裂處

5.1.4.2 雙阻料條之實驗驗證

本節採用姚順偉[29]設計之可調式雙阻料條造型之模具進行實驗驗證，此模具之阻料條參數如上小節所述。本節將依序調整阻料條高度 $D=1\sim 3\text{mm}$ 驗證上述模擬，所得到之結果如圖 5.29 所示，另外由圖 5.30 可知最佳改善結果為 $D=2\text{mm}$ ，其側壁捲曲半徑為 472mm ，與無阻料條之(側壁捲曲半徑 158mm)相比有改善趨勢，然而尚未達到目標至少將捲曲半徑改善到 $1000(\text{mm})$ 以上。後續阻料條高度 $D=3\text{mm}$ ，其

模擬結果發現使用此阻料條會造成板材破裂，而確實在實驗結果驗證了破裂現象，因此使此雙阻料條設計之模具對鋁合金 A6061-T6 之側壁捲曲現象無法達到完全改善之效果，後續研究可以考慮進行阻料條設計之修改。



圖 5.29 雙阻料條實驗成品

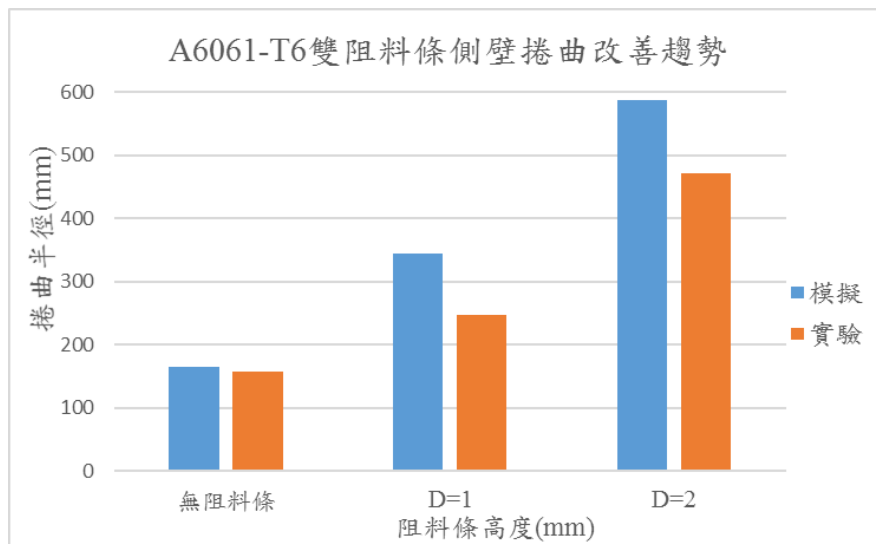


圖 5.30 雙阻料條實驗對 A6061-T6 側壁捲曲改善趨勢

5.2 鋁合金溫成形對回彈缺陷之影響

5.2.1 溫成形簡介

由於前述討論可得知鋁合金在冷成形方面遇到的破裂與回彈問題較嚴重，而在 5.1 節也討論到對於在冷成形情況下改善鋁合金的回彈而言，面臨到的限制也較高強鋼來的多，以阻料條設計方式來改善回彈現象容易造成破裂之風險。因此針對鋁合金成形方法，除了傳統室溫冷成形方式，另外還有熱成形(Hot forming)以及最近熱門的鋁合金溫成形製程(Warm forming)。本章節將探討鋁合金 A6061-T6 溫成形製程。

溫成形製程(Warm forming)為透過加熱板件使材料成形性變佳，同時成形過程降伏點降低將有助於抑制回彈。其中溫成形製程為附圖 5.29，首先將板材加熱至再結晶溫度以下再進行成形，最後進行水冷完成成形，其溫度歷程如圖 5.30。而文獻[30][42]分別探討 A6061-T6 在溫成形製程下成形性與回彈之影響，文獻[30]指出當 A6061-T6 加熱至 330°C 對成形性有提高之效果，而文獻[42]則使用圓環開口實驗進行回彈分析，指出 A6061-T6 在 200°C~250°C 之溫成形溫度範圍有助於提高成形性以及抑制回彈。因此本論文將探討溫成形溫度(150°C~350°C)對鋁合金回彈之影響性。



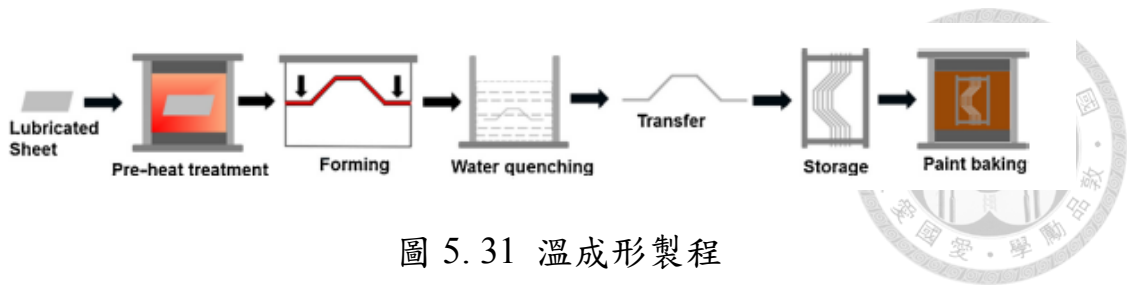


圖 5.31 溫成形製程

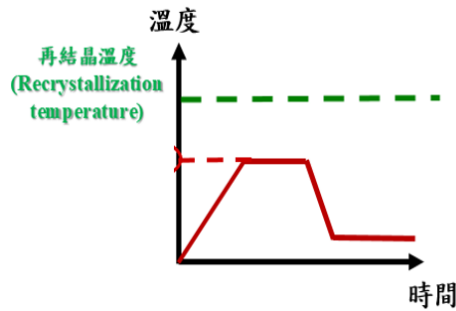


圖 5.32 鋁合金 A6061 溫成形溫度歷程

5.2.2 溫成形實驗平台建立與實驗流程

本研究之 V 型彎曲成形沖壓為建立在實驗室材料拉伸機 (MTS810) 之平台上，其中模具設計搭配介面熱傳實驗中所使用的通水路之冷卻塊，將可進行之實驗為板材之各溫度區間之冷、溫、熱成形，其中各模具部件為圖 5.31 所示，將其架設在實驗室材料拉伸機 (MTS810) 並可進行沖壓，如圖 5.32。其實驗流程為將板件放置加熱爐中加熱至欲探討溫度，由於析出強化之鋁合金板材如 A6061-T6 在高溫下持溫過久時間將導致強度下降，因此需考慮其加熱至溫度穩態時間，而加熱至溫度穩態時間則透過板材插入熱電偶放置加熱爐進行溫度量測，如圖 5.33，最後列出 150 度、250 度、350 度各自溫度歷程，如圖 5.34~圖 5.36，以及表 5.3 為達至三種溫度區間的溫度穩態時間。

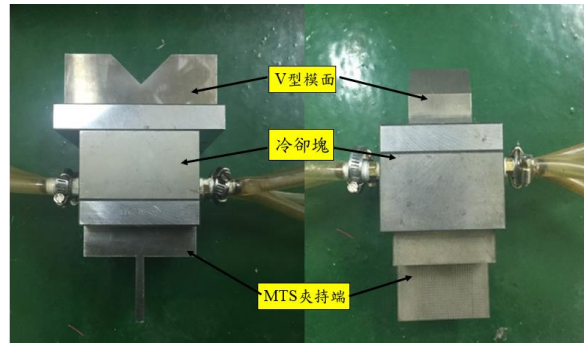


圖 5. 33 V 型彎曲實驗模具

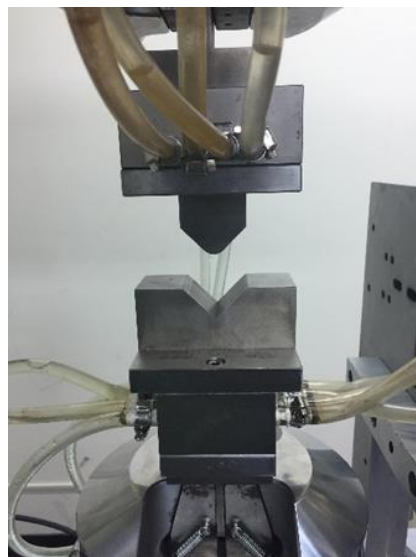


圖 5. 34V 型彎曲實驗模具架設於材料拉伸機圖



圖 5. 35 加熱爐與熱電偶量測板材升溫曲線

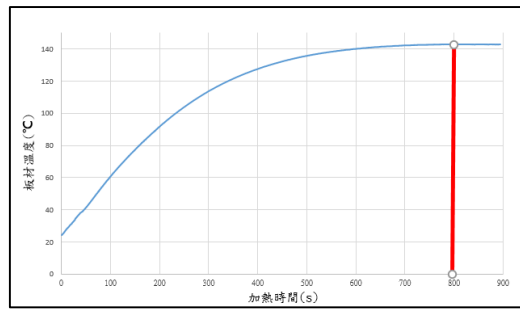


圖 5.36 150 度溫度歷程

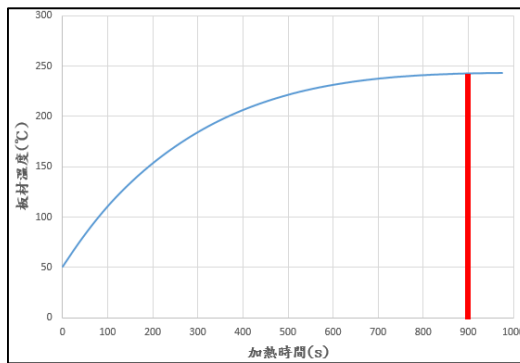


圖 5.37 250 度溫度歷程

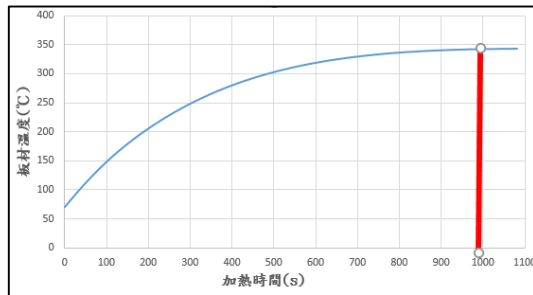



圖 5.38 350 度溫度歷程

表 5.3 三種溫度區間的溫度穩態時間

| 板材欲加熱溫度(°C) | 溫度達穩態時間(s) |
|-------------|------------|
| 150 | 800 |
| 250 | 900 |
| 350 | 1000 |



本論文於此節探討不同溫成形溫度下對應鋁合金板材回彈改善現象，採用上述建立之 V 型彎曲模具進行實驗，沖頭圓角分別選用最大圓角 R11 及 R6，溫度採用三種溫度區間，分別為 150 度、250 度、350 度，由本論文第四章 4.2.1 節之 V 型彎曲成形實驗可得知 A6061-T6 因強度較 A6061-O 高，其回彈角度明顯地比 A6061-O 來得嚴重，然而以汽車結構件應用需求而言，A6061-T6 較能滿足其強度需求，因此 A6061-T6 更有探討回彈改善之價值，故此節將針對 A6061-T6 進行溫成形實驗探討。預計比較 A6061-T6 在不同溫成形製程條件下，對回彈改善的趨勢，另外也將板件分成壓延方向平行板材長軸方向(longitude direction, LD)以及垂直板材長軸方向(transverse direction, TD)，探討壓延方向對溫成形角度的影響差異。如圖 5.37 為 V 型彎曲溫成形之實驗過程。實驗結束後，將實驗板件成品噴漆以利使用 GOM ATOS 進行逆向掃描，如附圖 5.38 及圖 5.39，最後將掃描檔案匯入 GOM Inspect 分析軟體，進行回彈角度之量測，如附圖 5.40，將可整理出 A6061-T6 在不同溫成形製程條件，對回彈改善的量值，將由下節進行細部之說明。



圖 5.39 V 型彎曲實驗過程



圖 5.40 V 型彎曲實驗板件成品

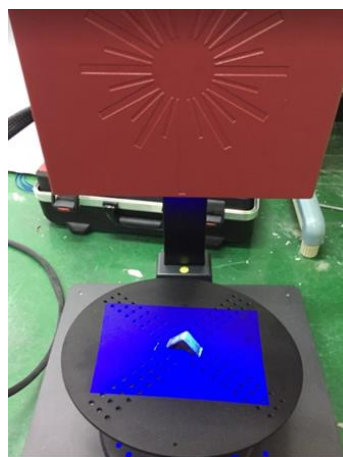


圖 5.41 GOM ATOS 逆向掃描

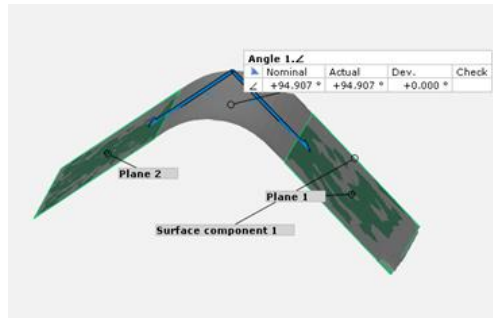


圖 5.42 GOM Inspect 回彈分析

5.2.3 溫成形實驗探討

如圖 5.41 為 A6061-T6 在 150 度與 350 度兩溫成形溫度條件下之 V 型彎曲溫成形結果，可以看出在 350 度的溫成形製程溫度下，側壁外開的角度明顯地比 150 度來得小，說明溫成形溫度愈高回彈改善效果也會提升的作用。最後整理鋁合金 A6061-T6 在 150 度、250 度與 350 度等三種溫成形溫度對回彈角度的改善趨勢，分別選取沖頭圓角 R11 與 R6 的沖頭進行溫成形，其結果如圖 5.42 以及圖 5.43，由上述結果可得知板材溫度升高可使得鋁合金板材 A6061-T6 其回彈改善，即為側壁外開的角度趨於變小。而比較板材壓延方向對應回彈之影響，可發現其回彈角度少有差異，差異量偏小，可視為 A6061-T6 板材壓延方向對 V 型彎曲溫成形較無影響性。最後由圖 5.42 為 A6061-T6 在沖頭圓角 R11 與 R6 之溫成形回彈改善比率，其中回彈改善比率定義為如下

$$\frac{\text{板材室溫下之回彈角度} - \text{板材溫成形溫度下之回彈角度}}{\text{板材室溫下之回彈角度}}$$

可得知沖頭圓角 R11 的溫成形條件下，雖然與沖頭圓角 R6 之條件在溫成形溫度 150 度時之回彈改善比率相同，但在 250 度與 350 度其回彈改善比率明顯地較沖頭圓角 R6 高，可推知在回彈角度較大的彎曲成形情況下，溫成形能改善回彈的程度較高。



圖 5.43 A6061-T6 在 150 度與 350 度之 V 型彎曲溫成形結果

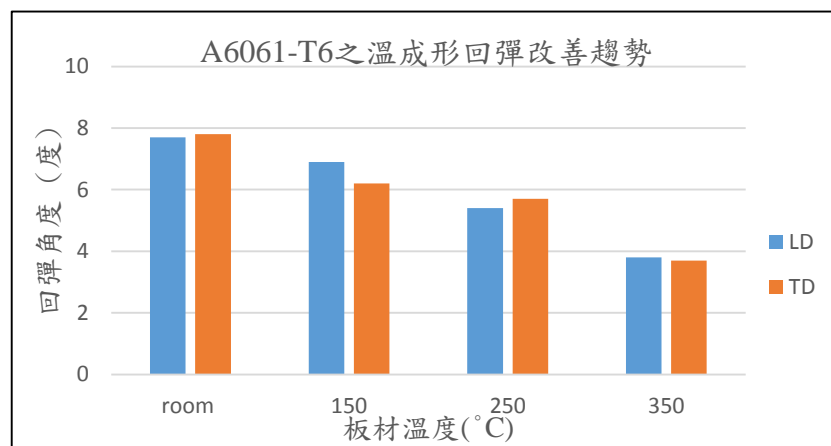


圖 5.44 A6061-T6 在沖頭圓角 R11 條件下溫成形回彈改善趨勢

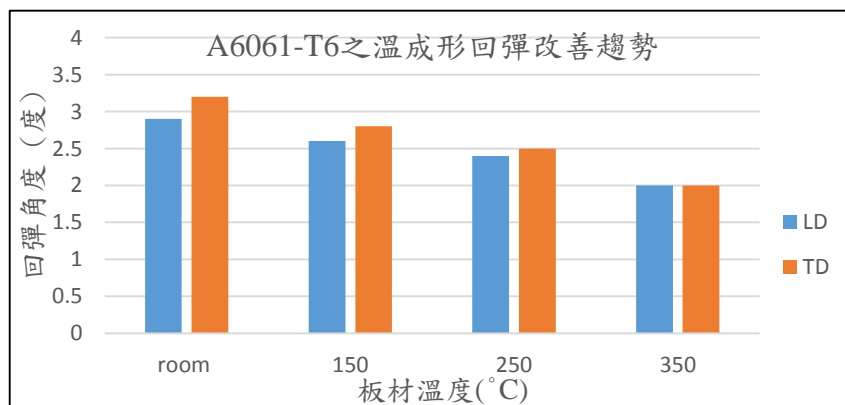


圖 5.45 A6061-T6 在沖頭圓角 R6 條件下溫成形回彈改善趨勢

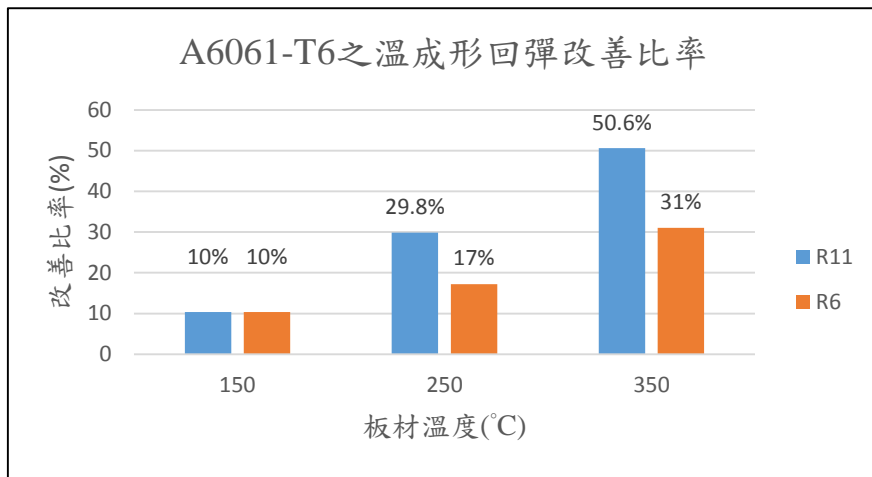


圖 5.46 A6061-T6 在沖頭圓角 R11 與 R6 溫成形回彈改善比率


5.3 小結

由上兩節可知可調式阻料條設計以及溫成形方法皆可改善鋁合金 A6061-T6 回彈缺陷，不過根據 5.1 節之阻料條設計流程，可以發現對於鋁合金 A6061-T6 而言，相對鋼材其阻料條設計容易使板材在成形過程中發生破裂現象，其可變動的阻料條高度與幾何尺寸較鋼材而言有限制。然而對照之下鋁合金溫成形卻不容易產生破裂的現象，因文獻[42]可知，溫成形製程可使得鋁合金 A6061-T6 的成形極限提升，另一方面也可以抑制回彈現象。

第六章 結論



由於汽車輕量化需求，鋁合金板件因其密度低為熱門材料之一。而汽車結構件考慮到成形性與強度因素較常使用 5 與 6 系列鋁板，本論文選用 A6061-O 與 A6061-T6 材料作為研究，其中 T6 熱處理為本論文參考規範進行之人工時效處理，並且後續進行材料性質之驗證，已確認本論文所使用之 A6061-T6 其材料性質與規範中雷同。後續進行 A6061-O 與 A6061-T6 相關之基礎材料試驗取得材料性質，並與鋼材 270 與先進高強鋼 590R 進行成形性相關比較，以探討鋁合金 A6061-T6 之成形性差於鋼材甚至先進高強鋼；而其回彈現象與先進高強鋼 590R 一樣嚴重。後續針對 A6061-O 與 A6061-T6 包辛格效應也與鋼材 270 與 590R 對比，得到 A6061-T6 包辛格指數收斂趨勢接近鋼材 270 而非先進高強鋼 590R。最後透過前述求得之材料性質建立鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之材料模型，包括 Hill48 與 Barlat91 等降伏準則搭配 Yoshida 硬化準則。使用求得之材料模型進行 V 型彎曲與 U 型帽狀引伸之模擬，並且搭配相對應之成形實驗進行模擬驗證，進而探討最適合鋁合金 A6061-O 與 A6061-T6 之材料模型。以 V 型彎曲而言，各材料模型預測之回彈量皆與實驗達到準確預測。而以 U 型帽狀引伸而言，則是以考慮到包辛格效應之 Yoshida 模型搭配



Hill48 或 Barlat91 兩材料模型對於預測 A6061-T6 側壁捲曲有著較準確的預測。後續本論文使用 Barlat91 搭配 Yoshida 模型進行探討鋁合金 A6061-T6 之回彈改善方法。使用姚順偉[29]的阻料條設計流程探討屬於鋁合金 A6061-T6 之阻料條設計，先探討合適的變壓料力範圍，同時與先進高強度鋼 1180 之變壓料力範圍相比，可得知鋁合金 A6061-T6 為避免破裂，其可選擇之變壓料力範圍遠比先進高強度鋼 1180 來的小。而後續轉換為阻料條設計流程得到一合適雙阻料條，可以分別改善最大沖頭圓角及最大母模圓角之 U 型帽狀引伸成形所造成之側壁捲曲現象，最後本論文透過可調式阻料條之 U 形帽狀引伸模具進行驗證上述側壁捲曲改善現象。另一方面本論文也探討鋁合金在溫成形製程條件下回彈改善的趨勢，使用 V 型彎曲溫成形實驗，得到 A6061-T6 在三溫度製程條件下的回彈改善角度，發現隨溫度升高，其回彈角度有變小的趨勢。並且依照沖頭圓角較大的彎曲成形，其回彈改善比率較大。

最後總結，本論文經由探討鋁合金 A6061 材料特性及與鋼材間成形差異，並且進行各材料模型之建立，應用在基礎載具進行實驗驗證，以得到適合鋁合金 A6061 之模擬分析模型。最後設計適合鋁合金 A6061 之阻料條造型以順利改善鋁合金嚴重之回彈現象，並且另外與鋁合金溫成形製程之回彈改善進行對比。

參考文獻



- [1] European Aluminum Association, (<https://www.european-aluminium.eu>)
- [2] European Aluminum Association, “Aluminium Cars –Unlockin the Light –Weighting Potential”
- [3] Ducker Worldwide, LLC. (www.ducker.com)
- [4] Drive Aluminum,(<http://www.drivealuminum.org/aluminum-101/driving-aluminum/>)
- [5] European Aluminum Association, ([https:// www.european-aluminium.eu/resource-hub](https://www.european-aluminium.eu/resource-hub))
- [6] European Aluminum Association, “The Aluminum Automotive Manual Applications - Car body - Body structures”.
- [7] AUDI AG, (www.audi.com/en.html)
- [8] P. Appendino, C. Badini, F. Marino, A. Tomasi, “6061 Aluminum alloy-SiC particulate composite: a comparison between aging behaviour in T4 and T6 treatments”, *Materials Science and Engineering*, A135, pp. 275-279, 1991.
- [9] P. Appendino, F. Marino, A. Tomasi, “Natural aging characteristics of aluminum alloy 6061 reinforced with SiC whiskers and particles”, *Materials Science arid Engineering*, pp. 99-107, 1991.
- [10]F. T. Chee, and M. R. Said, “Effect of Hardness Test on Precipitation Hardening Aluminium Alloy 6061-T6”, *Journal of Science*, pp276-286, 2009
- [11]P. Guillon, X. Roizard, P. Belliard, “Experimental methodology to

study tribological aspects of deep drawing-application to aluminum alloy sheets and tool coatings”, *Tribology International*, 34, pp757-766, 2001.

[12]W. Xu, X. Gao, B. Zhang, L. Yang, “Study on Frictional Behavior of AA 6XXX with Three Lube Conditions in Sheet Metal Forming,” *SAE Technical Paper*, 2018.

[13]F. Ozturk , E. Esener, S. Toros, C. R. Picu , “Effects of aging parameters on formability of 6061-O alloy”, *Materials & Design*, 2010

[14]V. K.Barnwal, R. Raghavan, A. Tewari ,K. Narasimhan, S. K. Mishra, ”Effect of microstructure and texture on forming behaviour of AA-6061 aluminium alloy sheet”, *Materials Science & Engineering*, pp56-65, 2017

[15]V. K. Barnwal, A. Tewari, K. Narasimhan, and S. K. Mishra, “Effect of plastic anisotropy on forming behavior of AA-6061 aluminum alloy sheet”, *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2016

[16]J. T. Gau, G. L. Kinzel, “A new model for springback prediction in which the Bauschinger effect is considered”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 43, pp.1813-1832, 2001.

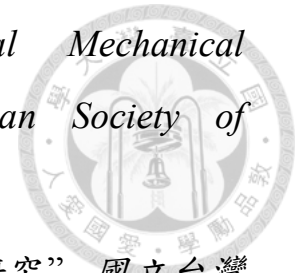
[17]O. O. Jr, “Springback in high strength anisotropic steel”, *6th International LS-DYNA Users Conference Simulation*, 2000

[18]T. Uemori, S. Sumikawa, T. Naka, N. Ma and F. Yoshida, “Influence of Bauschinger Effect and Anisotropy on Springback of Aluminum Alloy Sheets”, *Materials Transactions*, vol. 58, No. 6, pp. 921-926, 2017.

[19]F. Yoshida, T. Uemori and K. Fujiwara, “Elastic-plastic behavior of steel sheet under in-plane cyclic tension-compression at large strain”,

- International Journal of Plasticity*, Vol. 18, pp. 633–659, 2002.
- [20] F. Yoshida and T. Uemori, “A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation”, *International Journal of Plasticity*, vol. 18, pp. 661–686, 2002.
- [21] 蔡恒光, ”先進高強度鋼板反覆拉壓與雙軸拉伸變形特性之研究”,
國立台灣大學機械工程研究所博士論文, 2012.
- [22] F. Barlat, J. Lian, “Plastic behavior and stretchability sheet metals. Part I : A yield function for orthotropic sheets under plane stress condition”, *International Journal of Plasticity*, 5, pp. 51-66, 1989.
- [23] D. J. Lege, F. Barlat, J. C. Brem, “Characterization and modeling of the mechanical behavior and formability of A 2008-T4 sheet sample”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 7, pp. 549-563, 1989.
- [24] F. Barlat, D. J. Lege, J. C. Brem, “A six-component yield function for anisotropic materials”, *International Journal of Plasticity*, 7, pp. 693-712, 1991.
- [25] F. Barlat, J. C. Brem, J. Liu, “On crystallographic texture gradient and its mechanical consequence in rolled aluminum-lithium sheet”, *Scripta Metallurgica et Materialia*, 27, pp. 1121-1126, 1992.
- [26] H. Laurent, R. Greze, P. Y. Manach, S. Thuillier, “Influence of constitutive model in springback prediction using the split-ring test”, *International Journal of Mechanical Sciences*, 51, pp. 233-245, 2009.
- [27] R. Li and K. J. Weinmann, “Formability in Non-Symmetric Aluminium Panel Drawing Using Active Drawbeads”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 48, pp. 209-212, 1999.
- [28] Z. C. Xia and F. Ren, “An Investigation of Wall Curl Reduction

Through Post-Stretch Forming”, *International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers*, pp. 495-502, 2004.



[29]姚順偉, “先進高強度鋼板之沖壓成形回彈改善研究”, 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文, 2017.

[30]Z. Chen, G. Fang, and J. Q. Zhao,” Formability Evaluation of Aluminum Alloy 6061-T6 Sheet at Room and Elevated Temperatures”, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2017

[31]Material Property Data ,(<http://www.matweb.com/>)

[32]林建維, “鋁合金板件沖壓成形之研究”, 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文, 2011.

[33]GOM ATOS Core introduction ,(<https://www.gom.com/metrology-systems/atos/atos-core.html>)

[34]B. P. Justusson, D. M. Spagnuolo, and J. H. Yu, “Assessing the Applicability of Digital Image Correlation (DIC) Technique in Tensile Testing of Fabric Composites”, *Army research laboratory*, 2013

[35]W. Muhammad, “Measurement of Plastic Strain Ratio Using Digital Image Correlation”, *Journal of Testing and Evaluation*, 2017.

[36]R. Hill, “Constitutive modelling of orthotropic plasticity in sheet metals”, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 38, pp. 405-417, 1990.

[37]F. Barlat, J. C. Brem, J. W. Yoon, K. Chung, R. E. Dick, D. J. Lege, F. Pourboghrat, S. H. Choi, and E. Chu, “Plane stress yield function for aluminum alloy sheets-part1”, *International Journal of Plasticity*, vol.

- 19, pp. 1297-1319, 2003.
- [38]J. W. Yoon, F. Barlat, R. E. Dick, K. Chung, and T. J. Kang, “Plane stress yield function for aluminum alloy sheets—part2”, *International Journal of Plasticity*, vol. 20, pp. 495-522, 2004.
- [39]蘇昱竹, “先進高強度鋼板沖壓成形回彈現象之研究”, 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文, 2007.
- [40]V. K. Barnwal, R. Raghavan, A. Tewari, K. Narasimhan, S. K. Mishra, “Effect of microstructure and texture on forming behaviour of AA-6061 aluminium alloy sheet”, *Materials Science and Engineering*, vol. 679, pp. 56-65, 2017.
- [41]S. G. Xu, M. L. Bohn, and K. J. Weinmann, “Drawbeads in sheet metal stamping-A review”, *SAE Technical Paper*, 1997.
- [42]V. Simões, H. Laurent, M. Oliveira, and L. Menezes, “The influence of warm forming in natural aging and springback of Al-Mg-Si alloys”, *International Journal of Material Forming*, pp. 57–68, 2018
- [43]鄭耀偉, “高溫摩擦試驗設備改良與熱沖壓摩擦特性研究”, 國立交通大學機械工程學系碩士論文, 2018
- [44]J. Hardell, B. Prakash, Kurt Steinhoff, “High Temperature Tribological Studies on Surface Engineered Tool Steel and High,” *Metal Forming*, pp. 665-670, 2009.

