



## 複雜中空截面鋁擠型成形模擬分析與表面條紋缺陷研究 Complex-Shaped Hollow Cross-Section Aluminum Extrusion Process Simulation Analysis and Surface Streaks Defect Study

張翔<sup>1</sup>、王宸興<sup>1</sup>、陳周富<sup>2</sup>、張正儒<sup>2</sup>、莊家誠<sup>2</sup>、陳復國<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 國立臺灣大學工學院機械工程學系

<sup>2</sup> 啟鑫科技股份有限公司

\*E-mail: hsiangchang518@gmail.com

### 摘要

全球暖化問題日益嚴重，輕量化技術已成為減碳的重要策略。鋁合金因具備輕量、高強度與優良加工性，在各產業獲得廣泛應用。然而，鋁擠型材於生產過程中常出現表面條紋缺陷，影響品質且難以控制，不僅削弱外觀穩定性，也增加後續加工成本。為解決此問題，本研究運用 DEFORM-3D 有限元素分析軟體並搭配材料性質實驗，探討條紋缺陷成因並提出改善對策。模擬結果顯示，條紋主要出現在肉厚變化與肋骨區，與局部高溫集中及表面應力異常密切相關。材料分析發現，條紋區晶粒缺乏方向性、低角度晶界比例偏低、硬度較小且表面粗糙，顯示與微觀結構及加工歷程異常高度關聯。調整製程參數如盛錠筒溫度、擠壓桿速度與胚料預熱溫度，可使溫度分布更均勻，降低高溫集中現象，提升成形穩定性。本研究亦依模擬結果與實務經驗提出模具優化建議，如延長工作帶減少局部升溫、調整模具內部結構以降低表面應力交互變化引發的缺陷。綜合模擬與實驗結果，成功建立條紋缺陷成因與改善機制的連結，對提升型材外觀品質、穩定初次良率及降低重工成本具實用價值。

**關鍵詞：**鋁合金擠製成形、表面條紋缺陷、有限元素分析、材料性質分析、製程參數調整

### Abstract

As global warming intensifies, lightweight technology has emerged as a key strategy for carbon reduction. Aluminum alloys, with their low weight, high strength, and excellent workability, are widely adopted across various industries. However, surface streak defects frequently occur during the extrusion process of aluminum profiles, posing significant challenges in quality control by compromising surface consistency and increasing post-processing costs. To address this issue, this study utilizes DEFORM-3D finite element analysis software in conjunction with material property experiments to investigate the causes of surface streaks and propose improvement measures. Simulation results indicate that the defects primarily occur in regions of wall thickness variation and rib structures, and are closely related to localized overheating and surface stress anomalies. Microstructural analysis reveals that streaked regions exhibit low grain orientation, a reduced proportion of low-angle grain boundaries, lower hardness, and rougher surface finish, indicating a strong correlation with abnormal microstructures and processing history. Adjusting process parameters—such as billet container temperature, ram speed, and billet preheating—helps achieve more uniform temperature distribution and mitigates localized thermal concentration, thereby enhancing forming stability. Based on both simulation findings and industrial experience, this study



also recommends mold design optimizations, including extending the bearing length to reduce localized heating and modifying internal mold geometry to alleviate surface stress fluctuations. By integrating simulation and experimental insights, the study establishes a clear link between defect formation mechanisms and practical solutions, contributing to improved surface quality, higher initial yield rates, and reduced rework costs in aluminum profile extrusion.

Keywords: Aluminum alloy extrusion, surface streaks defect, finite element analysis, material property analysis, process parameter adjustments

## 第一章 緒論

### 1.1 研究背景與目的

近年來，全球暖化日益嚴重，輕量化技術成為減少碳排放的重要手段。鋁合金因具備重量輕、強度高、延展性佳、耐腐蝕性強，且具有良好的導熱與導電性及優異加工性，已成為國際間主要的環保金屬，廣泛應用於運輸工具、醫療器械、建築材料、3C 電子及機械五金等領域。鋁擠製成形是一項關鍵的金屬加工技術，能將胚料經由模具擠出成具有特定橫截面輪廓的型材，尤其適用於製作複雜截面的中空產品，不僅成形精度高，也適合大量生產。

然而，鋁擠型材於初次成形時常伴隨表面、結構及尺寸上的缺陷，其中條紋缺陷尤為業界關注，亦是最難掌控的問題之一，無論為實心型材（圖 1.1）或中空型材（圖 1.2）皆可能出現。該缺陷多於陽極處理後顯現，表面條紋顏色明顯異於周圍區域，呈現更亮或更暗。根據業界經驗，其可能與胚料純度、模具設計、製程參數設定及後處理方式不當有關。目前主要仰賴經驗法則，透過調整製程參數以減少或消除此類缺陷。



圖 1.1 實心型材條紋缺陷



圖 1.2 空心型材條紋缺陷

條紋不僅降低產品外觀一致性，也提高後續加工成本，對產品競爭力造成不利影響，因此穩定初次成形良率便成為關鍵。本研究旨在釐清條紋缺陷的成因，並提出可行的改善方案，有助於提升產品表面品質、優化製程效率並降低整體成本，使研究成果兼具學術意義與實務價值。

### 1.2 研究方法與步驟

本研究依據實際製造流程與業界經驗，建立鋁合金中空擠製成形之電腦模擬分析技術，研究流程如圖 1.3 所示。內容包含建立 3D 擠製模具、設定環境條件與製程參數，並將模擬結果與實際擠製產品進行對照，以驗證模擬準確性。進一步觀察型材微觀組織與機械性質，結合模擬分析探討缺陷成因，並嘗試調整製程條件，提出具實用性的建議，協助業界節省試模成本、提升製程穩定性與產品良率。

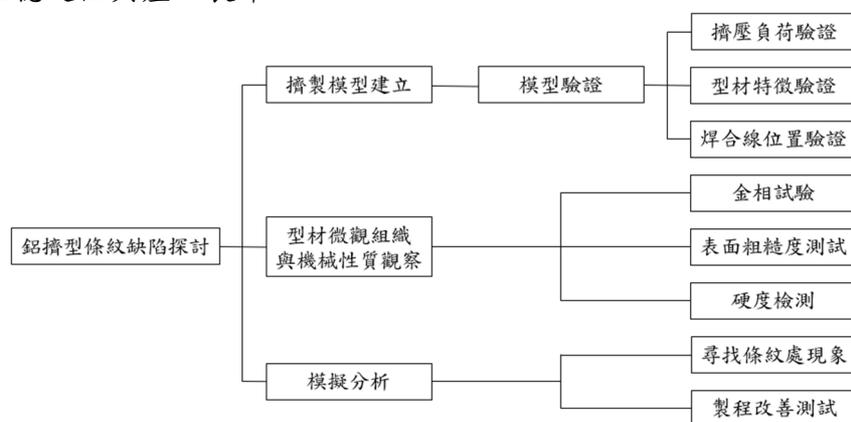


圖 1.3 研究流程圖

## 第二章 鋁擠型擠製模型建立

### 2.1 鋁擠製有限元素模型建立

為深入了解實際擠製過程中胚料於模具內部的流動行為、焊合線於型材中的位置、擠出後型材的外觀與內部狀態對條紋缺陷的影響，本研究採用 DEFORM-3D 有限元素分析軟體進行模擬。材料部分以雙曲線正弦函數建立 AA6063 合金材料卡，並根據擠型廠商提供之實際製程參數，在熱擠製條件下設定模具與胚料的初始溫度。作動方式採用直接擠製法，使胚料於中空平面分流舷窗模中進行模擬成形，進而觀察整體流動與變形特性。

#### 2.1.1 3D 擠製模型建立

本研究根據合作廠商提供的模具 2D 圖面(圖 2.1)，以 AutoCAD 沿擠製方向拆分為數個圖層，並匯入 CATIA 進行三維建模，完成中空型材平面分流舷窗模具的 3D 模型建立。

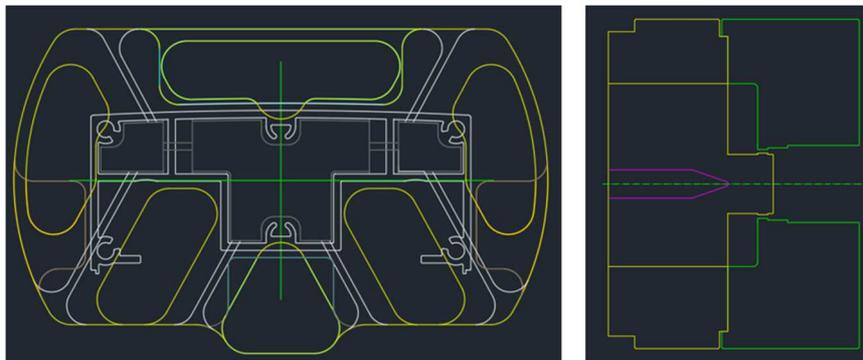


圖 2.1 擠製模具 2D 圖面 (左) 分流模孔位配置 (右) 模具裝配

繪製部件為擠壓桿(Ram)、胚料(Billet)、盛錠筒(Container)、分流模具(Porthole Die)與焊接模具(Welding Die)，這些部件的相對位置爆炸圖如圖 2.2 所示。

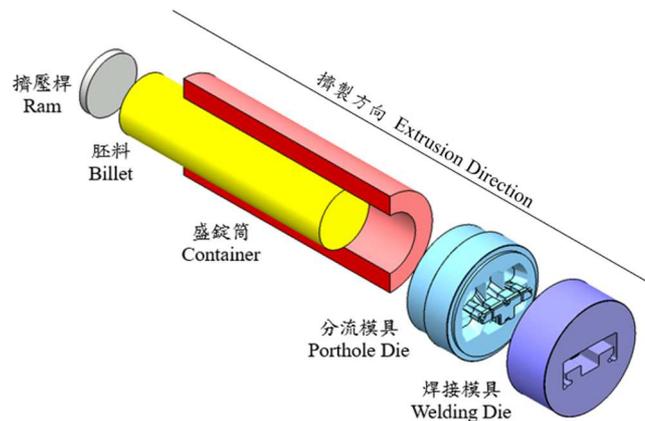


圖 2.2 物件相對位置爆炸圖

#### 2.1.2 DEFORM 前處理模組設定

由於模具與型材幾何結構具左右對稱性，本模擬採用半模型進行分析，並以 Y 軸作為擠製方向。根據實際製程順序，依序將模型匯入 DEFORM，胚料設定為塑性體，擠壓桿、盛錠筒、分流模具與焊接模具則視為剛體，如圖 2.3 所示，構成完整的中空型材擠製成形半模型，

進行後續模擬分析之基礎建構。

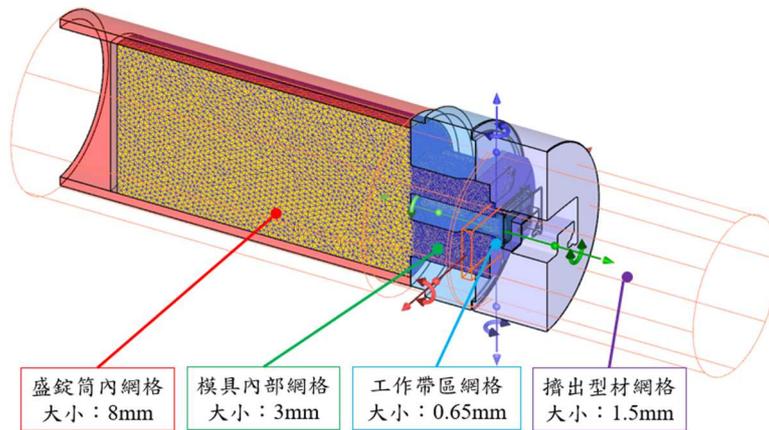


圖 2.3 中空型材擠製成形半模型

### 第三章 鋁擠型擠製模擬實務驗證

在完成擠製製程模擬建構後，本章旨在透過實際生產資料驗證模擬結果的準確性。驗證方法除比對模擬與實際生產之擠壓力負荷外，亦觀察中空型材的焊合線特徵與變形形貌，藉此確認模擬模型的可信度與實用性。

#### 3.1 擠壓負荷驗證

利用 DEFORM 所提供的 Load/Stroke Graphs 功能，取得擠壓桿負荷對行程之變化曲線，如圖 3.1 所示。由圖可見，半模型最高負荷約為 1280 噸，換算成全模型約為 2560 噸，此數據與合作廠商實際生產時之最大擠壓負載約 2500 噸極為接近，顯示本模擬模型在負荷預測方面具相當準確度。

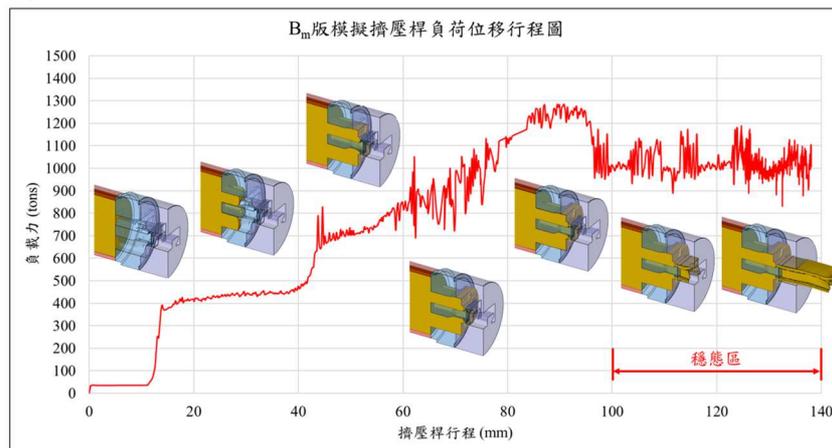


圖 3.1 半模型擠壓桿之負荷位移行程圖

#### 3.2 型材變形特徵驗證

型材初期擠出時，因摩擦、溫度分布及模具結構設計等因素，料頭會產生特定變形形貌，業界通常藉此判斷模具流動均勻性與成形穩定性。本研究取得合作廠商提供之實際生產型材料頭照片，並與模擬結果進行比對，如圖 3.2 所示。模擬中型材料頭變形趨勢與實際觀察幾乎

一致，顯示本模擬具預測型材初期流動與變形行為之能力。

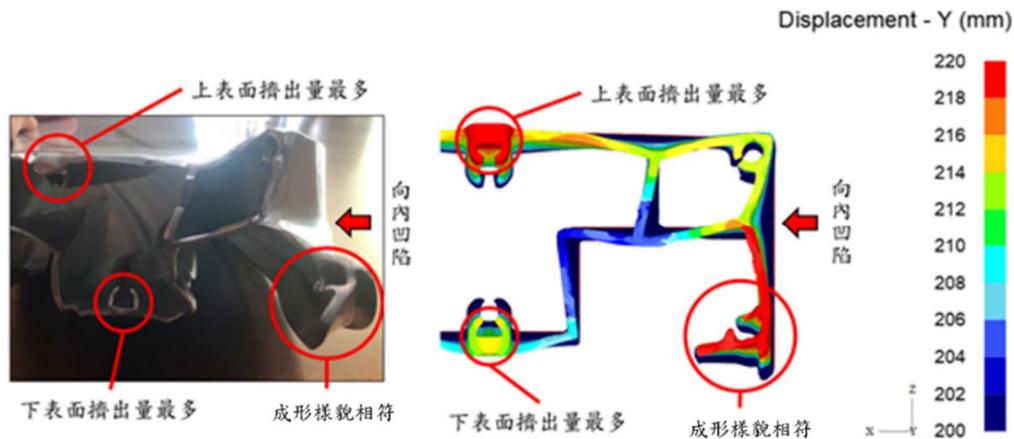


圖 3.2 料頭截面方向特徵成形樣貌比對

### 3.3 焊合線位置驗證

為驗證模擬預測的焊合線位置是否準確，本研究參考相關文獻設計驗證程序，將擠製型材依指定尺寸進行裁切，並透過化學浸蝕法揭露縱向焊合線。實驗結果顯示，模擬所得焊合線位置與實際量測結果高度一致，誤差皆在 1mm 以內，如圖 3.3 所示，進一步證實模型對焊合現象具高準確度，適用於實務預測與製程優化。

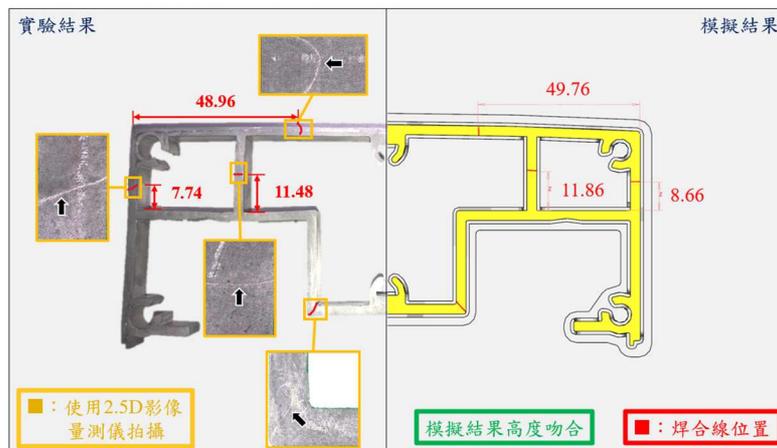


圖 3.3 模擬結果與實驗量測結果比對圖

## 第四章 型材微觀組織觀察與機械性質檢測

為釐清條紋缺陷是否與型材之微觀組織結構或後續加工方式有關，本章針對實際生產型材進行金相分析、表面粗糙度量測與硬度測試，並應用電子背向散射繞射（EBSD）技術觀察顯微結構，進一步比對條紋與正常區域之機械性質差異，以判定條紋缺陷的潛在成因。

### 4.1 型材條紋位置

針對合作廠商所提供之陽極處理後具明顯條紋缺陷之型材進行實地觀察與量測，發現在距邊角約 33mm 處及型材中間肉厚變化區位置皆出現連續直條紋，33mm 處亦對應至肋骨部

位，其兩側伴隨不連續彎曲條紋（圖 4.1）。

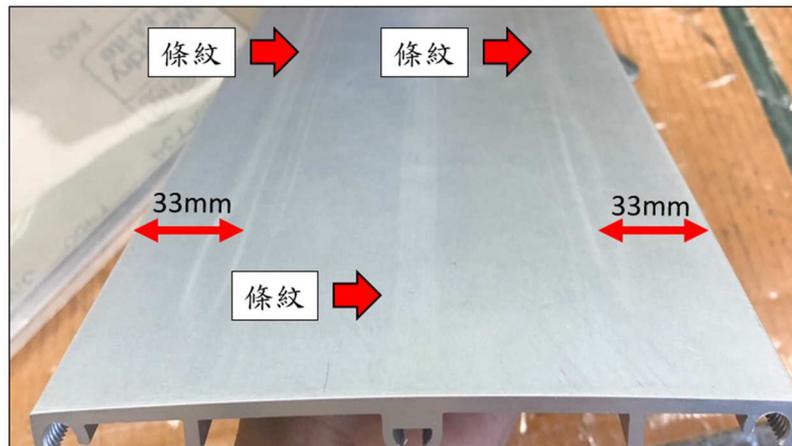


圖 4.1 型材條紋缺陷

綜合文獻資料，Deng 等人[1]、Zhu 等人[2]與 Walker[3]皆指出條紋多發生於型材肉厚變化處，此觀察結果與本研究相符，顯示條紋缺陷並非隨機出現，而是由結構特徵與成形過程所引發的可預測現象。

## 4.2 金相試驗

Zhu 等人[4]指出，型材於陽極處理時因晶粒被蝕刻形成晶界凹槽，若凹槽分布不均，便會產生明顯條紋，雖晶粒大小非主因，然當晶粒較細時凹蝕現象更顯著。Yu[5]與 Chen[6]發現焊合區常出現晶粒細化，Güzel[7]與 Donati[8]則發現晶粒尺寸會隨塑性應變增大而縮小，並隨擠壓速度上升而略有成長。

本研究據此推論條紋可能與晶粒組織相關，透過金相試驗觀察各區晶粒大小與排列方向，藉以推斷條紋形成之微觀結構機制。

### 4.2.1 EBSD 實驗製備

本為獲得條紋區更細緻之顯微組織資訊，本研究應用 EBSD 技術，依據條紋出現分布區域，將型材試片分為焊合區、肋左區、肋骨區、肋右區、正常區、條紋臨界區（正常區與肉厚變化區各佔 50%）及肉厚區，如圖 4.2 所示。

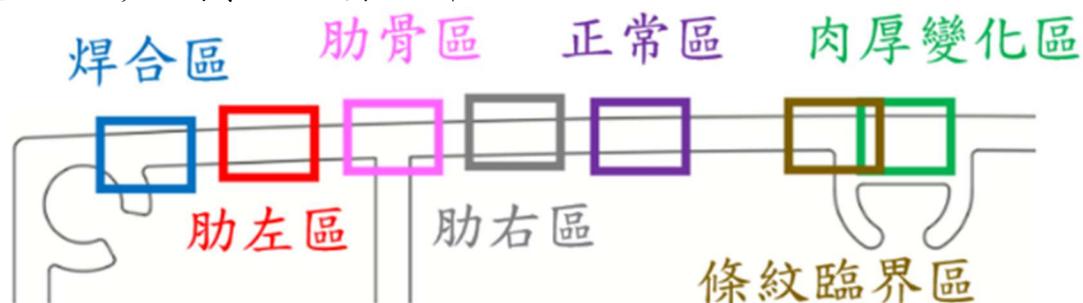


圖 4.2 試片擷取區域

### 4.2.2 EBSD 分析結果

EBSD 反極圖 (Inverse Pole Figure, IPF) 用以呈現晶粒方位分布，不同顏色對應不同晶體取向。從圖 4.3 可觀察各試片區晶粒大小與排列方向略有差異，未出現條紋之焊合區與正常

區中，低角度晶界 ( $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ) 比例明顯較高，晶粒排列亦較有方向性。

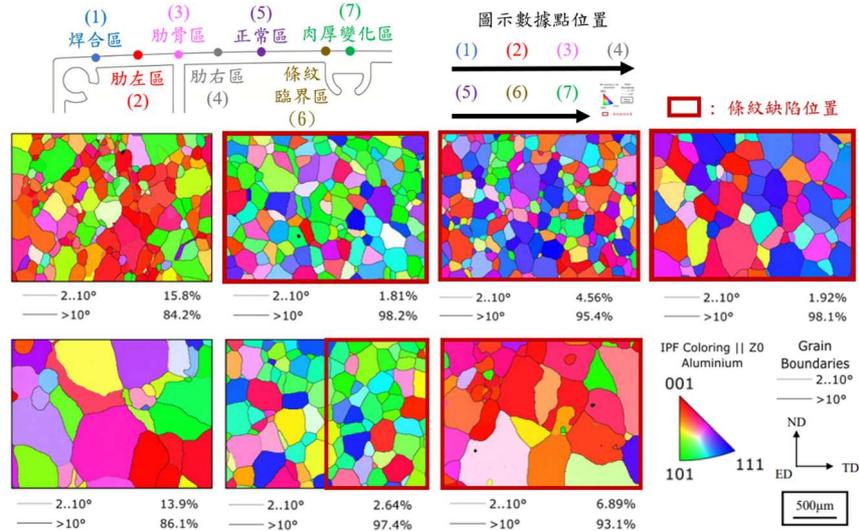


圖 4.3 EBSD-B<sub>m</sub> 版表面試片 IPF 圖

進一步以截線法與等效圓直徑法計算平均晶粒尺寸，發現條紋區與正常區間晶粒大小差異不顯著，各區皆含細晶粒分布，與文獻所述一致，證實 Zhu 等人[4]晶粒尺寸並非主要影響條紋形成之因素。

極圖 (Pole Figure, PF) 則用以顯示晶粒方位集中程度，圖 4.4 顯示，焊合區於  $\langle 100 \rangle$  方向、正常區於  $\langle 551 \rangle$  方向呈現顯著方位集中，為高密度織構區域，而條紋區方向性則較分散，顯示晶體排列混亂，可能導致陽極後光澤不均現象。

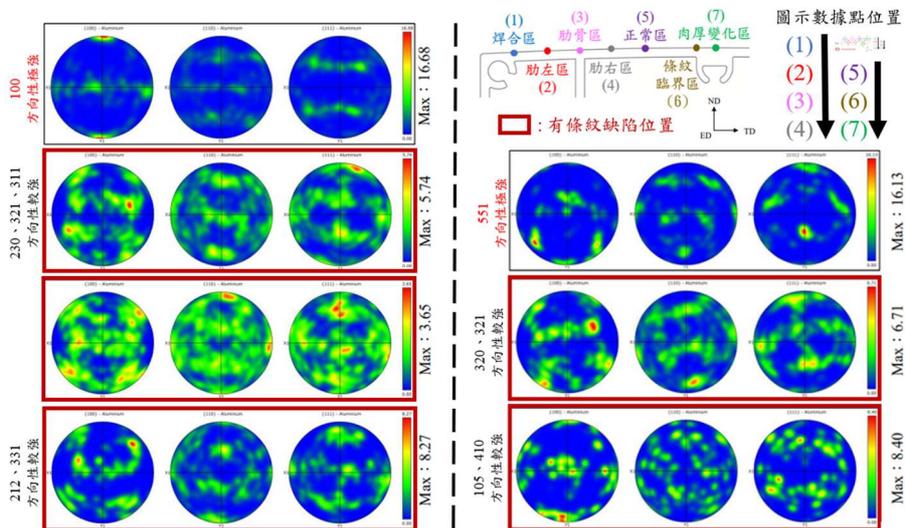


圖 4.4 EBSD-B<sub>m</sub> 版表面試片 PF 圖

### 4.3 表面粗糙度測試

Voort[9]等人指出，由於高變形區域與相鄰低變形區域在表面粗糙度上存在差異，導致陽極處理後的擠壓件表面產生亮度不一的條紋缺陷。Park[10]等人亦發現，條紋缺陷區域的表面粗糙度相較於無缺陷區域顯著較高，該區域表面光澤的變化源自光的漫射特性改變，此為產生條紋缺陷的主要原因之一。

本研究針對陽極處理後出現條紋缺陷之型材進行再次研磨試驗，於缺陷位置使用 800 目

1500 目與 2500 目砂紙研磨約 50 至 60  $\mu\text{m}$  深度後再進行陽極處理，如圖 4.5 所示。

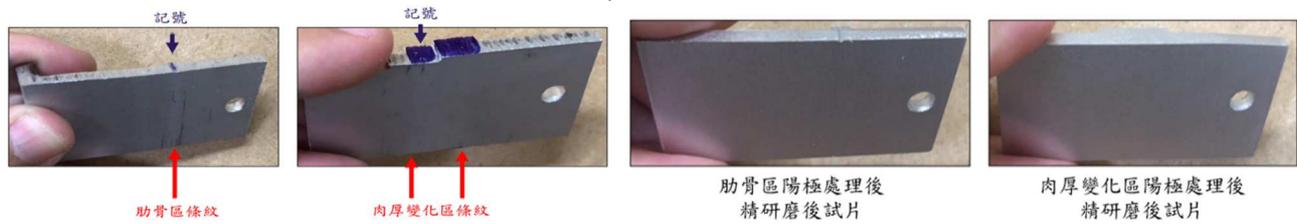


圖 4.5 型材陽極處理後精研磨後試片

結果顯示肋骨區與肉厚變化區未再出現條紋現象，這表明在條紋缺陷處使用較高目數砂紙再次進行微量深度的研磨，確實能有效消除條紋缺陷，進一步說明條紋的產生與型材表面粗糙度及後續研磨加工過程具有相關性。

#### 4.4 硬度檢測

Zhu 等人[4]與 Asensio-Lozano [11]等研究指出  $\text{Mg}_2\text{Si}$  析出物會影響晶界凹槽的形成與嚴重程度，進而改變光線漫射導致陽極氧化鋁型材表面出現條紋。

由於  $\text{Mg}_2\text{Si}$  析出會強化材料，為檢測型材上是否存在  $\text{Mg}_2\text{Si}$  析出物，本研究採用硬度測試進行驗證，針對肋左區、肋骨區、肋右區及肉厚變化區有缺陷試片與正常區試片進行比較。每區選取 26 個測量點，測量點間距為 5 個壓痕長度，並移除頭尾較大與較小的三個異常值，保留 20 點數據作為參考並計算平均值。測量結果如表 4.1 所示，數據顯示正常區硬度顯著高於有條紋缺陷區域。

表 4.1 型材硬度量測

型材硬度量測(HV)					
量測點	肋左區	肋骨區	肋右區	正常區	肉厚變化區
平均值	65.37	68.00	63.13	76.45	64.96
最大值	72.6	72.2	69.0	91.3	68.9
最小值	57.8	64.0	57.1	69.8	61.7
標準差	4.8	2.4	3.8	5.1	2.0

## 第五章 擠製模擬中形成條紋缺陷的因素分析

在驗證完擠製製程模擬後，為觀察實際條紋於擠製成形中與正常區域之差異，本研究結合材料實驗所得現象，探討各項製程條件與模具設計對型材表面條紋之影響。

### 5.1 模擬中條紋處現象

為找出條紋缺陷成因，本研究在模擬後處理中觀察條紋缺陷處之等效應力、等效應變、溫度場（圖 5.1）及三個方向之正向應力（圖 5.2）。結果顯示型材於擠出成形過程中無條紋缺陷之焊合區與正常區表面應變較大，對應實驗中圖 4.4 所示方向性極強的現象；肉厚變化區溫度場呈現較高溫度，這說明沿擠製方向該區冷卻速率較慢，Sun 等人[12]實驗發現隨冷卻速率降低  $\text{Mg}_2\text{Si}$  顆粒尺寸增加，據此推測本研究型材肉厚變化區  $\text{Mg}_2\text{Si}$  顆粒尺寸較大，此結果與 Asensio-Lozano [11]指出條紋區  $\text{Mg}_2\text{Si}$  顆粒尺寸較大相呼應；同時也發現肋骨區條紋在 X

方向（垂直擠製方向）表面應力呈現壓縮應力。

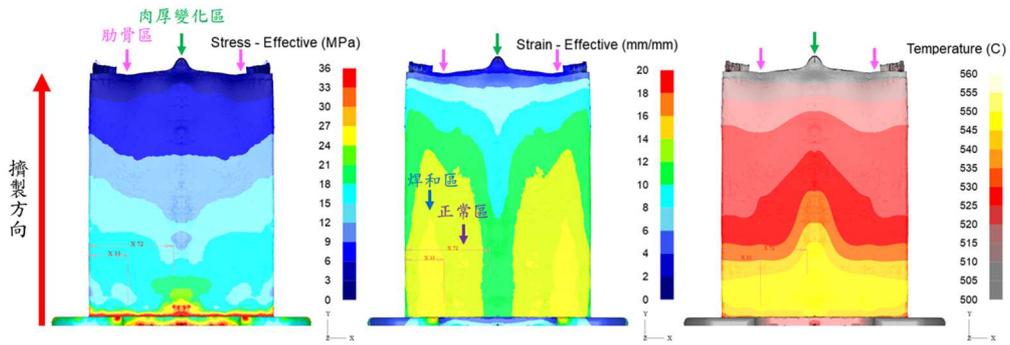


圖 5.1 型材模擬 (左)等效應力 (中)等效應變 (右)溫度

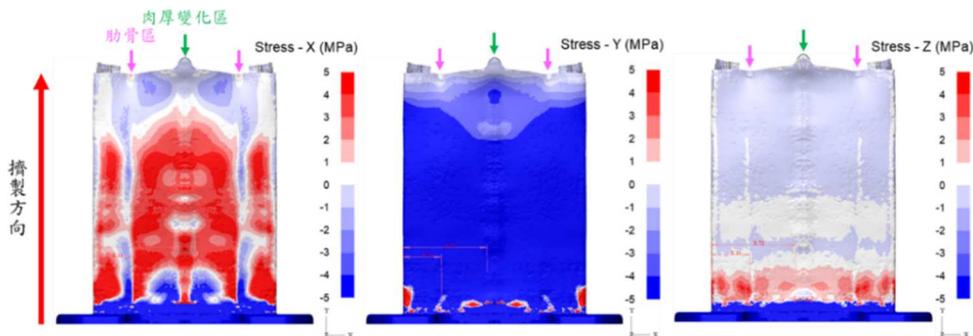


圖 5.2 型材模擬 (左)X 方向 (中)Y 方向 (右)Z 方向應力

## 5.2 模具設計與製程方法修改的影響

為探討模具設計與製程方法之影響，本論文將 B 版與 B<sub>m</sub> 版模具在相同機台下進行製程參數交叉分析。模具主要差異如圖 5.3 所示，比較四個模型中型材擠出約 120 毫米時之等效應變、溫度及 X 方向應力。製程參數差異如表 5.1，模擬交叉分析方式如表 5.2 所示。

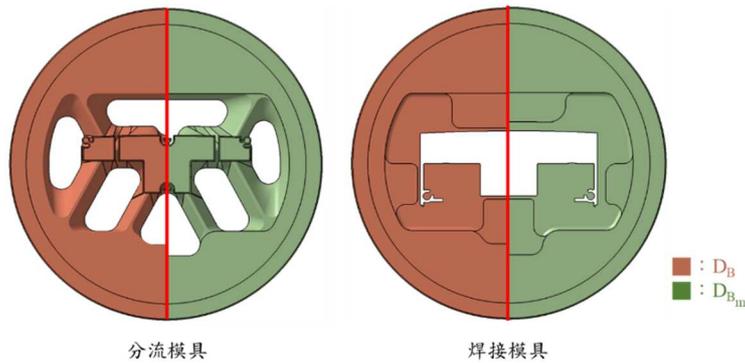


圖 5.3 B 版模具更改前後比對

表 5.1 B 版與 B<sub>m</sub> 版模具製程參數差異

模具版本	B版	B <sub>m</sub> 版
胚料初始溫度	530°C	480°C
擠壓桿、盛錠筒初始溫度	400°C	420°C
擠壓桿速度	4mm/s	5mm/s

表 5.2 B 版與 B<sub>m</sub> 版模具與製程參數交叉分析

製程方法 \ 模具版本	D <sub>B</sub>	D <sub>B<sub>m</sub></sub>
	P <sub>B</sub>	D <sub>B</sub> -P <sub>B</sub>
P <sub>B<sub>m</sub></sub>	D <sub>B</sub> -P <sub>B<sub>m</sub></sub>	D <sub>B<sub>m</sub></sub> -P <sub>B<sub>m</sub></sub>

應變場比較如圖 5.4，隨製程參數調整，整體型材表面應變增加，隨模具設計修改，型材表面應變略增且肋骨區向肉厚變化區應變發生變化。

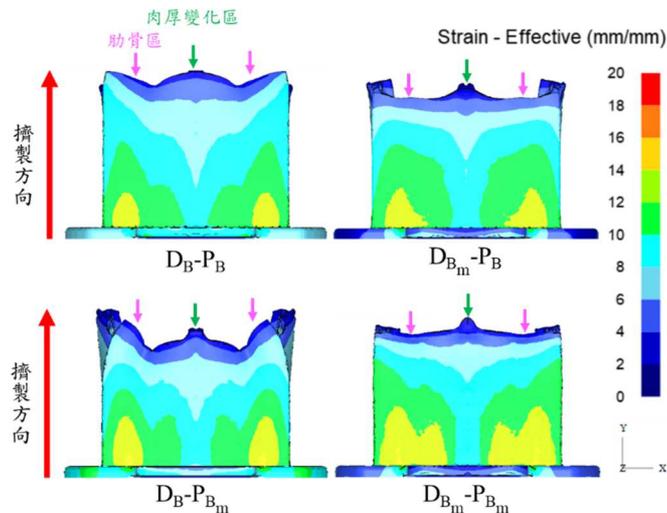


圖 5.4 B 版與 B<sub>m</sub> 版交叉分析之溫度變化

溫度場比較如圖 5.5，隨製程參數調整，型材表面溫度上升，模具設計修改亦使表面溫度上升且肉厚變化區呈現較高溫現象。

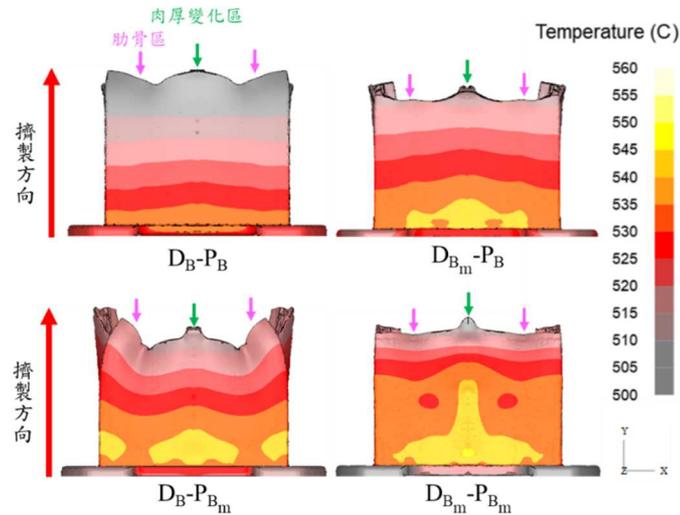


圖 5.5 B 版與 B<sub>m</sub> 版交叉分析之溫度變化

X 方向應力場比較如圖 5.6，隨製程參數與模具設計調整，整體型材表面 X 方向拉伸與壓縮應力變化顯著，其中模具設計修改變化較劇烈，例如外側拉伸應力轉為壓縮應力。

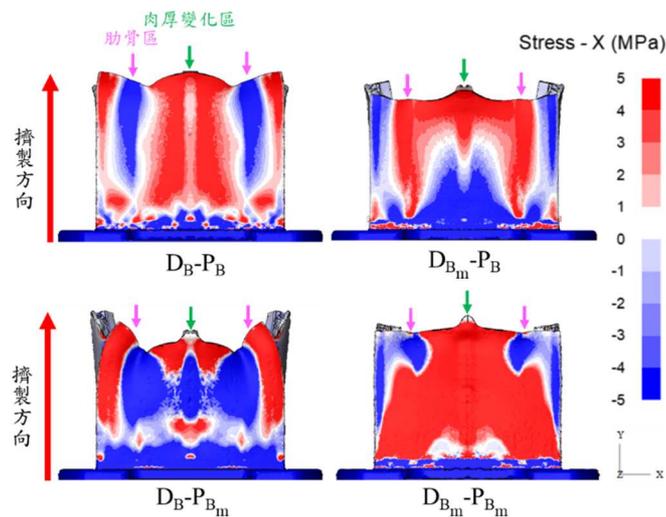


圖 5.6 B 版與 B<sub>m</sub> 版交叉分析之 X 方向應力變化

綜合交叉分析結果得知，製程參數調整與模具設計修改對型材擠製過程中等效應變與溫度呈現規律性變化。觀察兩版實際型材條紋缺陷變化並與分析比對，發現 B<sub>m</sub> 版肉厚變化區條紋生成與集中高溫現象相關，B 版與 B<sub>m</sub> 版肋骨區條紋位置偏移推測與 X 方向拉伸及壓縮應力變化有關，兩者可能為導致 B<sub>m</sub> 版型材良率降低之主要原因。

### 5.3 製程數值分析

根據上節之研究發現，推測缺陷發生於高溫集中及拉伸與壓縮應力變化處，所以本論文嘗試在不更動模具結構的情況下，以 Saha[13]、劉靜安[14]、趙雲路[15]等人撰寫之擠製相關參考書與乙模具廠商實務經驗建議的製程參數進行缺陷改善分析。在實際生產過程中，廠商大多以調整擠壓桿速度、胚料初始溫度與盛錠筒溫度做調整，本論文模擬型材擠出約 100mm 時進入穩態，因此設定模擬於擠出約 200mm 時做為比較標準，並更改上述三個製程參數做單

因子分析，下表 5.3 為文獻建議值與本論文製程比較。

表 5.3 文獻建議值與本論文製程比較

參考來源	型材出口速度	胚料初始溫度	盛錠筒溫度
[13]	35-80 m/min	500-540°C	450-470°C
[14]	8-100 m/min	400-510°C	380-460°C
[15]	8-100 m/min	400-510°C	380-500°C
乙模具廠商	依料頭樣貌調整	460-510°C	390-440°C
本論文製程	3-3.6 m/min	530°C	420°C

### 5.3.1 擠壓桿速度分析

表 5.3 顯示本論文型材出口速度與建議值存在較大差異，由於擠壓桿速度提升會增加擠壓機台負荷，在機台限制條件下，設計分析擠壓桿速度為 4mm/s、5mm/s 與 6mm/s 之差異。由圖 5.7 與圖 5.8 得知，型材溫度隨擠壓桿速度提升而上升，肉厚變化區在擠製出口位置出現固定異常高溫，導致該區降溫較慢。X 方向應力則無明顯規律變化，但肋骨區 X 方向拉伸與壓縮應力呈現交互變化。

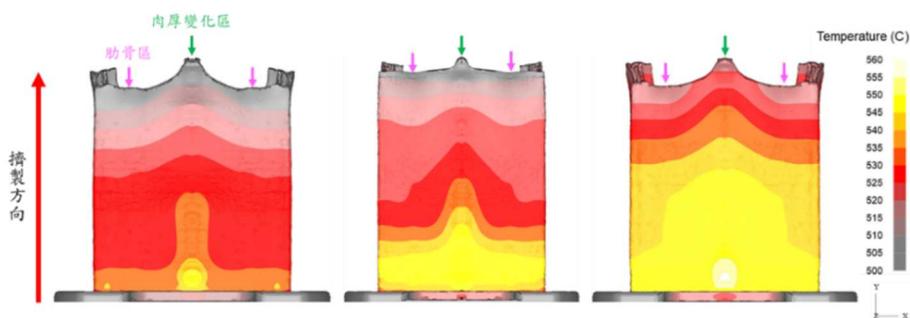


圖 5.7 不同擠壓桿速度下型材之溫度分布 (左) 4mm/s (中) 5mm/s (右) 6mm/s

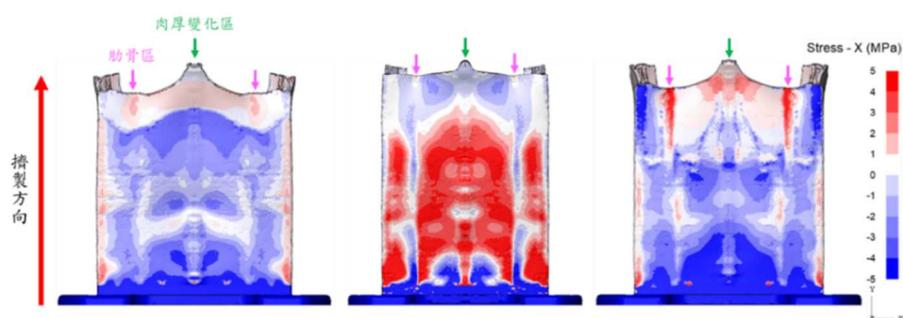


圖 5.8 不同擠壓桿速度下型材之 X 方向應力 (左) 4mm/s (中) 5mm/s (右) 6mm/s

### 5.3.2 胚料初始溫度分析

表 5.3 顯示本論文胚料初始溫度接近建議值上限，依據參考文獻建議，本研究以 40°C 為級距分析胚料初始溫度於 450°C、490°C 及 530°C 之差異。由圖 5.9 與圖 5.10 可見，隨胚料初始溫度上升，型材溫度亦同步增加，肋骨區 X 方向拉伸與壓縮應力呈現交互變化。

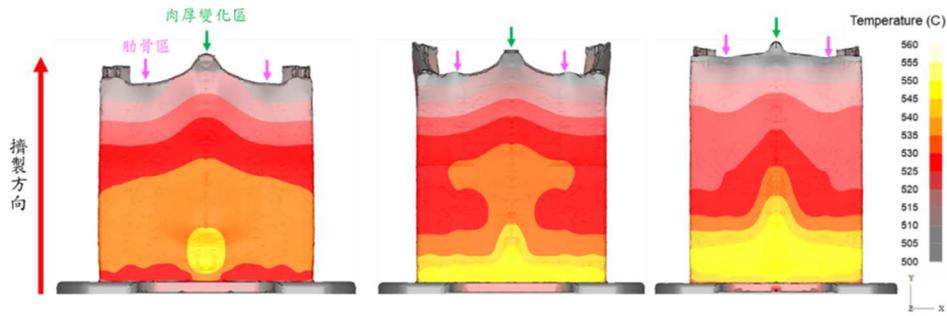


圖 5.9 不同胚料初始溫度下型材之溫度分布 (左) 450°C (中) 490°C (右) 530°C

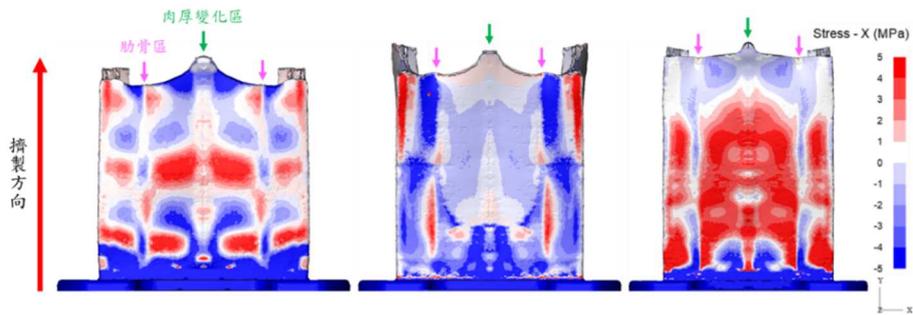


圖 5.10 不同胚料初始溫度下型材之 X 方向應力 (左) 450°C (中) 490°C (右) 530°C

### 5.3.3 盛錠筒溫度分析

表 5.3 顯示本論文盛錠筒溫度位於建議值中間，根據參考文獻建議，以 40°C 為級距分析盛錠筒溫度於 380°C、420°C 及 460°C 之差異。由圖 5.11 與圖 5.12 可見，隨盛錠筒溫度上升，型材溫度同步提升，肋骨區 X 方向拉伸與壓縮應力呈現交互變化。

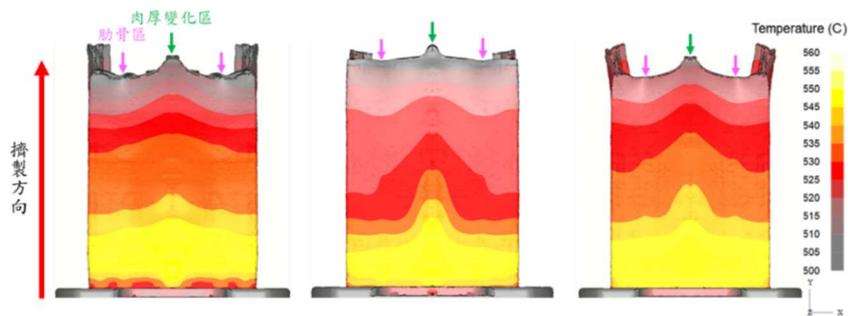


圖 5.11 不同盛錠筒溫度下型材之溫度分布 (左) 380°C (中) 420°C (右) 460°C

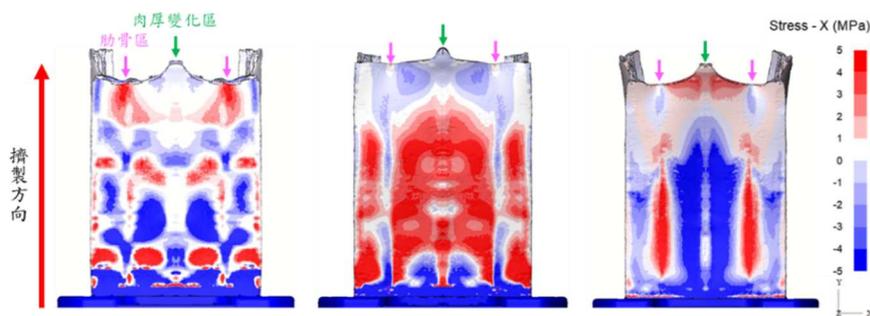




圖 5.12 不同盛錠筒溫度下型材之 X 方向應力 (左) 380°C (中) 420°C (右) 460°C

#### 5.3.4 製程數值分析小結

透過上述分析可發現當盛錠筒溫度較低時型材出口端溫度分布較為均勻，肉厚變化區高溫集中現象有所改善。根據廠商經驗，長時間連續生產會導致盛錠筒溫度逐漸上升，因此大量生產時可考慮定時暫停機台以調整盛錠筒溫度。

調整製程參數中擠壓桿速度、胚料初始溫度與盛錠筒溫度均會使型材溫度呈現規律性變化。然而若要徹底解決肉厚變化區高溫集中問題，應從模具設計角度著手。唯一不同者為型材表面 X 方向應力無規律變化。根據廠商說明肋骨設計主要為防止型材外部形狀大幅變形，本研究發現肋骨區 X 方向拉伸與壓縮應力交互變化可能與截面結構設計有關。



## 第六章 結論與未來展望

本論文探討在鋁擠製成形中不同模具結構與製程參數對擠出後型材的影響，利用 DEFORM-3D 有限元素軟體進行模擬，根據已建立之擠製模擬模型，觀察型材在製程中的受力與變形情況，並透過材料實驗的方式，觀察型材的微觀組織與機械性質，比較缺陷處與正常處之差異，找出可能為條紋缺陷發生的機制。

在模型建立方面，本論文使用 DEFORM-3D 有限元素軟體進行擠製成型的模擬分析。

在模型驗證方面，透過擠製機台擠壓負荷、型材變形特徵與型材焊合線位置做驗證，發現 DEFORM-3D 所建立之模型與實際情況幾乎吻合，也確認建立之模型之準確性。

在材料實驗方面，透過型材之材料實驗分析得到以下結論：

1. 透過 EBSD 分析得知，在沒有發生條紋缺陷位置之低角度晶界 ( $2^{\circ}\sim 10^{\circ}$ ) 比例較高且晶粒方位具有極強的方向性。
2. 晶粒尺寸於有發生條紋區域與無發生條紋區域之間並未發現明顯差異之處，這表明條紋缺陷與晶粒尺寸較無直接影響關係。
3. 在缺陷處使用較高目數砂紙再次研磨微量深度可以消除條紋缺陷，其中包含粗糙度與研磨深度兩個變因仍有待釐清。
4. 在硬度檢測中，所檢測的相同區域存在不均質性，但正常區之硬度明顯高於有條紋缺陷區。

在模型分析方面，經與有條紋缺陷的型材比對後，發現肉厚變化區條紋可能與集中高溫的現象有關，而肋骨區條紋可能與 X 方向應力變化有關。透過製程參數調整與模具設計修改分析得出以下結論：

1. 製程參數調整與模具設計修改對型材在擠製過程中之溫度與等效應變呈現規律性的變化。
2. 透過製程參數的調整，當盛錠筒溫度較低時，型材於出口端溫度分布較為平均，能使肉厚變化區條紋較高溫的現象獲得改善。

根據上述研究成果在未來展望方面，可分為材料實驗與模擬分析兩個部分：

在材料實驗中，可再將擠型前的材料去做 EBSD 分析與硬度檢測，作為基準參考。在表面粗糙度測試部分，可再詳細規劃陽極前研磨實驗，控制不同目數砂紙研磨不同厚度，量測試片粗糙度，觀察陽極後粗糙度、研磨厚度與陽極膜厚度關係，並觀察條紋情況。而於硬度檢測部分，後續應可使用 SEM 搭配 EDS 系統，對試片成分進行分析，並觀察  $Mg_2Si$  析出相顆粒大小與分布密度。

在模擬分析中，由於製程參數能調整的能力有限，肉厚變化區條紋缺陷後續可於模具設計的角度著手分析並改善，根據廠商經驗，調整模具工作帶長度，可以減少出口胚料因與模具摩擦時間較長而導致的高溫。而肋骨區條紋缺陷後續也可於模具設計的角度著手分析並改善，根據廠商經驗，肋骨主要作用為防止外側型材發生大變形的情况，因此型材表面肋骨處發生拉伸與壓縮應力交互變化是可預想的，若實務允許，可嘗試調整型材截面之結構設計。



## 誌謝

感謝啓鑫科技股份有限公司陳周富副總、張正儒經理與莊家誠課長提供鋁擠型材條紋缺陷生產相關議題作為本研究主題，並於各方面提供必要協助與配合促使實驗驗證順利進行。此外感謝環騰工業有限公司、正裕實業股份有限公司、群超鋁業股份有限公司、崧宥工業有限公司、上研有限公司及維晟雷射切割股份有限公司提供擠製製程相關資訊並配合實驗，使本研究更貼近實際產業應用，謹此致謝。

## 參考文獻

1. C.Q. Deng, "Causes of Streak Defect on 6063 Aluminium Alloy Profile and Measures to Prevent It," *Light Alloy Fabrication Technology*, vol.30, pp.21-22, 2002.
2. H. Zhu, X. Zhang, M.J. Couper, and A.K. Dahle, "The formation of streak defects on anodized Aluminium Extrusions," *JOM*, vol.62, no.5, pp.46-51, 2010.
3. J. Walker, "Streaking on Aluminium alloy extrusions," Master thesis, Department of Mechanical Engineering, Auckland University of Technology, Pennsylvania, New Zealand, 2012.
4. H. Zhu, X. Zhang, M.J. Couper, and A.K. Dahle, "Effect of Initial Microstructure on Surface Appearance of Anodized Aluminum Extrusions," *Metallurgical and Materials Transactions A*, vol.40, pp.3264-3275, Sep. 2010.
5. J. Yu, G. Zhao, C. Zhang, and L. Chen, "Dynamic evolution of grain structure and micro-texture along a welding path of aluminum alloy profiles extruded by porthole dies," *Materials Science & Engineering A*, vol.682, pp.679-690, Jan. 2017.
6. G. Chen, L. Chen, G. Zhao, and C. Zhang, "Microstructure evolution during solution treatment of extruded Al-Zn-Mg profile containing a longitudinal weld seam," *Journal of Alloys and Compounds*, vol.729, pp.210-621, Jan. 2017.
7. A. Güzel, A. Jäger, F. Parvizian, H.-G. Lambers, A.E. Tekkaya, B. Svendsen, and H.J. Maier, "A new method for determining dynamic grain structure evolution during hot aluminum extrusion," *Journal of Materials Processing Technology*, vol.212, no.1, pp.323-330, Jan. 2012.
8. L. Donati, J.S. Dzwonczyk, J. Zhou, and L. Tomesani, "Microstructure Prediction of Hot-Deformed Aluminium Alloys," *Key Engineering Materials*, vol.367, pp.107-116. Feb. 2008.
9. G.V. Voort, B. Suárez-Peña, and J. Asensio-Lozano, "Microstructure Investigations of Streak Formation in 6063 Aluminum Extrusions by Optical Metallographic Techniques," *Microscopy and Microanalysis*, vol.19, no.2, pp.276-684, Apr. 2013.
10. N. Park, Y. Song, S. Jung, J. Song, J. Lee, H. Lee, H. Sung, and G. Bae, "Numerical and Experimental Investigation on the Surface Defect Generation during the Hot Extrusion of Al6063 Alloy," *Materials*, vol.14, no.22, pp.67-68, Nov. 2021.
11. J. Asensio-Lozano, B. Suárez-Peña, and G.F.V. Voort, "Effect of Processing Steps on the Mechanical Properties and Surface Appearance of 6063 Aluminium Extruded Products," *Materials*, vol.7, no.6, pp.4224-4242, May. 2014.
12. Y. Sun, D.R. Johnson, K.P. Trumble, P. Priya, and M.J.M. Krane, "Effect of Mg<sub>2</sub>Si Phase on Extrusion of AA6005 Aluminum Alloy," *Light Metals 2014*, pp.429-433, 2014.
13. P.K. Saha, Aluminum extrusion technology, *Asm International*, 2000.
14. 劉靜安,《鋁型材擠壓模具設計、製造、使用及維修》,冶金工業出版社,1999.
15. 趙雲路、唐志玉,《鋁塑型材擠壓成形技術》,機械工業出版社,2003.