

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

光彈模擬技術在射出成型參數最佳化之應用研究



The Optimization of Injection Molding Parameters Based on
Photoelastic Simulation Technology

研究生：蘇軒丞

指導教授：鄭璧瑩 博士

中華民國九十九年七月

光彈模擬技術在射出成型參數最佳化之應用研究

The Optimization of Injection Molding Parameters Based on
Photoelastic Simulation Technology

研究生：蘇軒丞

Student : Shiuan-Cheng Su

指導教授：鄭璧瑩 博士

Advisor : Dr. Pi-Ying Cheng

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



Submitted to Department of Mechanical Engineering
College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master

In

Mechanical Engineering

June 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

光彈模擬技術在射出成型參數最佳化之應用研究

學生：蘇軒丞

指導教授：鄭璧瑩 博士

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘要

塑膠產品被廣泛應用於各式各樣、各行各業的物品之中，在其外觀或是結構件上扮演著重要的角色。隨著塑膠材料品質的不斷改良與新種類的持續開發，塑膠材料更加廣泛應用在高精度機械裝置與其零件方面，且需求日益增加。然而塑膠元件卻還存在著許多問題大大地影響成品品質的好壞。

本研究主要目的為研究塑膠製品於射出成型製程中所形成之殘留應力，並找出各項交工參數對於殘留應力與翹曲的影響程度，及其相關性，並進行模流分析參數最佳化的分析流程，改善射出成型件的殘留應力與翹曲等問題的。本研究使用 3D 模流分析軟體 Moldex3D 與田口氏實驗法，分別以長方形薄板及機器人足部零件作為分析範例模型，系統化規劃各項射出成型交工參數來進行模擬分析。在殘留應力的觀測上，採用實體模型的剖面顯示技術模組，觀察表面與非表面區域的應力分佈。本研究並應用光彈模擬技術分析與觀測模型內部殘留應力的分佈區域與梯度變化，藉此觀察、分析殘留應力與翹曲變形之間的相關性，找出參數之最佳組合，期望在保持理想外觀的前提下，亦能改善塑膠製品射出成型後因殘留應力所影

響的環境效應、光學性質、二次加工等各項問題。

根據本研究分析結果，在射出時間、融膠溫度、保壓時間、冷卻時間、保壓壓力與射出壓力等六個射出成型加工參數中，歸納出以射出時間與融膠溫度對殘留應力的影響最為顯著；冷卻時間與保壓壓力則影響翹曲最大。利用這些影響程度整合歸納出一組加工參數的最佳組合，並透過模擬分析結果驗證、確認此參數組合對於範例模型改善殘留應力與翹曲等課題達到最佳設計效果。

關鍵詞：射出成型、殘留應力、田口實驗法、直交表、光彈法。



The Optimization of Injection Molding Parameters Based on Photoelastic Simulation Technology

Student : Shiuan-Cheng Su

Advisors : Dr. Pi-Ying Cheng

Department of Mechanical Engineering
College of Engineering
National Chiao Tung University

Abstract

The plastic products are widely used in many items in all walks of life. They play an important role in those appearance and structural parts. With the improvement of the quality of plastic materials and the new method of the plastic material technique appear, the plastic products are used in high-precision mechanical devices and spare-parts more and more widely. However, there are many problems still affect the quality.

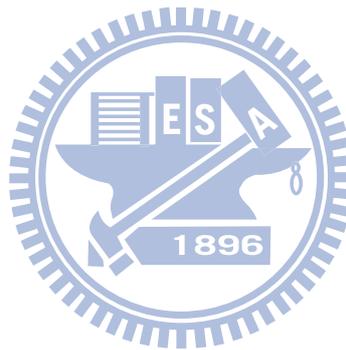
The main purpose of this study wants to research the residual stress of the plastic products after the injection molding manufacturing process, find the effect of the manufacturing conditions and the relationship. Then create a process of optimization for both residual stress and warpage. Using the 3D moldflow analysis software - Moldex3D and Taguchi's experimental method and controlling the manufacturing conditions to analyze the rectangular sheet and the part of robot foots. To Observes the residual stress, we use the simulation photoelastic method to analyze the distribution of the residual stress. Therefore, find and analyze the relationship of the residual stress and warpage. Expect to maintain the ideal shape and can also improve the residual stress and warpage after the injection molding manufacturing process of plastic products.

According to this paper, in the injecting time, melting temperature, packing

time, cooling time, packing pressure, and injecting pressure, the manufacturing conditions have the most effective to residual stress are injecting time and melting temperature. The manufacturing conditions have the most effective to warpage are cooling time and packing pressure. Using these relationships, we can generalize a better combination of manufacturing conditions to optimize both residual stress and warpage.

Key word:

Injection molding; residual stress; Taguchi method; Orthogonal table; Photoelastic method.



誌謝

在攻讀碩士的這兩年間，我學到了許多在研究上應有的方法與態度，這都要感謝我的恩師，我的指導教授 鄭璧瑩博士，在實驗室每週的例行會議中，會給予我們許多研究的方向與學習的指導，充實我們的學識涵養。當我們提出疑問時，會引導我們找出解決問題的方法，並不時的提醒要多多思考，其實問題的解答就身邊。除了研究領域上，在待人處世上，也時常叮嚀我們要有守時與負責任的態度。老師給予我們許多不只在學術的領域，更是在人生道路上的重要觀念。

也感謝老師與科盛科技公司，在碩一的暑假給予我前去學習機會，在那裡得到了許多人的幫助。感謝工程師李志剛先生、謝宜昇先生、張元榕先生以及業務部的陳琬琪小姐，給予我軟體操作及論文研究上無私的解答。另外也謝謝在那段時光中互相勉勵、同甘共苦的中原大學的同學們：三民、品宏以及婷儀。

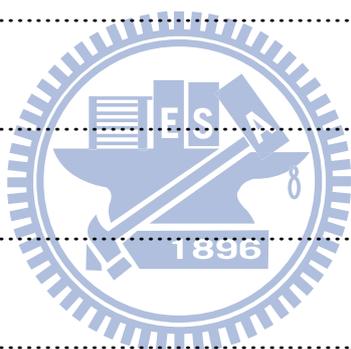
也要感謝實驗室的好夥伴們：同學詩漢、瑞昌、漢嘉及永修，學長嗣展和已經畢業的學長家宏、仲元、志元、亮瑜與俊融，學弟維廷、長懋、首余及昱登，已經畢業的在職專班學長光耀、岳芳、勝龍、紹詩。謝謝大家在這段時光的照顧與支持。

最後非常感謝好朋友筱偉以及家人多年來的支持。感謝大家！

蘇軒丞 謹致

目錄

摘要	I
Abstract	III
誌謝	V
目錄	VI
表目錄	IX
圖目錄	XI
第一章 緒論	1
1-1 研究背景	1
1-2 文獻回顧	2
1-3 研究動機	4
1-4 研究目的	6
第二章 基礎理論	7
2-1 殘留應力簡介	7
2-2 射出成型製品殘留應力成因	8
2-3 光彈法原理	13
2-3-1 應力偏光儀	14



2-4 雙折射現象	17
2-5 應力—光學定律	18
2-6 塑膠射出成型的原理	21
2-6-1 射出成型製程	22
2-6-2 射出成型三大要素	23
2-6-3 射出成型設備介紹	23
2-7 田口實驗方法	25
2-7-1 直交表的運用	26
2-7-2 因子反應 (Factor Response) 分析	29
2-7-3 品質計量法	30
第三章 CAE 電腦輔助工程與模流分析	33
3-1 電腦輔助工程	33
3-2 模流分析軟體的發展歷史	34
3-3 CAE 軟體 Moldex3D 簡介	36
第四章 射出成形件模流分析方法與流程	42
4-1 模流分析流程介紹	42
4-2 模擬分析範例模型簡介	44



4-3 模流分析的製成參數.....	48
4-4 光彈條紋模擬精度校正.....	53
第五章 模擬分析結果與討論.....	56
5-1 初步加工條件分析.....	57
5-2 單一因子變化分析.....	59
5-3 田口實驗法進行複數因子變化分析.....	64
5-3-1 薄板模型.....	66
5-3-2 機器人足部模型.....	79
5-4 實驗比較結果.....	89
5-4-1 單一因子變化 V.S 複數因子變化分析.....	89
5-4-2 加工條件對於殘留硬力的大小、分布與翹曲的影響.....	90
5-4-3 殘留應力與翹曲的最佳化設定.....	91
第六章 結論與未來研究方向.....	96
6-1 結論.....	96
6-2 未來研究方向.....	99
參考文獻.....	100



表目錄

表 2.1 光程差與實驗量測色光表	16
表 2.2 $L_4(2^3)$ 直交表	27
表 2.3 $L_4(2^3)$ 的直交表	29
表 2.4 因子反應表	30
表 4.1 PS材料特性表	49
表 4.2 初步加工條件	51
表 5.1 薄板於各射出時間下之最大剪應力表	60
表 5.2 薄板於各融膠溫度下之最大剪應力表	60
表 5.3 薄板於各保壓時間下之最大剪應力表	61
表 5.4 薄板於各冷卻時間下之最大剪應力表	61
表 5.5 薄板於各保壓壓力下之最大剪應力表	61
表 5.6 薄板於各射出壓力下之最大剪應力表	61
表 5.7 因子等級表	65
表 5.8 模擬分析直交表	65
表 5.9 薄板最大剪應力模擬分析結果	68
表 5.10 薄板最大剪應力反應表	68
表 5.11 薄板翹曲模擬分析結果	70
表 5.12 薄板翹曲反應表	71

表 5.13 薄板光彈條紋級數模擬分析結果.....	74
表 5.14 薄板光彈條紋級數反應表.....	75
表 5.15 薄板光彈級數標準差模擬分析結果.....	77
表 5.16 薄板光彈條紋級數標準差反應表.....	78
表 5.17 足部模型最大剪應力模擬分析結果.....	80
表 5.18 足部模型最大剪應力反應表.....	81
表 5.19 足部模型翹曲模擬分析結果.....	83
表 5.20 足部模型翹曲反應表.....	84
表 5.21 足部模型光彈條紋級數模擬分析結果.....	86
表 5.22 足部模型光彈條紋級數反應表.....	86
表 5.23 足部模型光彈條紋級數標準差模擬分析結果.....	87
表 5.24 足部模型光彈條紋級數標準差反應表.....	88
表 5.25 薄板最佳化組合.....	92
表 5.26 足部零件最佳化組合.....	92

圖目錄

圖 2.1 射出噴泉模流示意圖	10
圖 2.2 應力偏光儀內部配置圖	15
圖 3.1 傳統設計與CAE設計比較圖	34
圖 3.2 Moldex3D 模擬分析流程圖	41
圖 4.1 研究分析流程圖	44
圖 4.2 平板模型三視圖及立體視圖	45
圖 4.3 機械人足部零件三視圖	45
圖 4.4 分析模型澆道、水路及模具配置圖	46
圖 4.5 分析模型網格	47
圖 4.6 PS 黏度-剪切率圖	50
圖 5.1 PS 薄板初步分析最大剪應力分布圖	58
圖 5.2 薄板初步分析最大剪應力斷層剖面	58
圖 5.3 PS 薄板初步分析光彈條紋	59
圖 5.4 薄板於各射出時間下之最大剪應力反應圖	62
圖 5.5 PS 薄板於各融膠溫度下之最大剪應力反應圖	63
圖 5.6 PS 薄板於各保壓時間下之最大剪應力反應圖	63
圖 5.7 薄板於各冷卻時間下之最大剪應力反應圖	63
圖 5.8 薄板於各保壓壓力下之最大剪應力反應圖	64

圖 5.9 薄板於各射出壓力下之最大剪應力反應圖.....	64
圖 5.10 薄板最大剪應力分布圖.....	67
圖 5.11 薄板最大剪應力反應圖.....	69
圖 5.12 薄板總位移分布圖.....	70
圖 5.13 薄板翹曲反應圖.....	72
圖 5.14 薄板光彈條紋.....	74
圖 5.15 薄板光彈條紋級數反應圖.....	76
圖 5.16 薄板光彈條紋級數標準差反應圖.....	78
圖 5.17 足部零件最大剪應力分布圖.....	79
圖 5.18 足部模型最大剪應力反應圖.....	81
圖 5.19 足部零件總位移分布圖.....	82
圖 5.20 足部模型翹曲反應圖.....	84
圖 5.21 足部零件光彈條紋.....	85
圖 5.22 足部模型光彈級數反應圖.....	87
圖 5.23 足部模型光彈條紋級數標準差反應圖.....	89
圖 5.24 冷卻時間交互作用曲線圖.....	90
圖 5.25 薄板最佳化最大剪應力分布圖.....	93
圖 5.26 薄板最佳化最總位移分布圖.....	93
圖 5.27 足部零件最佳化最大剪應力分布圖.....	94

圖 5.28 足部零件最佳化翹曲分布圖..... 94

圖 5.29 薄板最佳化最光彈條紋..... 95

圖 5.30 足部零件最佳化光彈條紋..... 95



第一章 緒論

1-1 研究背景

在現代社會中，塑膠產品被廣泛應用於軍事、商業、工業以及日常生活用品中，如通訊設備、電腦相關產品、汽機車、生醫晶片、醫療器具等物品中塑膠產品都是其重要的外觀或是結構件。近年來，隨著塑膠材料品質的不斷改良與新種類的持續開發，塑膠材料更加廣泛應用在高精度機械裝置或其零件方面，其材料用塑膠製成者不勝枚舉，且需求有日益增加之勢。因為光學工業及光電產業的興盛，光學元件儼然已成為目前光學產品及光電系統中不可或缺的關鍵零組件，從低精度的眼鏡鏡片、高精度的光碟機讀取頭（Pickup Lens）、雷射印表機及傳真機光學系統、照相手機、數位相機之鏡頭組，及LCD螢幕背光模組之導光板等，都是目前最受矚目的應用產品。而在量產規模迅速擴張的需求下，採用光學級塑膠取代傳統玻璃成為上述各項產品的開發趨勢。在各種工業製程方法中，射出成型製程擁有生產快速與自動化的優點，在現今也是製作塑膠產品上應用最廣泛的製程之一。雖然射出成型製程在生產上具有一定的優勢，但是在產品造型、模具結構，甚至是機台調整以及製造成本考量的限制下，塑膠產品的外觀缺陷，一般成型件表面常見的缺陷有短射、表面流痕、內有氣孔、翹曲變形、收縮不均、毛邊等；因此成型後得以補救或補強的方法需要依靠人工挑選、毛邊刮除、塑件整形等後加工方式、均需耗費相當大的人工成

本與加工時間。製程中對產品所造成的翹曲(Warpage)、收縮(Shrinkage)、凹陷(Sink Mark)和殘留應力(Residual Stress)等現象會嚴重影響產品外觀、品質、精度、成品強度以及光學性質，這些問題仍然是目前在產品開發或生產產品過程中必須花費大量時間、金錢及技術的困難。

1-2 文獻回顧

1998年K.M.B.Jansen等人[1]系統性的分析參數對PC、PS、ABS、HIPS、PBT 1505、PBT 3235、HDPE等七種熱塑性塑膠材料在射出成形製程中的收縮影響，研究提出保壓壓力與塑料溫度對上述材料均有相同趨勢且較大影響，而射出速率與模溫影響較小且無一致性。

學者Choi和Im[2]，於1999年運用射出成型技術，以模擬分析的方式來預測非結晶材料於保壓與冷卻階段之收縮、翹曲及殘留應力，其分析的材料為PS以及ABS兩種材料。其所探討之加工條件為保壓壓力、射出速度、模溫、融膠溫度等，並經由溫度曲線與殘留應力計算，證明其結果是以塑料溫度與保壓壓力對其收縮、翹曲及殘留應力影響最為重要。分析結果中，所得到的收縮、翹曲的數值對於設計的流程的過程是有所助益，然而殘留應力的預測卻還有一定程度的誤差。

2001年，由Ming-Chih Huang 等人[3]提到，市面上通訊和電子產品一直朝向輕薄短小的設定發展，所以具有薄殼外型的元件需求日漸增加，因此

利用塑膠射出薄殼特徵產品的技術也就日漸重要。該研究利用田口式實驗計畫法找到射出成型條件，並利用模流分析軟體C-MOLD模擬射出成型過程。結果顯示保壓壓力（Packing Pressure）對於翹曲具有極大的影響，保壓壓力對收縮也有很大的效果，保壓壓力高會導致產品較低的收縮率。接著是模具溫度（Mold Temperature）、塑料溫度（Melt Temperature）和保壓時間（Packing Time）。然而薄殼射出成型的翹曲也受到澆口尺寸和充填時間些微的影響。在相同的保壓壓力下，澆口較小會得到較穩定的收縮率。根據實驗設計（Design of Experiment, DOE）結果得知利用品質工程方法得到的最佳因子組合並未符合最佳結果，表示各因子之間存在交互作用

（Interaction）。

Lu等人[4]探討製程參數對PC光學鏡片表面輪廓誤差及殘留應力之影響。論文中以雷射干涉儀量測射出鏡片的曲率半徑，將鏡片與模仁曲率半徑的差異作為實驗翹曲的回應值，而殘留應力的量測則採用光彈儀設備。實驗結果顯示，模具溫度是影響鏡片表面輪廓最顯著的因子，保壓壓力則最不顯著，若在保壓階段採二段式的保壓，則輪廓誤差較低。而射出速度對殘留應力的大小影響並不顯著，但射出速度的改變則會對鏡片表面的應力分佈產生影響。

2002年黃東鴻[5]探討薄殼射出件在不同的融膠溫度、模具溫度、保壓壓力和射出速度的製程參數下，利用田口實驗設計法，比較模擬和實際製

程對翹曲結果的影響。其實驗結果顯示出，升高融膠溫度及保壓壓力有助於減少翹曲變形，數據顯示保壓壓力是最具影響力的因子。實驗數據也顯示著減少保壓壓力，升高模具溫度與融膠溫度，皆可以減少殘留應力，其中溫度對殘留應力影響最為顯著。

2006年Tuncay Erzurumlu等人[6]利用田口最佳化方法找出最小翹曲（Minimization of Warpage）和凹痕指標（Sink Index）的成型參數。成型參數有模溫、料溫、保壓壓力此外還有肋的形狀和肋的角度。選擇的高分子材料為PC/ABS、POM和PA66。田口法被使用在模流分析中具有三個水準的因子設計，使用直交表、信號雜訊比（signal-to-noise ratio, S/N）和變異數分析找到最佳水準和成型參數對翹曲和凹痕指標的影響。



1-3 研究動機

影響塑件射出成型的因素，可分三大類，分別為塑膠材料的選擇、成型條件的選定與模具的設計。以往塑膠材料的選擇是依據產品目的作為依據，將各種塑料的材料經過多次實驗並將其特性記錄下來成為資料庫，再依據產品使用的場合、發揮的功能及需要的外觀來決定選擇哪種材料。因此大部分都必須要根據過去的經驗來做為主要的選擇方法，一旦塑料是過去未曾使用過或是含有玻纖或其他不同成份、特性時，就必須再度重新分析材料特性加以實驗才能得知此塑料是否適用。模具的設計，主要依靠的

是師徒經驗相承，以及個人耗費生產成本的無數次試模所累積下來經驗，因此對新開發之產品，經常需要經過多次現場試模與修模的試誤程序（Trial and Error），才完成模具設計，解決成型件之缺陷。而成型製造過程，則分為入料階段、充填階段、保壓階段、壓縮階段、冷卻階段、脫模階段等；有很多製程參數需要正確控制，這些控制參數往往彼此之間又有交互作用互相影響，以經驗傳承及試誤程序來選定各項製程參數，純粹以實作試驗法則，不但效率低，也浪費經費。

在現今高度商業化的社會中，為了經濟的考量，射出成型製程都盡量縮短成形之時間，因此在塑膠熔膠快速冷卻條件下，容易產生外觀缺陷如收縮、翹曲變形以及殘留應力等等問題，由於翹曲、收縮、凹陷等現象明顯的影響產品的外觀、品質、精度及成品強度，因此在過去文獻中以及現今業界上，大部分都以上述的變形現象作為最佳化的設定目標，對於殘留應力的研究與探討僅限於各式加工參數的影響程度，然而殘留應力的存在，也確實影響成品的外觀尺寸變形及翹曲、環境應力破壞、使用或二次加工的強度以及光學塑膠件的光學性質，因此殘留應力對於射出成型製程的品質上，也有一定程度以上的影響力。本研究即針對改善塑膠製品射出成型過程所產生之殘留應力進行探討，希望能從塑件射出成型的模流分析，結合電腦輔助工程（CAE），有效的整合出塑膠射出成型製程中最佳化的參數組合，有效率地改進產業的競爭性。

1-4 研究目的

本論文主要是應用CAE分析軟體Moldex3D模流分析，選擇、探討各種製程參數對塑膠射出成型之殘留應力的影響。利用軟體將模型建立、流道設計、網格建立、射出條件設定模擬分析流程。初步在相同模具及冷卻水路設計、單一進澆口位置下，以不同的成型射出條件使用CAE軟體進行模流分析，模擬塑料在模具內充填、保壓、冷卻等射出成型過程後的產品內部應力分佈情形，並且以軟體的光學模組，模擬出光彈條紋現象輔助觀察分析，配合田口實驗計畫法尋找各項成型加工條件對於成品內部殘留應力的分佈狀況、數值大小之影響力進行研究，並探討殘留應力與翹曲之間的相關性質。



第二章 基礎理論

2-1 殘留應力簡介

塑膠材料由於具有高黏度特性，所以一般在成形加工時都需要利用高溫、高壓、高剪切等加工條件，來有效降低塑膠融膠黏度至容易成形加工之範圍，另外由於塑膠具有較低之熱傳導係數，是熱的不良導體，所以高溫成形後需要長時間才能達到均勻溫度之冷卻。而現代塑膠射出成型製程，一般為求經濟效益快速生產，所以對於射出成型週期都盡量縮短，而所對應之射出成型條件如射速快、冷卻時間短等等，就成了必要的要求，當塑膠射出成型製品受到過大之速度差或不均勻冷卻等等因素影響，往往會造成塑膠製品內部產生殘留應力。

一般來說，製品在經過成形或二次加工過程後，在無外力作用下或無溫度梯度存在時，物體內部仍然維持承受應力之狀況即為所謂的殘留應力。在塑膠成形過程中，由於流動以及溫度上的變化造成塑膠分子結構不是處在最低能量之最穩定狀態，分子鏈受到流動定向影響或是受到周圍分子鏈之拘束，而呈現不穩定之高能量狀態，因此一旦有外界能量給於此受應力作用之分子鏈時，則此分子鏈將極易釋放出應力而達到其最穩定之組態。

當塑膠製品在應用上發生破裂或破壞時，就材料力學的觀點，即表示該塑膠件在破壞區域上，其所承受之應力數值總合超過了該材料之材料強

度數值。因此要解決製品在使用上的破壞或破裂問題，勢必要增加材料強度或減少製品的應力值。塑膠製品承受的應力作用通常可依照造成的原因區分為外部應力及內部應力兩種，外部應力是製品在使用時因遭受外力作用而造成之應力，此部分應力將依產品應用場合而定，通常無法控制其程度，一般產品設計者會依照常態之外部應力值，乘上一安全係數值來設計產品之強度。而內部應力通常是塑膠製品在加工成形過程中所產生而留存於成品內部。所以若要有效解決塑膠製品之破壞產生，降低內部殘留應力作用或提高材料強度是較為可行的兩種方法。

對於塑膠射出成形製程而言，通常工業上會選用較適當之成形加工條件，以防止材料強度降低及避免因成形加工時所產生過大的內部殘留應力。需要瞭解塑膠件發生破壞之原因與產生破壞之位置與型態，才能有效分析解決成形及設計上的問題點。

2-2 射出成型製品殘留應力成因

在一般塑膠射出成型過程中，通常塑膠製品常見之內部應力可分為剪切流動造成之流動應力與冷卻收縮所造成之熱應力兩種[7]。當塑膠材料在成形過程中會因為高剪切作用而造成分子鏈結構的高度定向現象，此種是屬於熔膠剪切流動所形成之應力，另外因為不均勻之冷卻造成塑膠製品內分子鏈的不均勻收縮，或是塑膠熔膠之溫度快速冷卻至塑膠材料的玻璃轉

換點以下時，冷卻收縮造成分子鏈間應力無法完全釋放，此種是屬於冷卻所形成之應力。

另外結晶性材料之不平衡結晶作用，因為結晶區域會比非結晶區域排列的較為整齊[8]，因此體積收縮較多，使塑膠製品產生不均勻收縮時的拉伸與壓縮應力，以及模穴壓力對不同位置分子鏈之不同影響，例如不同形狀尤其是形狀較為複雜的模穴，塑料熔膠流動時的速度差與壓力不同都可能使剪切應力無法釋放形成殘留應力。

由塑膠製品厚度方向觀察，可依分子鏈之微觀結構差異，來區分不同之區域，參考圖2.1。其中固化層為塑膠充填時緊貼兩側模壁，瞬間冷卻固化的高分子鏈定向層，此部分會因為射出成型之噴流效應，而使分子鏈排向方向與流動方向相反；而流動高剪切層是塑膠充填時緊靠固化層的高剪切區域所形成的分子鏈定向層，由於與固化層具有最大之速度差，所以會形成最大之剪切流動應力效果，塑膠充填結束時本區定向層尚未完全凝固，而外層之固化定向層有絕熱效果，使流動高剪切層熱散失不至過快，另外由於高剪切作用會產生剪切加熱作用，所以本區也是溫度最高之區域。

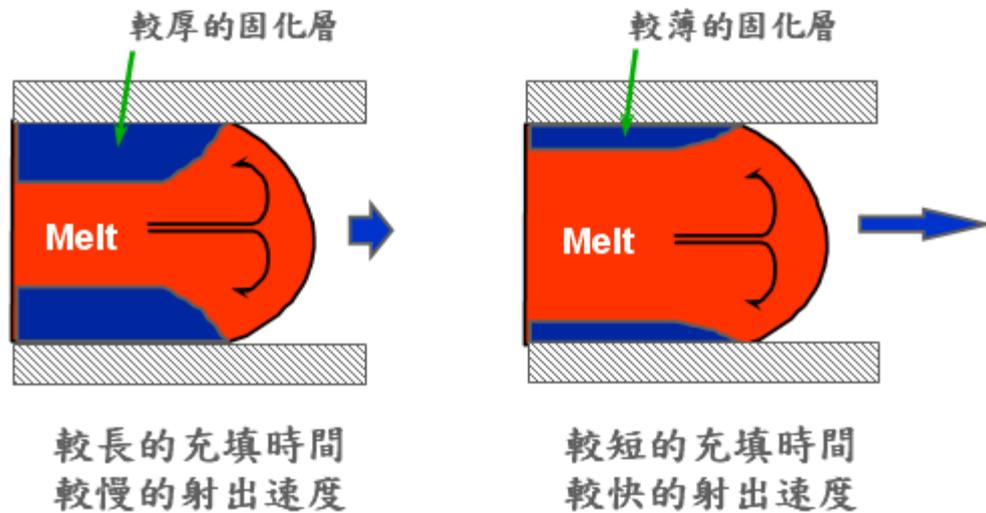


圖 2.1 射出噴泉模流示意圖

而融膠流動層位於中心層因熔膠高溫及冷卻時間足夠，分子鏈有足夠時間鬆弛定向，故無高分子鏈定向行為，高分子鏈彼此之間較無剪切作用現象，若產品厚度有變化，則主要會影響熔膠流動層厚度，若是薄件成品則熔膠流動層的厚度將會變小。

除了在成品厚度方向上下表面有一薄層固化層外，大部分區域是屬於熔膠流動層，而這區域主要之內部應力形成是由於不均勻冷卻造成，塑膠件厚度方向之冷卻是由與模壁接觸之成品表面開始向成品內部延伸，所以中心層是最慢冷卻之位置。因此當塑膠成品成形後，開始進行冷卻階段時，在某一特定位置上之分子鏈會受到其外部已冷卻收縮之分子鏈牽引，會受到較早先冷卻收縮之分子鏈的拉伸應力。在成品厚度方向靠近表面之區域，分子鏈是處在壓縮應力狀況，而內部區域是處於拉伸應力狀況。

殘留應力對塑膠製品的影響常見的有下列幾種：

1. 外觀尺寸變形及翹曲問題

由於在材料充填時因為流動時所產生之剪切應力影響材料分子鏈的排向或是由於成品幾何造成流動的定向效果，以及在塑膠製品脫模時容易因應力鬆弛而造成尺寸發生變形，另外由於塑膠製品尺寸的不對稱性或在製品厚度方向冷卻收縮的不平衡性，所形成的熱應力都將造成成品在脫模後發生翹曲變形現象。此現象對於尺寸精密度有要求或有組裝搭接性需求之塑膠射出製品，將會是一大問題。

2. 環境應力破壞 (Environment Stress Cracking, ESC)

環境應力破壞可說是塑膠製品在應用及使用上比例最高的破壞型式，例如太陽UV光照射破壞、老化破壞、氣候性乾溼冷熱循環破壞等等，對此塑膠殘留應力會加速環境應力的破壞。其他像塑膠件的蠕變性破壞、疲勞性破壞等，也都會因為殘留應力存在而加速加快其破壞產生。

3. 影響使用或二次加工

例如表面接著、表面電鍍或表面塗裝等加工方法，都會因為塑膠製品表面高度分子定向之高應力情況，而產生介面之不相容性。另外如接觸到溶劑、化學品等也會造成在應力區域的加速劣化。以射出成型製程而言，使塑膠熔膠溫度從熔點緩慢的下降，塑膠高分子能夠有足夠的時

間移動、排列，將能降低塑膠製品之殘留應力，因為塑膠材料在從熔點以下至玻璃轉換點的溫度區間時，較容易移動、排列，但是射出成型製程在經濟效益考量下，往往不可能採用此種方式降低殘留應力，如此生產效率將會大為下降，並且還有尺寸收縮等因素需要考量。因此改善殘留應力目前最常研究與使用之方式主要為調整射出成型之參數，例如料溫、模溫、冷卻時間、保壓壓力、充填速度等因素等等，或甚至更換材料。因此在射出成型製程時對於不同材料適當調整成形參數也可適當改變塑膠製品尺寸收縮與殘留應力情況。

4. 光學性質的影響

對於塑膠件而言，當內部的應力直不同時，會造成不同的折射率，此為雙折射現象。現今，在低成本、高產量以及自動化得訴求下，光學元件漸漸地以塑膠為材料，但在射出成形的製程中，高壓擠入以及保壓等過程中，塑料都維持在高壓狀態，因而造成模穴內部融膠壓力分布不均以及高分子配向性（Molecular Orientation），使得產品產生翹曲變形以及雙折射現象等等問題，對於光學塑膠元件都是十分重大的缺陷，也是現今所需解決關鍵性的問題。

2-3 光彈法原理

光於同一介質行進之速度為一定值，當進入不同透明非結晶體介質會產生折射與反射現象，但部份透明非結晶體材料會因為內部殘留應力或外部受力使得材料硬力分布不均，造成折射率不同，當光線進入後會呈現出雙折射之現象，由於光線的速度與折射率成正比例的關係，因而分解成沿快軸與慢軸方向前進之兩不等速度且相互垂直之平面偏極光，因此兩分量將因主應力的不同而以不同的速度通過透明材料，因而造成相位偏移(Phase shift)，當應力解除時則回復為具有透明非結晶體等向性的特徵，這種暫時性之雙折射特性 (Temporary Double Refraction) 稱為光彈效應。

如果相位偏移是建設性的，則兩分量彼此加強，而形成亮的區域；反之，如果相位偏移造成兩分量互相干擾，則形成暗的區域。如此一來，在偏光儀 (Polariscope) 將看到透明材料上產生明暗的線條，這些線條稱為光彈條紋，可以用來解釋應力分佈的情況並計算之。應力造成光線速度的改變可以解釋如下：當壓力產生時，造成透明材料的分子結構較「稠密」，因此折射指數 (Refractive index) 增加，光線速度因而變慢；反之，當透明材料承受拉應力時，其分子結構變得較「稀疏」，折射指數降低，光線速度變快。

光彈法是除了應變規之外，另外一種常用分析應力的實驗方法，其原理為根據某些透明材料所呈現的雙折射現象 (Double refraction or

birefringence phenomenon)，應用光學定律與材料彈性特質間之關係來進行全域性的應力量測。

光彈法依型式上可分為穿透式光彈法與反射式光彈法，穿透式光彈法需利用光彈材料製成與實際構件相同比例之模型，並施加與實際構件相同比例之荷重，放置於偏振光場中藉由偏振光穿越模型產生干涉現象，所產生明暗相間或色彩分佈的光彈條紋影像，藉由數位影像處理技術與光彈法理論結合來獲得該模型之應力與應變分佈情況。反射式光彈法之基本理論與穿透式相同，於光彈材料使用上，反射式光彈法將光彈材料製成薄膜，緊密黏著於待測物表面上，可實際量測到待測物之表面應力分佈情況。

從光彈法實驗中我們可以獲得兩種干涉條紋，即等色線 (Isochromatics) 與等傾線 (Isoclinics)。等色線代表著最大與最小主應力間差值 (Difference in Principal Stresses) 的資訊，而等傾線則是相同主應力方向 (Orientation) 的連線。若成品的狀態可用平面問題來處理而且兩個主應力互為異號，則等色線又可以視為各點最大剪應力的訊息。[9]

2-3-1 應力偏光儀

偏光儀(Polariscope)是用來做光彈應力分析的儀器。如圖2.2所示，偏光儀包含光源(Light source)、濾光片 (polarizer)、模型(透明材料) (Model) 及檢偏鏡 (analyzer)。光源所投射出來的光線為一般的光線，可以在任何

垂直的方向振動，而濾光片只讓某一特定方向振動的光線通過，該方向即稱為偏光軸（polarizer axis）。檢偏鏡實為一種濾光片，但與濾光片成垂直擺置。這樣的偏光儀設置即稱為平面偏光儀（plane polariscope）。

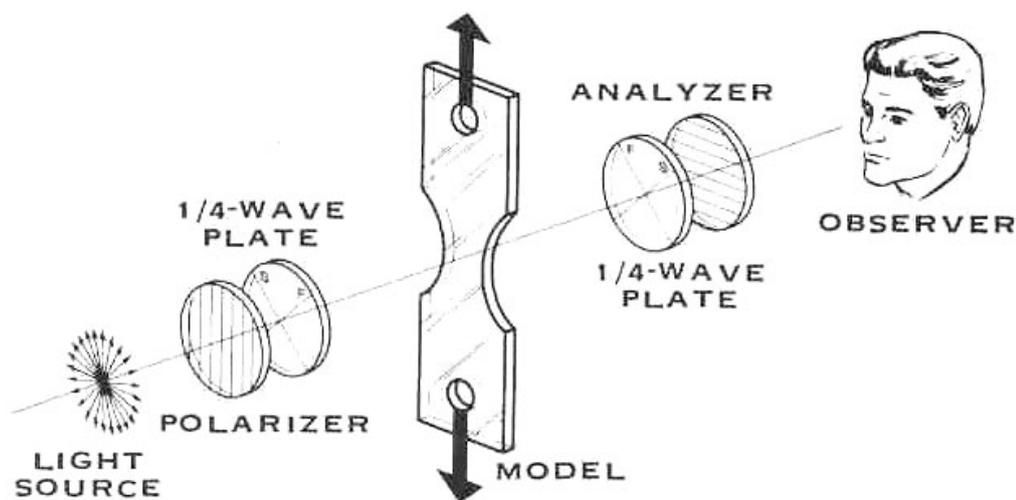


圖 2.2 應力偏光儀內部配置圖

一般實驗中，在應力偏光儀中的透明件會呈現彩色的光彈條紋，而依照背景顏色的不同一可分為亮場（白色）、暗場（黑色）兩種。實驗中所顯現出的光彈條紋會呈現紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫等顏色的循環，選定其中一種顏色並對照「光程差與實驗量測色光表（表）」來判斷光彈級數，是該實驗的測量方法。

由於白光是由紅、橙、黃、綠、藍、靛、紫七種主色組成，因此在白光中若某一個波長的光被消去的話，那麼出現的就是其互補色。在光程差 $\Delta = 0$ 的情況下任何波長的光都會被消除，在暗場下會呈現黑點，而亮場則

呈現最亮的亮白色，當光程差越來越大時，首先被消掉的是波長最短的紫光，然後依序為藍、綠、黃……、紅，其對應的互補色大致上是黃、紅、藍、……綠。若光程差持續增大，便會進入第二循環，第三循環……，然而條紋的顏色會越來越淡。我們可以依照黃紅藍綠的次序來判定條紋的級數(N)，零級條紋為黑色(暗場)或是白色(亮場)，其他依序則是級數越來越高的彩色條紋。

表 2.1 光程差與實驗量測色光表

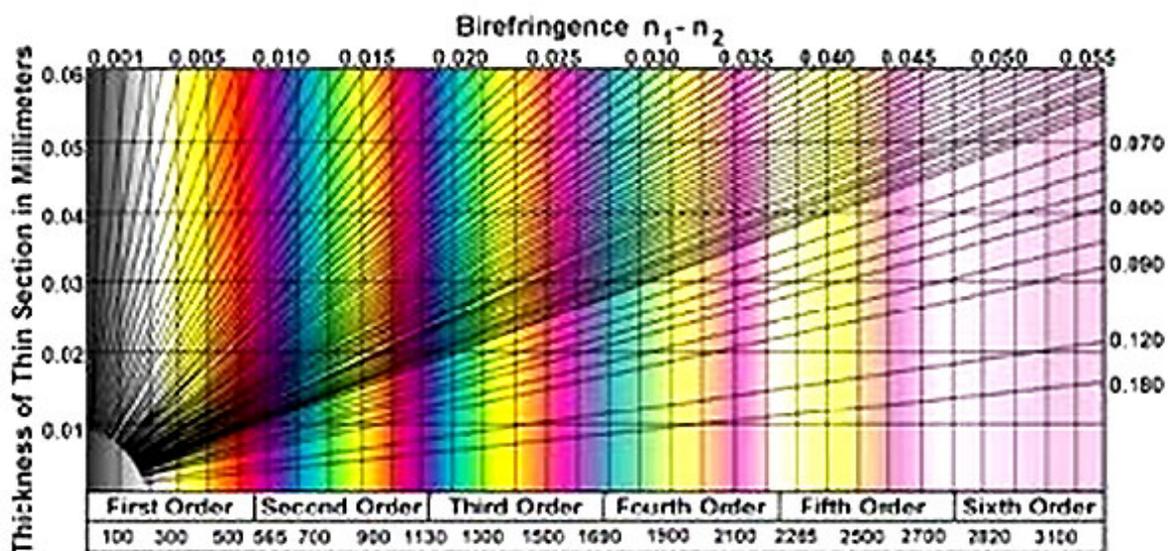


Figure 5

2-4 雙折射現象

雙折射現象最先是在1669年由丹麥學者巴塞林納斯 (Erasmus Bartholinus, 1625 – 1698) 所發現，當時他發現光線通過方解石 (冰洲石) 時，入射光線會被分成兩條折射線，他將其中一條稱為尋常光 (Ordinary Ray)，遵守著 Snell 折射定律；另一條則稱為非尋常光 (Extraordinary Ray)，不遵守 Snell 折射定律，而此折射現象便定義作雙折射現象 [10]。具有雙折射現象的材料，稱之為雙折射性材料，如石英、電氣石、雲母等都具有此現象，而雙折射現象也是光彈材料成像的基本要素之一，在1816年德國學者布魯斯特 (David Brewster) [11]，藉由偏極光通過玻璃觀察發現，許多非結晶之透明材料具有暫時性雙折射 (Temporary Double Refraction) 現象的物理特徵。

但於非結晶之透明材料體中，在晶體的光軸上不具有雙折射現象，且此方向上只有一個傳播速度及折射率。當光沿著垂直於光軸的方向傳播時，尋常光與非尋常光的方向一致，但由於速度的不同，在經過晶體後，兩者就有速度先後的差別而產生光程差，又稱為延遲量 (Retardation)，則尋常光與非尋常光的相對延遲量 (Relative Retardation) δ 為：

$$\delta = \delta_{\text{slow}} - \delta_{\text{fast}} \quad (2.1)$$

$$\delta_{\text{fast}} = h (n_{\text{fast}} - 1)$$

$$\delta_{\text{slow}} = h (n_{\text{slow}} - 1)$$

δ_{fast} : 快速波延遲量

δ_{slow} : 慢速波延遲量

n_{fast} : 快速波對應軸上之折射率

n_{slow} : 慢速波對應軸上之折射率

h : 光通過的光彈厚度

由公式 (2.1) 可推得

$$\delta = h (n_{\text{slow}} - n_{\text{fast}}) \quad (2.2)$$



不同傳播速率所造成之相對相位角差 Δ (Relative Angular Phase Shift)

可表示成下式：

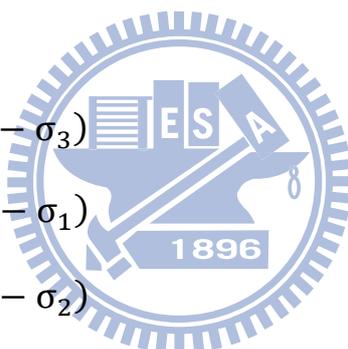
$$\Delta = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi h}{\lambda} (n_{\text{slow}} - n_{\text{fast}}) \quad (2.3)$$

λ : 入射光之波長

2-5 應力—光學定律

利用光學技術與材料受應力彈性變形的關係，來獲得該物體受力分佈，此為應力—光學定律之基本綱要。當光線通過受力之光彈材料時，會具有暫時性雙折射（Temporary Double Refraction）的特性，其折射率可以分解為三個互相垂直的分量同時，且三分量與三個主應力軸方向相同。Maxwell[12]在1853年提出，具有雙折射性的透明晶體材料，在承受應力的狀態下，其折射率會隨著受力大小的改變而產生相對應之線性變化，稱之為應力—光學定律（Stress-Optic Law），其折射率與所承受之主應力間之關係可以下式表示：

$$\begin{aligned}
 n_1 - n_0 &= C_1\sigma_1 + C_2(\sigma_2 - \sigma_3) \\
 n_2 - n_0 &= C_1\sigma_2 + C_2(\sigma_3 - \sigma_1) \\
 n_3 - n_0 &= C_1\sigma_3 + C_2(\sigma_1 - \sigma_2)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$



n_0 ：未受應力時光彈材料之折射率

C_1 、 C_2 ：應力—光學係數（Stress-Optical Coefficient）

n_1 、 n_2 、 n_3 ：光彈材料各主應力方向上之折射率

σ_1 、 σ_2 、 σ_3 ：光彈材料之主應力

即可得其相對折射率：

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2)$$

$$n_2 - n_3 = (C_1 - C_2)(\sigma_2 - \sigma_3) = C(\sigma_2 - \sigma_3) \quad (2.5)$$

$$n_3 - n_1 = (C_1 - C_2)(\sigma_3 - \sigma_1) = C(\sigma_3 - \sigma_1)$$

$C = C_1 - C_2$: 相對應力－光學係數 (Relative Stress-Optical Coefficient)

因反射式光彈材料第三方向的厚度非常小，故我們可將其視為平面應力狀態，即 $\sigma_3 = 0$ ，則公式 (2.5) 可簡化成下式：

$$n_1 - n_2 = (C_1 - C_2)(\sigma_1 - \sigma_2) = C(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.6)$$

將公式 (2.6) 代入公式 (2.3)，可得相對相位角差：

$$\Delta = \frac{2\pi h C}{\lambda} (\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.7)$$

簡化後可得應力－條紋級次關係式：

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{N f_\sigma}{h} \quad (2.8)$$

$N = \frac{\Delta}{2\pi}$: 等色線條紋級次 (Fringe Order)

$f_\sigma = \frac{\lambda}{C}$: 為光彈材料之應力條紋常數 (Material Fringe Value In Terms of Stress)

平面應力狀況下最大剪應力為：

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (2.9)$$

將公式 (2.8) 代入，可得最大剪應力與條紋級次N值的關係式：

$$\tau_{\max} = \frac{Nf_{\sigma}}{2h} \quad (2.10)$$

因此，由光彈條紋所量測得到的應力條紋級次 N 值和應力條紋常數，即為主應力差或最大剪應力值。

2-6 塑膠射出成型的原理

目前塑膠生產方式最普遍且快速的製程即為射出成型，因為具有成型過程快速、開模後能夠大量生產、量產亦能得到良好精度、複雜機構結構也能一次完成等優點，因此在目前全球所有塑膠製品中，約有三分之一皆為由射出成型加工而成。此外射出成型也具有加工普遍多元化的優點，可以搭配不同製成方式輔助生產，像是多材質射出成型、氣體輔助射出成型、液體輔助射出成型等，這些製程法幫助生產產品有更多的設計空間，有利於提昇產品價值。

射出成型的原理為利用塑膠的熱塑性，加熱後固體塑膠會變成高分子

熔融流體，並具有流動性及可塑性。將這些高分子流體經過射出機高壓注入模穴，塑料在模穴進行充填過程中，其射出壓力隨著成型過程增加。之後塑料不再充填，產品開始冷卻固化。等到這些塑膠流體冷卻後便會固化成模穴的形狀。當產品固化到足以頂出強度時，射出成型機台之頂出單元便行頂出。頂出後便進行閉模動作，為下一週期準備。

2-6-1 射出成型製程

射出成型技術，是屬於高分子成型中大量生產，且最常使用的方法之一，其整體來說射出成型分成三個階段：充填（Filling）、保壓（Packing）及冷卻（Cooling）。

1. 充填：將塑料加熱熔融至高分子熔膠，利用螺桿加壓推進射出。熔膠會經過噴嘴（Nozzle）、澆道（Sprue）流道（Runner）及澆口（Gate）進入模穴（Gavity），將模穴填滿。
2. 保壓：當充填階段結束時，熔膠填滿模穴，螺桿保持高壓狀態頂住澆口直至澆口冷卻。此階段用來補充因冷卻而造成的塑料體積收縮部份，繼續加壓補料至模穴內得以保持塑料完全填滿模穴。
3. 冷卻：將成品冷卻固化成型至可順利頂出模穴而不會發生變形。射出成型為非穩態之週期程序，所謂非穩態是指射出成型過程隨時間變化，非一成不變；週期性是指射出成型為一循環過程。

2-6-2 射出成型三大要素

影響塑件射出成型的因素，可分三大類為塑膠材料的選擇、成型條件的選定與模具的設計；稱之射出成型三大要素。塑膠材料含樹脂的成型收縮性質、流動性質、熱傳性質、光學性質、機械性質等。成型條件則包含融膠溫度、射出壓力、射出量、射出速率、保壓壓力、保壓時間、鎖模力、模具溫度等。成型模具含模穴尺寸精度及表面處理、流道系統設計、頂出機構系統設計、冷卻系統設計、模具材質等。

2-6-3 射出成型設備介紹

選擇射出成型機時，要注意的項目包括射出量、合模力、機盤尺寸、開模行程、射壓、速率等。一般是以射出量及合模力，來表示機台大小。

射出成型設備主要可分為：

1. 射出單元 (Injection Unit)：

功能為融解、混和塑膠粒，並升壓射出融化的塑膠液。

2. 鎖模單元 (Clamping Unit)：

控制模具的開關、鎖模，並且頂出成品。

射出單元主要由入料筒、加熱管、加設備等組成。入料筒一般為漏斗狀，負責塑膠粒的進料，加熱管外圍有加熱器，負責加溫使的塑膠顆粒軟化，加壓設備負責提高壓力以供液態狀塑膠射出。鎖模單元主要分成提

供鎖模力的機構：有油壓式與機構式兩種，可動側模板：為模具的可動（開合）部分，內有頂出銷可以頂出射出成品。

多數的射出成型設備為水平式（有少數為垂直式），其入料筒位於加熱筒上方，因而塑膠可不斷落入加熱筒中融化，再利用活塞或螺桿的運動，迫使熔化的塑膠料前進通過加熱管，並且幫助塑膠料混合且提高壓力，然後射出到模具中。加熱管利用蒸汽或節溫器保持正確溫度，或者藉由控制纏繞於管壁的電阻加熱線之電流來控制加熱溫度。加熱管中的分流梭

（Torpedo）或者分散器（Spreader）的設計極為重要，因為他使塑膠對著加熱管壁作適當的分佈，且受熱融化卻不置於過熱燒焦。螺桿式射出成型機，是目前最廣泛使用的射出機型態。來自進料漏斗的材料以自身的重量落下，進入加熱管內，由螺桿混料，沿著螺旋槽送到加熱管前端部分，此時塑膠料被外圍的加熱器加熱，而螺桿一邊旋轉使的塑膠料摩擦，也有升溫的功用，並且螺桿旋轉還可以將塑膠料充分混和，是塑膠呈現熔融狀態。螺桿旋轉時，由於塑膠料的反作用力（背壓）是螺桿退後，此時使用限制開關（Limit Switch）限制後退量，在一定的位置停止螺桿旋轉，再開始計量射出。射出後等模穴內材料冷卻後，進行開模動做並且頂出成品，然後關閉模具，再進入射出階段，此時藉射出裝置後部的油壓缸，對螺桿施加射出力，螺桿成為射出柱塞，在高壓下，加熱管前端完全熔融的塑膠料便從噴嘴往模內射出。

2-7 田口實驗方法

[13]田口實驗法(Taguchi Experimental Method):統計實驗法(Statistical Experimental Design)又稱實驗計畫法(Design of Experiment, DOE)原係英國統計學大師費雪(Ronald Fisher)先生於1920年所創。其分析資料的方法稱作變異數分析法(Analysis of Variance, ANOVA),原本應用在農產品產量之提昇作業上。1947年勞博士(Rao, C. R.)建議使用直交表(Orthogonal Array)規劃具有數個參數的實驗計畫(Experimental Plan)。而到了1949年,日本電信實驗室的田口玄一博士(Dr.Genichi Taguchi)結合上述的變異數分析法和規劃實驗的直交表,發展出田口實驗計畫法(田口法),又稱為穩健性設計(Robust Design)。這套為縮短實驗次數、迅速降低成本、改善品質,而發展出一個實驗設計法。由於這個實驗設計法相當好用、且容易找出最優品質控制的參數,因而被廣泛地應用。而傳統的實驗設計法為了實驗精確,故常以完全實驗法來進行,一旦當控制因素及各因素的水準值增加,則實驗次數也跟著成倍數增加。田口式實驗設計法規劃以直交表進行,其目的在於以較經濟的方式即可進行部份要因實驗,雖然犧牲了小部份因素間交互影響作用的解析能力,但卻減少許多實驗次數且可達系統最低要求,並且能夠允許某些程度被外界干擾,同時能保持品質穩定性,且又能對各自身的影響性作出合理的分析,並找出最優品質控制的參數。

2-7-1 直交表的運用

[14]直交表 (Orthogonal) 的基本表示方法為 $L_A(B^C)$ ，其中L為直交表的代號，字母A表示整個系統所需要的實驗次數，B為每個控制因子 (Control Factor) 的水準數 (Level)，C則為控制因子的數量。為了選用能夠滿足系統的直交表，比需先行計算出系統的自由度 (Degrees of Freedom, d.f)，利用自由度的計算選用對應足夠自由度且最少試驗次數的直交表，係依據因素數量、每個因素的水準數、以及欲調查的交互作用數量等加以累加後產生實驗計畫的自由度來決定的，而自由度的計算方法如下：

系統的總自由度 = (每一個控制因子水準數 - 1) × 控制因子的數量

以符號表示即為：

$$d.f = (B - 1) \times C \quad (2.11)$$

舉例來說，假設所設定的控制因子有六個，而每種因子又各自具有五種水準。則系統所對應的自由度為：

每個五水準因素具有 $5-1=4$ 的自由度

總自由度 $d.f. = (6\text{個因素} \times 4\text{ d.f.}) = 24\text{ d.f.}$

因此24為獲得期望資料數量所必須的自由度，直交表 $L_{25}(5^6)$ 其自由度為：

$$\text{總自由度 d.f.} = (6 \text{ 個因素} \times (5-1) \text{ d.f.}) = 24 \text{ d.f.}$$

$L_{25}(5^6)$ 的自由度與系統的自由度相同。因此直交表 $L_{25}(5^6)$ 可以滿足該實驗條件。（直交表 $L_{25}(5^6)$ 如表所示）

表 2.2 $L_{25}(5^6)$ 直交表

No. \ Factor	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3
10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	1	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1

14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	4	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

而在分析完成後，再配合實驗設計法則、品質檢測方式，也就是田口實驗法則規劃控制因子與配置直交表來求出製程最佳化的參數組合，以減少產品開發及模具修改等成本考量，進而達成產品的生產效能提升，提升相關產業的競爭力。

因此根據田口實驗法，本研究採用直交表作為此次實驗計畫法的表格。所以只要進行25次的模流分析所得到的結果即可取代原本全部實驗所需的15625次；能夠節省相當多花費的分析時間。

2-7-2 因子反應 (Factor Response) 分析

在田口實驗法中，會將規劃好各組實驗的結果記錄於直交表之後，如表2.3， $L_4(2^3)$ 的直交表所示：

表 2.3 $L_4(2^3)$ 的直交表

No. \ Factor	A	B	A x B	Data
1	1	1	1	20
2	1	2	2	40
3	2	1	2	25
4	2	2	1	10

為了了解每一個控制因子對於實驗的影響，進而找出最佳解的因子組合，我們可以使用因子反應表與因子反應圖來得到所需要的答案，以表2.3的實驗規劃為例，我們必須先求得每個因子在不同等級下實驗結果的平均值，如：等級1的A的平均響應為直交表中，A為等級1的實驗結果的平均值，即為實驗1與實驗2的平均值；將各個控制因子的平均值整理成反應表 (Response Table) 如表2.4，在繪製成反應圖 (Response Graphs) 如圖2.3，藉此得知每個因子的影響程度多寡與所需條件之最佳組合。

表 2.4 因子反應表

Level	A	B	A x B
1	30	22.5	15
2	17.5	25	32.5

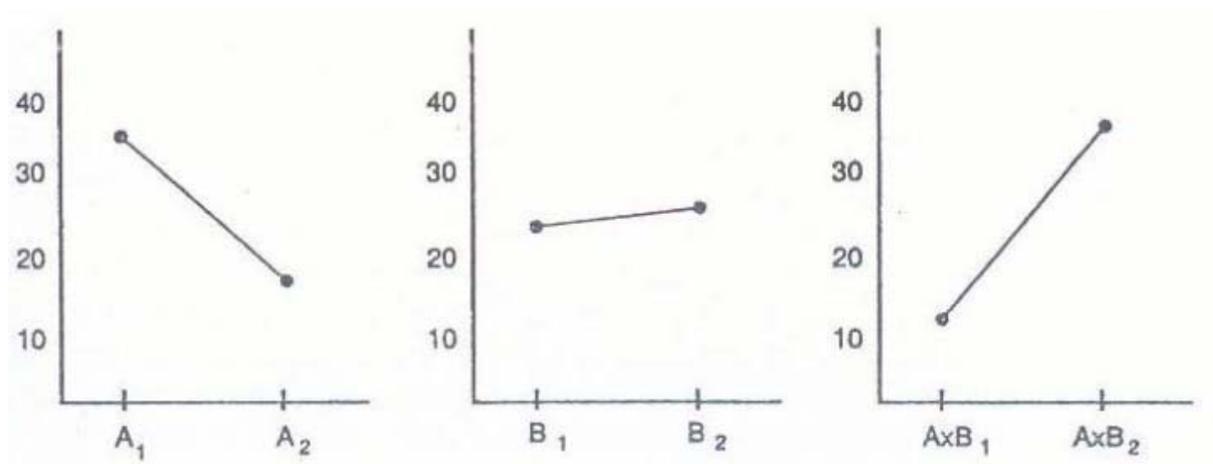


圖 2.3 因子反應圖

2-7-3 品質計量法

[15]參數設計 (Parameter Design) 的目的，在於決定產品與製程的參數值，以求得產品機能的穩定，使其在高水準下運作，而受干擾影響程度為最低。

運用因素非線性與線性的一些關係，找出控制因素與誤差因素間的交互作用，利用非線性關係減少變異，再利用線性關係提高水準，使製程或產品達到堅耐性 (Robustness)。品質工程的首要步驟就是選定合適的量測品質特性。

品質特性分為三類：

1. 計量特性 (Measurable Characteristics)

能以連續尺度量測。

2. 計數特性 (Attribute Characteristics)

不能以連續尺度量測，但能按不連續分級尺度分類，常依主觀判定。

3. 動態特性 (Dynamic Characteristics)

是「系統」的機能品質特性，取決於該系統的投入及其造成的結果(產出)。

而計量特性又分為三類：

1. 望目特性 (Nominal-the Best ,N.B.)：此特性具有一特定目標值。

2. 望小特性 (Smaller the Better ,S.B.)：目標極端值是零。

3. 望大特性 (Bigger-the Better ,B.B.)：目標值為無限大。

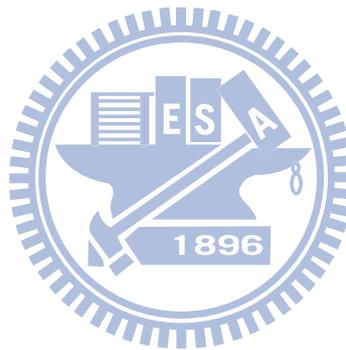
由模擬分析結果可得到均方偏差 (Mean Square Deviation ,M.S.D) 與訊號雜訊比 (Signal to Noise Ratio ,S/N)。信號雜訊比是用來衡量產品品質的一種

統計量度，它可以表示製程或產品的水準及其誤差因素影響的程度。由於選定的品質特性是整體的翹曲量，越小代表品質越佳，因此選定望小特性作為品質的計量法。MSD和S/N公式定義如下：

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n} \quad (2.11)$$

$$\text{MSD} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} = (\bar{y})^2 - \sigma^2 \quad (2.12)$$

$$\frac{S}{N} = -10 \log(\text{MSD}) = -10 \log\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2\right) \quad (2.13)$$



第三章 CAE電腦輔助工程與模流分析

3-1 電腦輔助工程

電腦輔助工程CAE (Computer Aided Engineer) 是應用電腦輔助分析CAD幾何模型兼物理問題的技術，使工程師能在產品或模具設計的階段，發現並解決一些不良的設計，有效率地達到最佳化的目的。CAE是使用近似的數值方法 (Numerical Methods) 來計算求解，而不是傳統的數學求解。故能解決許多在純數學所無法求解的問題，應用層面相當廣泛。目前模流分析的結果具有相當高的準確性，若在搭配應用的實務經驗，將大幅提高模流分析的可信度。

CAE的軟體使用上，早期主要是用在結構體強度計算與航太工業上，而使用在塑膠射出與模具工業為模流分析Moldflow。而隨著CAE軟體的推陳出新，模流分析也逐漸被重視與廣泛的應用，而其後也研究出CAD/CAM/CAE技術，電腦輔助製造幫助產品自動化生產。

本章擬以理論及數值模擬分析，探討射出成型的熔膠在模具充填過程中，成型製程操作條件的影響，期能利用 CAE 模流分析技術選定模具、塑膠材料、與射出機台後就可自動設定加工條件參數，達成CAE 模擬分析與現場實務設計同步化。

電腦輔助工程CAE模流分析技術日益精進，以提昇產業的競爭力及減少現場實際試誤的成本與時程浪費，與傳統設計流程比較如圖所示，使業

者邁向更快速及更周密生產流程。使用者應在最短時候內學會操作CAE 模流分析軟體，熟悉指令操作，依照CAE 模流分析進行產品設計，做為開模前模擬與測試，以達到效果事半功倍。

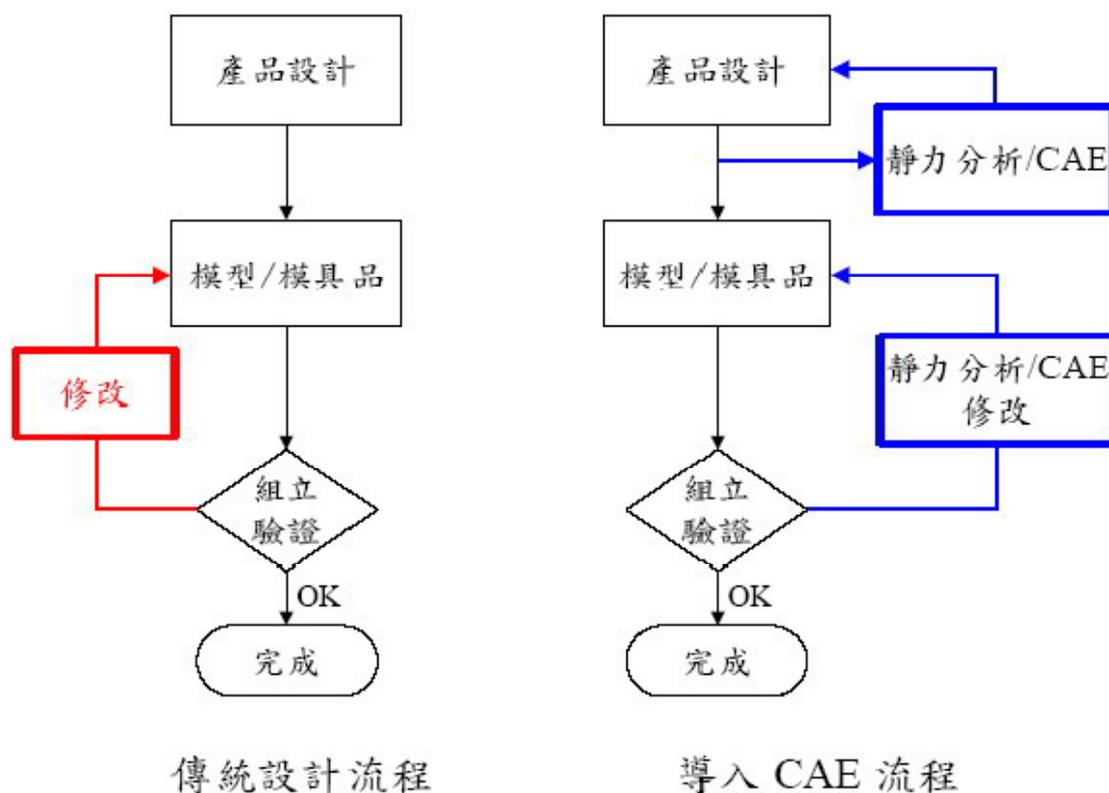


圖 3.1 傳統設計與 CAE 設計比較圖

3-2 模流分析軟體的發展歷史

各領域的CAE應用功能不盡相同,早期主要是用在結構體強度計算與航太工業上。但應用於塑膠射出與塑膠模具工業的CAE在台灣稱為模流分析,這最早是由原文Moldflow直譯而來。而 Moldflow是由此領域的先驅 Mr.

Colin Austin在澳洲墨爾本創立，早期（1970~）只有簡單的2D流動分析功能，並僅能提供數據透過越洋電話對客戶服務，但這對當時的技術層次來說仍有相當的助益；之後開發各階段分析模組，逐步建立今日完整的分析功能。

同一年代，美國Cornell大學也成立了CIMP研究專案，由華裔教授Dr.K.K.Wang所領導，針對塑膠射出加工做系統理論研討，產品名為C-MOLD。自1980年代起，隨著理論基礎日趨完備，數值計算與電腦設備的發展迅速，眾多同類型的CAE軟體漸漸在各國出現，功能也不再侷限於流動現象探討。約1985年工研院也曾有過相似研發，1990年起清華大學化工系張榮語老師也完成CAE-MOLD軟體提供會員使用，即為Moldex3D軟體的前身，目前則由科盛公司著手研發銷售。

Moldflow公司創辦人Colin Austin是個機械工程師，1970年前後在英國塑膠橡膠研究協會工作。1971年移民澳洲，擔任一家射出機製造廠的研發部門主管。在當時，塑膠材料在應用上仍被視做一種相當新穎的物料，具備了一些奇異的特性。但在塑膠加工領域工作了幾年後，他開始對一般塑膠產品的不良物性感到疑慮，一般的塑膠製品並沒有達到物品的適用標準，相反的，塑膠已逐漸成為「便宜」、「低品質」的同義字，但他卻發現，多數主要不良品質的成因卻是因為不當成品設計與不良加工條件所造成的，所以他開始省思，產品設計本身需同時考慮成型階段，才是成功最重要的

關鍵。

這是一個革命性觀念的啟示，模具內部的成型型態才真正決定了產品品質，而不僅是機臺參數設定或產品外觀設計，最佳產品是需要完整考量、系統化的設計觀念才有辦法得到。但即使瞭解了這個觀念，問題仍未解決，因為在當時，模具內部成型時的流動形態，仍無法在試模前判斷；而要去預測流動形態，必須依據非常複雜的流體力學與熱傳問題的聯立方程式求解，以人力來做幾乎是不可能。

隨著學術理論發展，電腦計算功能的進步，正式為模流CAE開啟了一扇門，1978年，Moldflow公司成立，提供初步的電腦輔助分析技術給世界上不同國家的塑膠製造公司，包括汽車業、家電業、電子業以及精密模具業等。

現今，模流技術已普遍為世界各國所肯定，功能也加強到成型各不同階段。現在正是一個轉型的時機，可以預見，當電腦技術幫助縮短成本與時間的同時，沒有跟上腳步的會愈落後愈遠，可能終將被淘汰。

3-3 CAE 軟體 Moldex3D 簡介

Moldex-3D之三維模流分析技術，可充分運用於各類型塑膠射出產品。利用實體混合網格，搭配高效能有限體積計算方法，可於深度設計驗證及

問題解決的面向上，精確預測產品製造的可行性與建議出最佳化設計方案。即便產品屬於粗厚件、厚度差異大、難以定義中間面，甚或產品設計的幾何結構相當複雜，皆可藉此獨門技術真實呈現全三維模擬分析。

Moldex-3D-Mesh為射出成型模擬的網格建置與編修工具，不僅大幅降低使用者建置模型網格的工時，並可同步提高網格品質。Moldex-3D-Mesh支援大多數CAD幾何圖形以及CAE有限元素模型檔案格式，不僅可連結CAD與CAE系統，同時也支援幾何圖形編修、實體與薄殼網格建置的功能。為精確計算射出成型過程所產生的強大剪切應力及摩擦生熱現象，產品厚度方向上的高解析度三維網格佔有舉足輕重之地位。而Moldex-3D邊界層網格技術，可快速建置厚度方向上的高精度高品質網格，大幅增進黏滯加熱效應及壓力分析的精確度，同時縮短使用者建置高精度網格的時間，也大幅提高翹曲預測的精確度。

Moldex3D主要依據Hele-Shaw流動近似法來簡化問題，而經過多年的驗證可知，其分析結果有不錯的精準度。基於Hele-Shaw流動的模式，應用非等溫且具壓縮性的非牛頓黏性流體，描述射出成型加工過程中可壓縮性高分子熔體於充填過程的流動狀態與流場變化行為。模具內的流動行為可利用質量守恆(3.1)、動量守恆(3.2)、能量守恆(3.3)三大理論描述，計算出成品在充填、保壓、冷卻等製成階段的壓力、流速、應力等等物理性質。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (3.1)$$

ρ 為密度， t 為時間， \mathbf{v} 為速度向量。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u} - \boldsymbol{\tau}) = -\nabla P + \rho \mathbf{g} \quad (3.2)$$

P 為壓力， \mathbf{u} 為剪切速率， $\boldsymbol{\tau}$ 為剪切應力。

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (\mathbf{k} \nabla T) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3.3)$$

C_p 為比熱， T 為溫度， \mathbf{k} 為熱傳導係數。

並以泛牛頓流體模式 (Generalized Newtonian Fluid) 與黏彈性流體假設材料的融熔狀態，使用 Modified-Cross model (3.4) 與黏彈性直方程式 (3.5) 來表現其特性。

$$\boldsymbol{\tau} = \eta(T, \dot{\gamma}) (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) \quad (3.4)$$

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}}, \quad \eta_0(T) = B \exp \left(\frac{T_b}{T} \right)$$

C 、 n 、 B 、 T_b 、 β 為材料參數。

$$\boldsymbol{\tau} - \lambda \left(\frac{\partial \boldsymbol{\tau}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \boldsymbol{\tau} - \nabla V^T \cdot \boldsymbol{\tau} - \boldsymbol{\tau} \cdot \nabla V \right) = \eta (\nabla V + \nabla V^T) \quad (3.5)$$

Moldex-3D 支援平行計算，大量增進分析計算效能，在最短時間內完

成網格元素數量巨大的複雜模型分析。此一高效平行計算技術，除可完整進行充填、保壓、冷卻、翹曲、玻纖排向、反應射出等計算，常可同時支援多CPU與叢集式電腦計算。

為進一步能控制雙折射問題，非常多的理論及實驗方式不斷地被提出。就模擬分析而言，傳統2.5D 模擬方法受限於先天理論架構之限制，無法有效掌握雙折射之預測。因此實體三維之方法就受眾人之殷望，在Moldex3D中，光學模組能夠提供使用者能迅速診斷分析塑件之光學特性，藉由雙折射特性 (birefringence)、光程差 (retardation)、光彈條紋 (fringe pattern) 之分析比對即可一覽無遺[16]。

在光學 (Optic) 模組中的模擬分析中，需要射出件在射出成型時，歷經充填 (Filling)、保壓 (Packing)、冷卻 (Cooling) 與翹曲 (Warpage) 等四個過程的相關數據資料進行模擬，因此在執行光學模擬分析必須先行進行一般的模流分析，充填、保壓、冷卻、翹曲再加上光學，為本專題執行模擬分析的主要步驟。在業界與實驗中，通常不會取首次開模的成品作為實驗基準，而是取兩、三次後的成品，為了模擬出這樣的情況，Moldex3D軟體會在充填前面多加一次冷卻的步驟，成為冷卻、充填、保壓、冷卻、翹曲的模流全分析 (Full Analysis – C F P C W) 而在本專題還要在加上光學模組，形成光學全分析 (Optic Full Analysis – C F P C W)。

Moldex3D 整體模擬分析流程分述如下: (圖 3.2)

1. 在 Rhinoceros CAD 軟體中建立模流分析所要使用的 3D 實體模型。
2. 使用 Moldex3D mesh 網格建立模組建構實體網格，並設定各系統之屬性，模具及冷卻水路配置建立感測器，將鋪設好的實體網格輸出成 Moldex3D 的網格模型檔.m3d。
3. 建立 Moldex3D 專案，並將步驟 2 所建立的.m3d 網格檔匯入專案，準備設定前處理器。
4. 選用模流分析所要用的塑膠材料。並設定各種射出成型的加工參數。Moldex3D 內建 CAE 模組與加工機模組供使用者自由設定或是依照機台設定。
5. 執行光學全分析求解 CFPCWO。
6. 分析完畢後，可就充填、保壓、冷卻、翹曲與光學五個階段的結果，進行各種討論與研究。





圖 3.2 Moldex3D 模擬分析流程圖

第四章 射出成形件模流分析方法與流程

4-1 模流分析流程介紹

本研究使用 Moldex3D 軟體作為主要研究工具，並以產品在射出成形製程後，內部殘留應力分布與整體翹曲形變作為分析的目標。流程中分成三大部分進行研究分析：第一部分針對射出成型製程中，各項加工條件參數如融膠溫度、射出壓力、射出量、射出速率、保壓壓力、保壓時間、鎖模力、模具溫度等，單獨設定不同的數值，找出各自對於塑膠件在射出成形製程之後，成品內部殘留應力的影響程度的大小，另一方面則藉由田口實驗法，找出在複數因子參數改變下對於殘留應力的影響程度大小，並對照比較兩種方法之間結果的差異。

在第二部分中，除了分析較為簡單的平板模型以外，另外加入較為複雜的模型，將兩者結果做一對照歸納總結出加工條件的整體影響程度。研究中，使用實驗室致力開發的機器人 — NCTU-CIDM-F4-2009（圖4.1）之足部零件作為較複雜的模型作為對照，該機器人為針對非連續河石地形，設計輕量化、跨步靈巧所設計而成，為了達到快速動作、高地形適應性與輕量化的目標，足部之零件選用塑膠材料作為設計重點。由於在機器人運作中，腳步需承受整體重量與運動時的外力，其強度對於設計上是很重要的指標，為了達到強度最佳化的目標，本研究從塑膠件的射出成型製程開

始，觀察加工條件對於零件的殘留應力影響，以期能降低對於往後二次加工與運作、疲勞破壞上的影響。

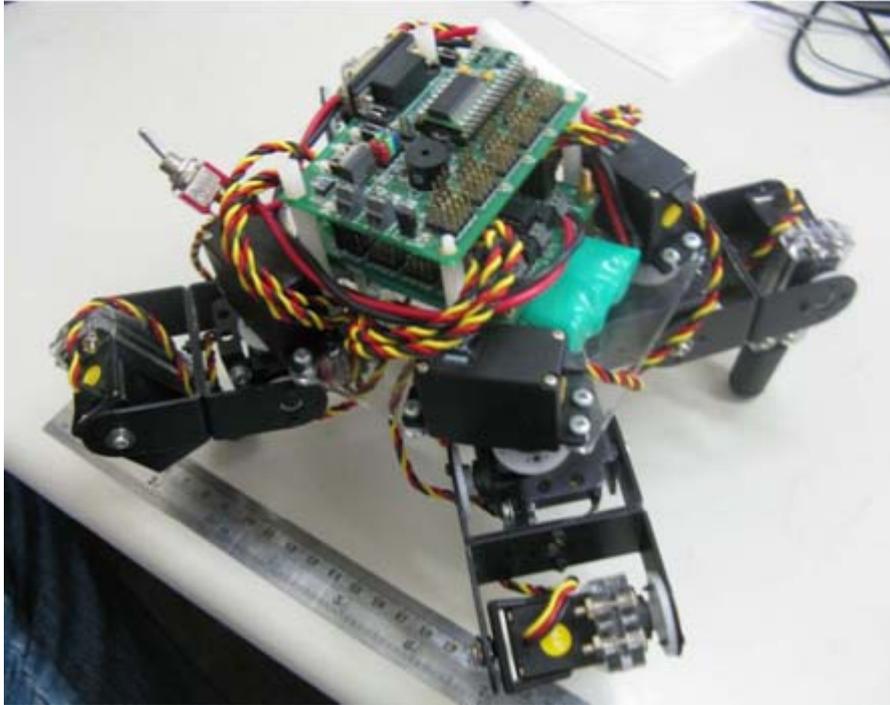


圖 4.1 NCTU-CIDM-F4-2009

第三部分則觀察射出件在射出成形製程之後，翹曲與內部殘留應力之間的影響與關係，並使用這些結果，嘗試歸納出一個最佳化的流程，有效同時降低射出成形件在製成後的殘留硬力與翹曲。整體分析流程如圖 4.2。

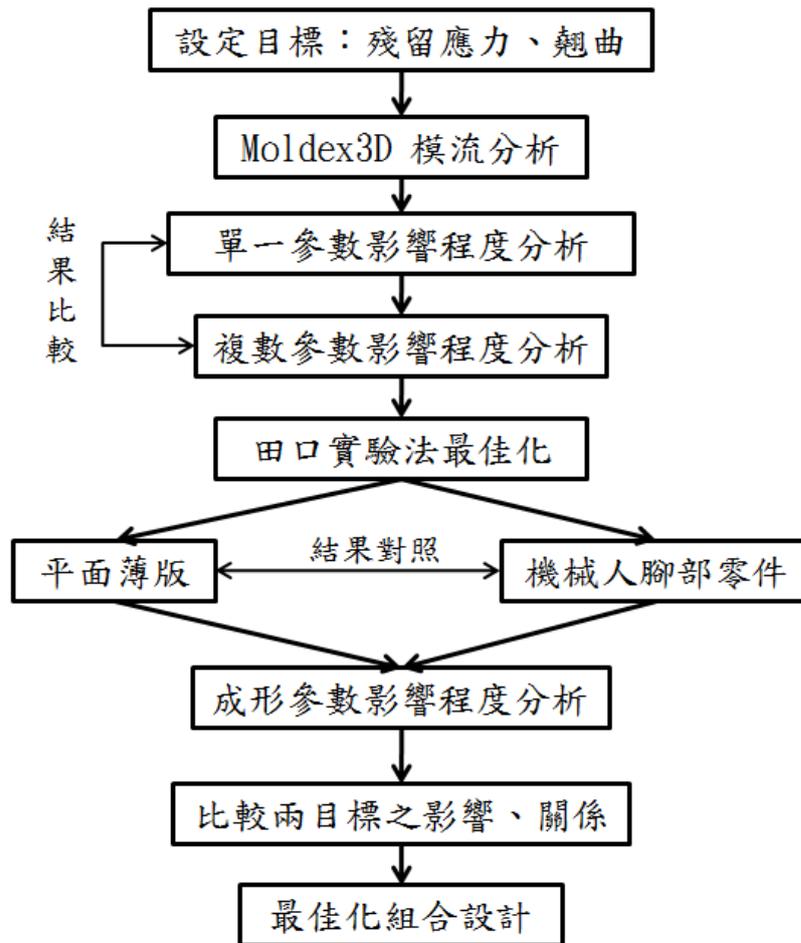


圖 4.2 研究分析流程圖

4-2 模擬分析範例模型簡介

本研究以長 101.6 mm、寬 50 mm、厚 3.3 mm 的長方形薄板與長 84.4 mm、寬 25 mm、厚 4 mm 的機器人足部零件作為模擬分析的模型，詳細外型與尺寸如圖 4.2 與 4.3 分析模型的三視圖以及立體視圖所示，而其澆道採用單一進澆口的方式、水路則為公、母模不同的設計，詳細如圖 4.4。

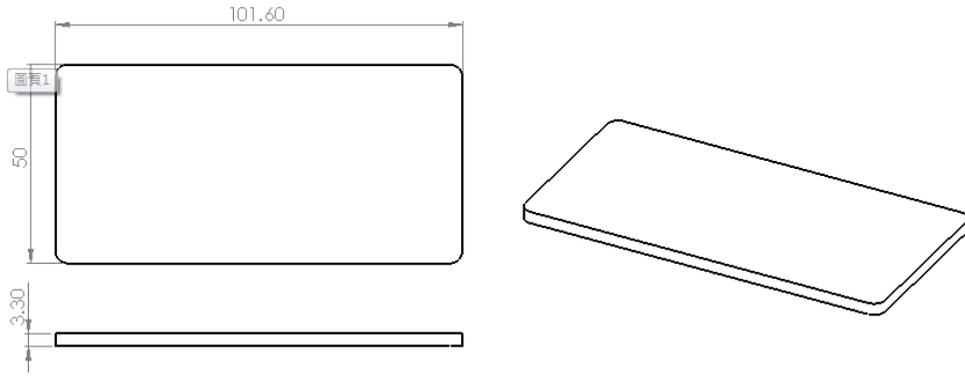


圖 4.3 薄板模型三視圖及立體視圖

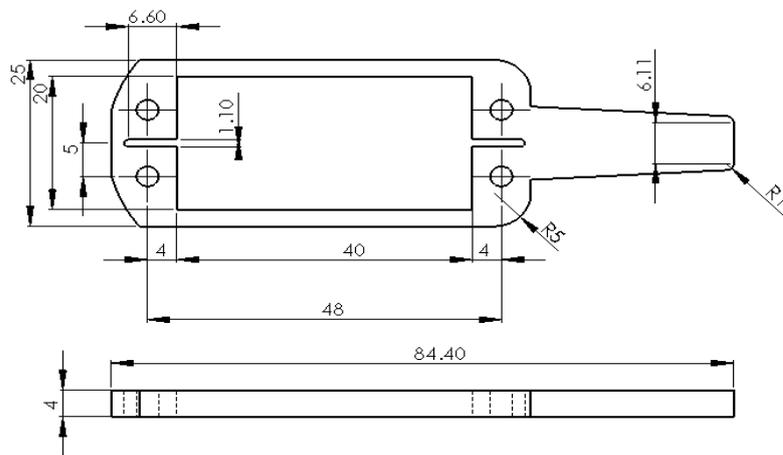


圖 4.4 機械人足部零件三視圖

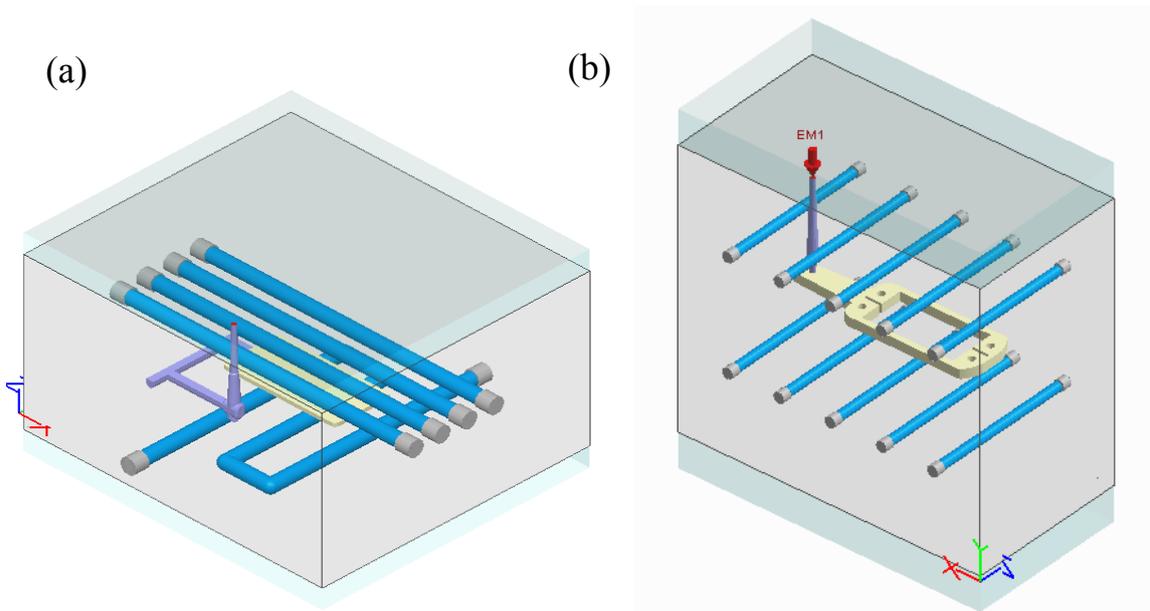


圖 4.5 分析模型澆道、水路及模具配置圖

(a)薄板模型 (b)機器人足部零件

使用模流分析軟體 Moldex3D 中以 CAD 軟體 Rhinoceros 為基礎所建設的 Moldex3D-Mesh 功能模組，能夠幫助使用者針對各式各樣的分析模型手動打造適合的實體網格，包括澆道、水路以及模具等，也能夠藉由該模組建立網，本研究的分析系統即利用此一功能建立模型網格。所建立的實體網格，為了能求得更為精確的分析數值，於澆道口的部份有作細化處理，如圖 4.6 與圖 4.7 所示。

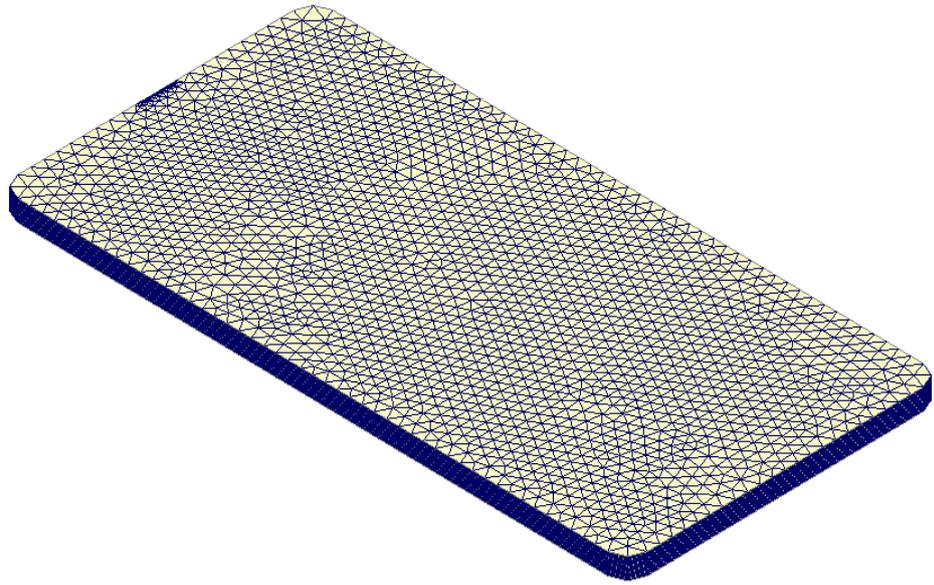


圖 4.6 薄板模型網格

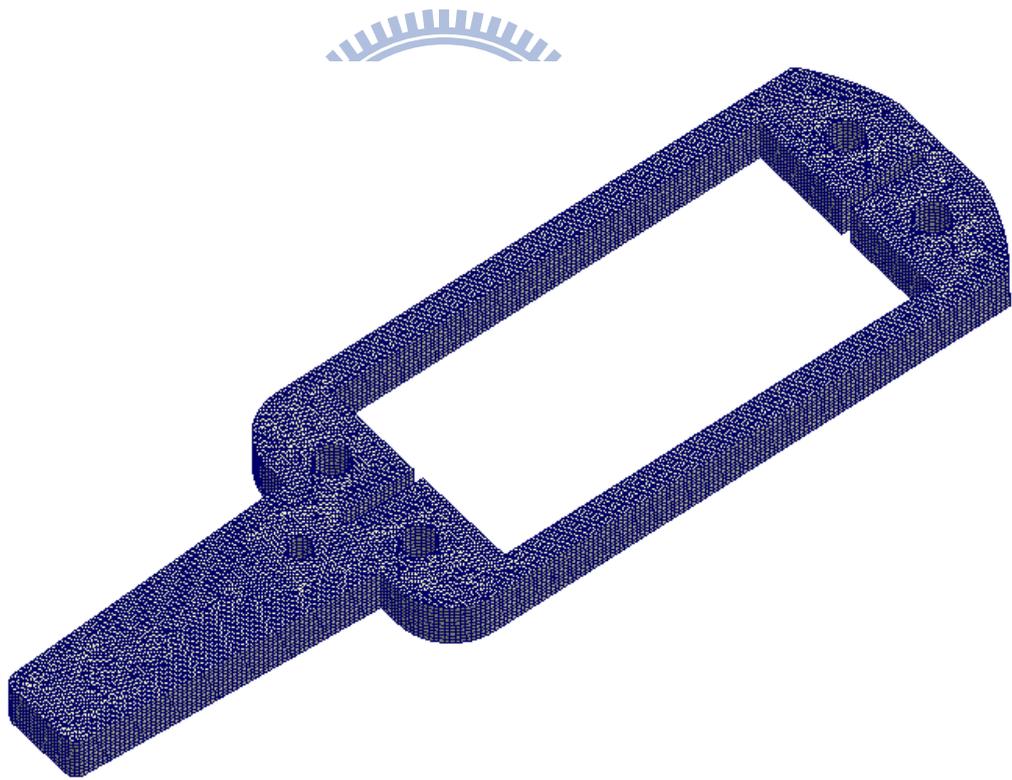


圖 4.7 機器人足部模型網格

本研究在射出成型加工參數評估階段，暫以不考慮改變澆道、水路設計的條件為前提，採用 Moldex3D 模流分析軟體，分別改變各個加工條件，如融膠溫度、射出壓力、射出量、射出速率、保壓壓力、保壓時間、鎖模力、模具溫度等分別進行模流分析模擬，就個別加工條件對成品殘留應力的影響程度大小進行觀測與比較評估。

4-3 模流分析的製成參數

在Moldex3D模流分析軟體中，加工參數的設定，提供加工機模式與CAE模式，使用CAE 模式來進行模流分析，可不用考慮市面上現有機台噸數設定的限制，依照自訂理想的參數設定執行運算，並部影響加工參數評估的結果，本研究採用CAE模式進行分析。

本研究使用PS材料進行模擬分析，其材料特性如表4.1、圖4.5所示，詳細解釋分述如下：

1. 塑料溫度 (Melt temperature)：材料進行加工的溫度範圍，若溫度過高，可能會導致材料發生裂解的現象；溫度過低則材料溶解不完全。
2. 模具溫度 (Mold temperature)：一般使用模具溫度的最高及最低限制。
3. 黏度 (Viscosity)：材料流體流動阻力的度量。黏度越高，流動阻力越大，流動越困難，對一般熱塑性塑料，黏度是塑料成分、溫度、壓力及剪切率的函數。就溫度效應而言，熱塑性塑料的黏度，一般隨溫度升高

而有降低的情形。就剪切率（Shear rate）的效應而言；剪切率越高，代表加工變形速率越大，由於高分子鏈被排向的結果，使大部份的塑料具有黏度隨剪切率升高而下降的切變致稀性（shear-thinning），如圖4.5及4.6。

表 4.1 PS 材料特性表

Description	
Polymer	PS
Grade Name	STYRON 666D
Producer	DOW
Comment	MFI (200,5) =8g/10min, MVR (200,5) =6.6, D=1.04g/cc
Process condition	
Melt temperature (minimum)	200 °C
Melt temperature (normal)	220 °C
Melt temperature (maximum)	240 °C
Mold temperature (minimum)	25 °C
Mold temperature (normal)	45 °C
Mold temperature (maximum)	65 °C
Ejection temperature	102 °C
Freeze temperature	122 °C
Optical property	
Un-oriented refractive index	1.59
Flow-induced stress-optical coefficient	$-5.2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{dyne}$
Thermally-induced stress-optical coefficient	$9.2 \times 10^{-13} \text{ cm}^2/\text{dyne}$

Viscoelasticity	
G	10^6 dyne/cm ²

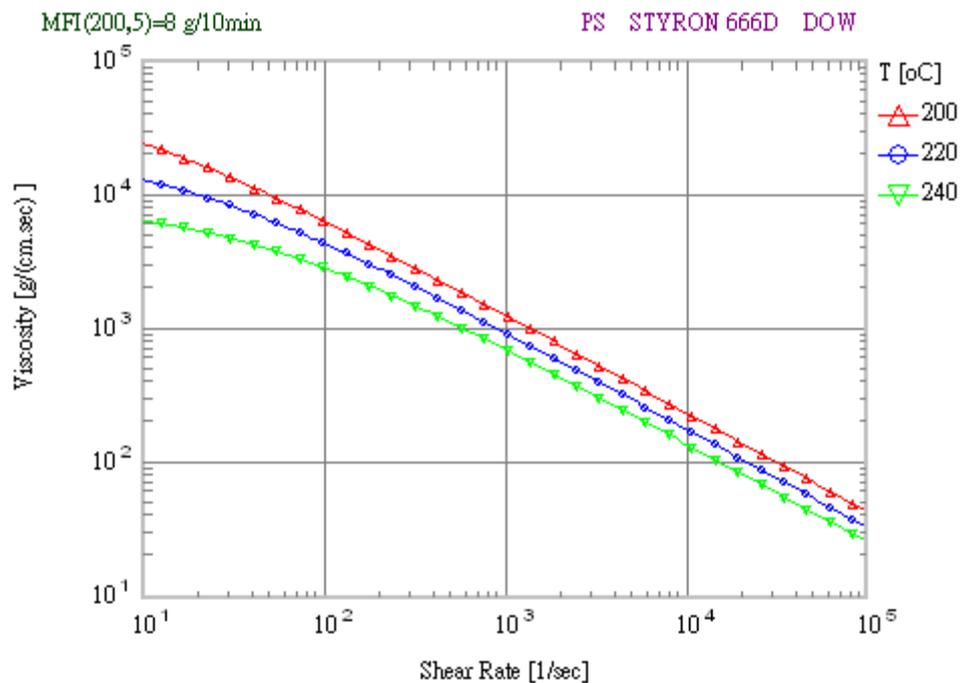


圖 4.8 PS 黏度-剪切率圖

本研究的兩種材料薄板之初步分析的加工條件則如表 4.3 所示，射出成形製程加工條件的特性則分述如下：

1. 保壓時間：由澆口固化時間決定，當澆口達到固化時就無法繼續保壓。根據流率圖找出流率為0的時間點，代表射出機無法繼續射出流體，保壓時間結束。在業界一般會根據經驗估算1.5倍左右的時間來做為實際射出的保壓時間。
2. 保壓壓力：根據經驗先取射出壓力的60~80%作為參考再由翹曲值和體積收縮率修正。

3. 冷卻時間：原則上冷卻時間越長則翹曲值越好但是必須根據現場生產的效率而定，如果冷卻時間過長，反而會造成成型週期時間過長而使得生產效率降低，如此一來便不符合經濟效益。

表 4.2 初步加工條件

射出時間	0.75 s
融膠溫度	240 °C
模具溫度	52 °C
射出壓力	221.8 MPa
射出量	25.1697 cc
保壓時間	20 s
保壓壓力	221.8 MPa
冷卻時間	25 s

本研究選用射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間作為控制因子，將上列加工條件及材料特性的限制作為基準，將各參數分成多個等級：

1. 射出時間：

在射出成形製程中，高壓高溫的環境，使的小型塑膠件的充填製程十分快速。本研究及以初步加工條件的射出時間0.75秒作為基準，以0.25秒為間隔單位分別取0.25秒、0.5秒、0.75秒、1.0秒、1.25秒等五個等級

做模擬分析。

2. 融膠溫度：

融膠溫度依據材料的不同會有不同的溫度範圍，這些特性通常由材料商所提供，本研究所使用的PS材料其融膠溫度範圍在200~240°C之間，若低於這個範圍則材料無法完全融熔，溫度較高則容易造成材料裂解、燒焦，都會大大的將低射出成形製程後成品的品質。本研究以此溫度範圍五等分，分成200°C、210°C、220°C、230°C、240°C五個等級的融膠溫度。

3. 射出壓力：

射出成形製程的射出壓力主要限制於所使用射出機機台的出力。本研究分成50、100 MPa、150 MPa、200 MPa、250MPa五種等級。

4. 保壓時間：

保壓時間的決定在業界主要依賴經驗，保壓時間長，成形的品質提高，但卻會把整體製程時間拉長，故勢必在經濟效益與品質中做一妥協。以初步的加工條件為基準，本研究取10秒、15秒、20秒、25秒、30秒五種時間作為因子等級。

5. 保壓壓力：

保壓壓力主要會影響成品的翹曲與縮變，一般來說，保壓壓力高，收縮會較小，但收縮率範圍會較大，不同的保壓行程，會造成不同的體積收縮率，所以保壓並不是愈大愈好；保壓不足，體積收縮率會很大，容易產

生凹陷及縮減尺寸，但過大保壓卻也易造成毛邊，以及形成產品翹曲。本研究亦以初步加工條件的221.8MPa為基礎，200MPa、210MPa、220MPa、230MPa、240MPa作為因子等級。

6. 冷卻時間：

與保壓時間相同，取決於經濟效益與品質。在Moldex3D模留分析軟體中，提供參考材料特性、模溫、冷卻水溫等因素，計算出理想的冷卻時間的功能。本研究取取15秒、20秒、25秒、30秒、35秒五種時間作為因子等級。

將上述的因子等級分析單項加工條件對於物件成形後，其內部的殘留應力大小的影響程度。

之後依照田口實驗法，將各項加工參數依造等級製成直交表，並執行模擬分析，以找出殘留應力在複數條件改變下的影響程度，並觀察在這些結果中，殘留應力與翹曲是否有些關連。

4-4 光彈條紋模擬精度校正

模流分析軟體Moldex3D所提供的光學模組能夠協助工業上預先模擬光彈效應，有效快速地預測雙折射，並釐清重要參數，但卻依然與實際實驗所得到的光彈條紋有著些許誤差，為了將光學模擬分析所得出來的光彈條紋能夠與現實實驗結果相符，本研究將調整分析程式中的一些計算器參數，讓分析的環境能夠更接近真實情況，提昇分析結果的準確度。調整的參數

分別為壓力影響黏度係數 D 與黏彈參數 G 。

以一般非牛頓流體而言，在流動時，受外部壓力會使其黏度有所變化，在黏度數學式中，壓力影響黏度係數 D 值敘述了此一特性，當 D 值愈大時流體的黏度因而跟著增加。[17]

應力鬆弛時間(Relaxation time)其定義為流體在不受任何外力影響的情況下，將內部應力釋放一半所需之時間，因此 G 為黏彈係數與應力釋放係數的比值， G 值上升時，應力釋放係數會相對的減小，材料釋放內部應力所需的時間減少，換句話說，材料會變得較容易釋放本身內部所殘留的壓力，因此會造成整體的應力降低並且有均勻分布的趨勢。

D 值與 G 值對於光彈條紋的模擬分析影響分述如下：

- 1、受到外在壓力影響，壓力影響黏度係數 D 會改變塑膠件在成形時的整替射出壓力，而對於進澆口至模穴的壓降亦會造成變化，進而影響光彈條紋的數量與間隔。
- 2、黏彈參數 G 描述著流體黏彈的特性，當 G 值有所改變時，對於塑膠射出件成品在射出時，剪切應力值的大小與分布都有所影響，因而改變內部殘留應力的分佈，使光彈條紋呈現不同的樣貌。

一般而言，使用分析軟體時，除了一些前處理的設定參數需要使用者自行設定以外，計算器的計算參數會直接使用系統的預設值，但為了能讓模擬分析的結果更加符合實際情況，則必需調整計算參數。根據研究的結果

[17]，PS材質的塑膠件在 $D = 0$ 、 $G = 2 \times 10^6$ 的參數下所得的模擬光彈條紋最為接近實驗結果，因此本研究及以此一參數作為模擬分析的條件，以提升研究的準確度。



第五章 模擬分析結果與討論

藉由Moldex3D的模流分析，能夠得到以下各製程中，模型內部的狀態以及結果：

1. 充填 (Flow)：

流動分析模組可預測縫合線、包封位置、射出壓力、鎖模力、機器噸數、流道系統等資訊，協助檢視塑膠流動情形。

2. 保壓 (Pack)：

保壓分析模組可預測體積收縮、溫度分佈、密度分佈等資訊，協助避免過度保壓與不均勻體積收縮等成型問題。

3. 冷卻 (Cool)：

冷卻分析模組可預測冷卻時間、模面溫差、熱通量分佈等資訊，快速準確分析模具水路的安裝及建議修改設計。在充填、保壓、冷卻三個項目之中，也都能檢測出在各個階段中，成品內部殘留應力的分佈與大小，並且以方向分量、Von-Mises、主軸應力...等各種方式呈現。

4. 翹曲 (Warpage)：

翹曲分析模組產品在脫模完成後可能產生的翹曲變形外觀，幫助找尋發生翹曲的主要原因以防止翹曲的發生。經過模流分析結果之後，得到翹曲分佈的結果。

5. 光學 (Optic) :

分析出射出成型之光學特性，如流動所引導之光學特性：從充填到冷卻階段之雙折射變化，以及相位差、光彈條紋。熱應力引導之光學特性：熱應力引導之雙折射變化，以及相位差、光彈條紋。或者整合流動所引導之光學特性與熱應力引導之光學特性。

在各種Moldex3D模流分析所得之結果中，研究主要觀察殘留應力與光彈條紋兩項結果作為研究的數據：藉由冷卻結果中的殘留應力，觀察在各種加工條件組合之下，預測成品實際開模頂出後內部殘留應力的大小與分布；光學結果中光彈條紋，除了能夠更輔助觀察成品的殘留應力分布外，亦能夠觀察出成品內部殘留應力的梯度與集中處，並計算出條紋級數，以利比較。



5-1 初步加工條件分析

圖5.1是薄板模型在表4.3的初步加工條件下所分析出最大剪應力分布圖，最大剪應力最大值為0.504MPa，位於進澆口的位置，整體殘留應力以進澆口為中心，以輻射狀向外擴散，數值由大而小。為了了解模型內部的應力分布，本研究使用類似於斷層掃描的作法，將模型一固定軸項作多層剖面，如圖5.2所示，圖中靠近進澆口附近呈現淺藍、綠色，屬於應力較高的部分，其值約在0.03~0.06MPa之間。總觀圖5.1、5.2，可知進澆口附近由於流速快、壓力高，容易出現較大的殘留應力，此外，在成品的表面，由

於溫度較低，材料於該處會呈現半凝固半融熔的狀態，分子間拉拉扯扯的現象較為頻繁，因此容易累計應力造成殘留應力的出現。

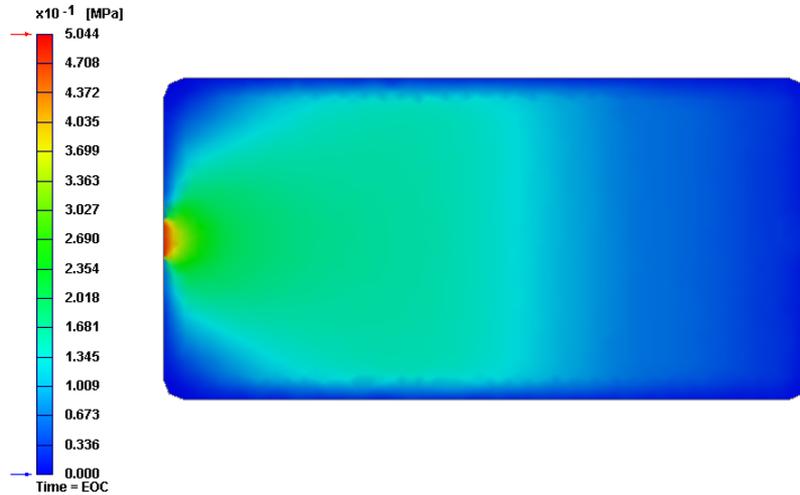


圖 5.1 PS 薄板初步分析最大剪應力分布圖

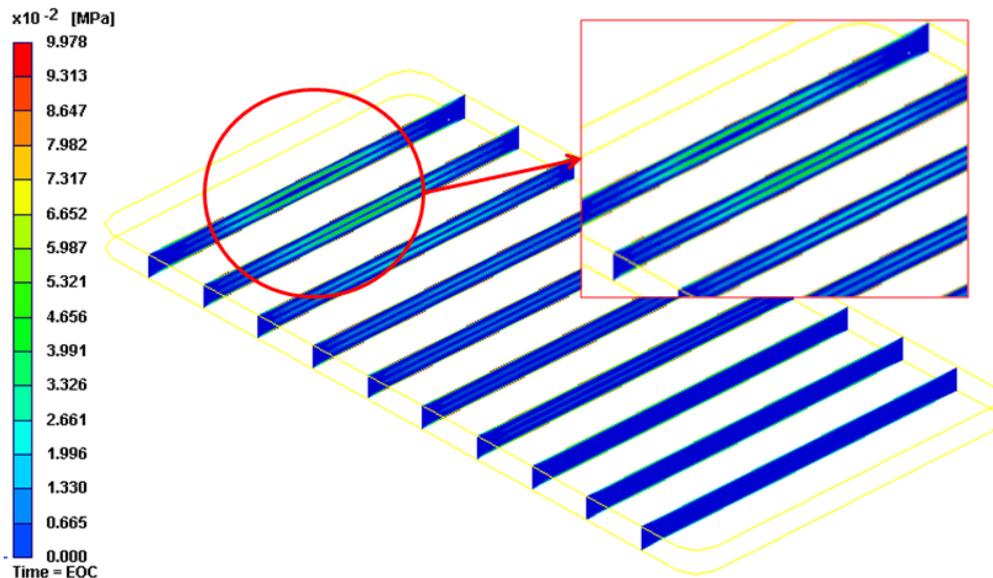


圖 5.2 薄板初步分析最大剪應力斷層剖面

本研究所模擬的光彈條紋是屬於暗場的條紋，將流動末端處的黑色條

紋定為 0 條紋級數，以朝向進澆口的方向算起，第二條黑色條紋的條紋級數為 1，第三條黑色條紋的條紋級數為 2，以此類推。如圖 5.3 所示，在初步條件下分析，薄板之模擬光彈條紋的最大條紋級數為 4.588。

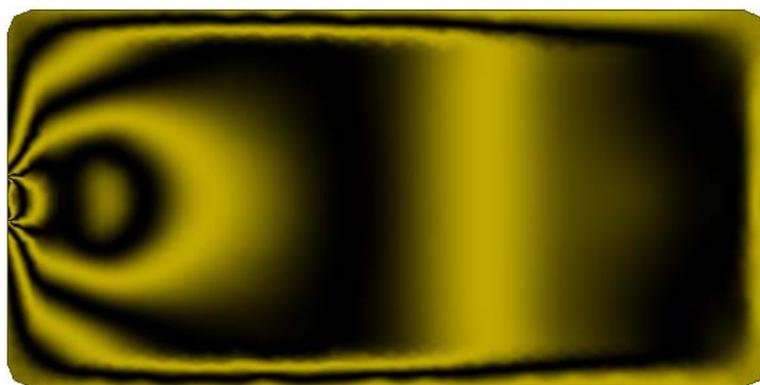


圖 5.3 PS 薄板初步分析光彈條紋

5-2 單一因子變化分析

為了了解射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間等六個加工條件對於射出件在射出成型製程後，內部殘留應力的影響程度，本研究先以在其他加工條件不變的條件下作為前提，來改變特定加工條件的方式做一初步的分析。

根據初步分析的加工條件以及材料特性的限制，本研究將各種加工條件在特定範圍下設定五個等級，並別執行分析，觀察每一種加工條件對於殘留應力的影響程度，表 5.1、5.2、5.3、5.4、5.5 與 5.6 即顯示薄板模型在五個不同等級的射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與

冷卻時間等加工條件下，所造成的最大剪切應力的最大值與各組變化中的變化率。如表 5.1 所示，最大剪應力的值，在射出時間的變化下有著明顯得變化，但每此的變化值不一，甚至有達到 1 倍以上的劇變；在表 5.2 中，隨著融膠溫度的改變，最大剪應力值均維持著約 20% 左右的穩定變化；表 5.3 的保壓時間，雖有著穩定的變化趨勢，但都在 0.2% 上下，對於最大剪應力的變化並不大；表 5.4 則是冷卻時間對於最大剪應力最大值的影響程度，其改變率約在 0.03%~0.7% 影響程度雖大於保壓壓力，但極不穩定。而由表 5.5 可得知，隨著保壓壓力改變，成品的最大剪切應力變化率都小於 0.5%，影響效果不彰；射出壓力的影響則如表 5.6 所示，最大剪應力的值無任何變化，不受加工條件的變化影響。



表 5.1 薄板於各射出時間下之最大剪應力表

Injecting t (s)	Max Shear Stress (MPa)	Variation
0.25	1.292	
0.5	2.674	-1.06966
0.75	5.044	-0.88631
1	4.605	0.087034
1.25	3.98	0.135722

表 5.2 薄板於各融膠溫度下之最大剪應力表

Melt T (°C)	Max Shear Stress (MPa)	Variation
200	1.277	
210	1	0.216915
220	0.795	0.205

230	0.633	0.203774
240	0.504	0.203791

表 5.3 薄板於各保壓時間下之最大剪應力表

Packing t (s)	Max Shear Stress (MPa)	Variation
10	0.5072	
15	0.5058	0.00276
20	0.5044	0.002768
25	0.5031	0.002577
30	0.5017	0.002783

表 5.4 薄板於各冷卻時間下之最大剪應力表

Cooling t (s)	Max Shear Stress (MPa)	
15	7.985	
20	7.931	0.006763
25	7.928	0.000378
30	7.869	0.007442
35	7.831	0.004829

表 5.5 薄板於各保壓壓力下之最大剪應力表

Packing P (MPa)	Max Shear Stress (MPa)	Variation
200	0.5154	
210	0.5156	-0.00039
220	0.5156	0
230	0.5153	0.000582
240	0.5156	-0.00058

表 5.6 薄板於各射出壓力下之最大剪應力表

Injecting P (MPa)	Max Shear Stress (MPa)	Variation
-------------------	------------------------	-----------

50	7.952	
100	7.952	0
150	7.952	0
200	7.952	0
220	7.952	0

圖 5.4 至圖 5.9 是將上述表格中的數據逐一繪製，將各個加工條件的影響趨勢，更淺顯易懂的呈現出來。

由這些圖中，融膠溫度、保壓時間與冷卻時間都有值愈大，最大剪應力值則會下降的趨勢，其中以射出時間的影響程度最為明顯；射出時間的影響效果彰顯，以時間 0.75 秒為分界，射出時間小於 0.75 秒，最大剪應力值有著正比的關係，大於 0.75 秒則違反此關係；冷卻時間雖然有著穩定的趨勢，但影響非常小；保壓壓力與射出壓力的影響程度曲線近似於水平，對於最大剪應力值的影響甚小，保壓壓力甚至對於剪應力值毫無影響。

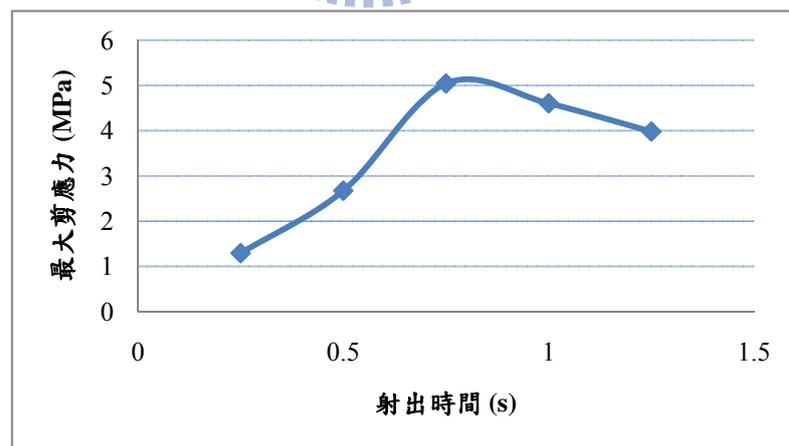


圖 5.4 薄板於各射出時間下之最大剪應力反應圖

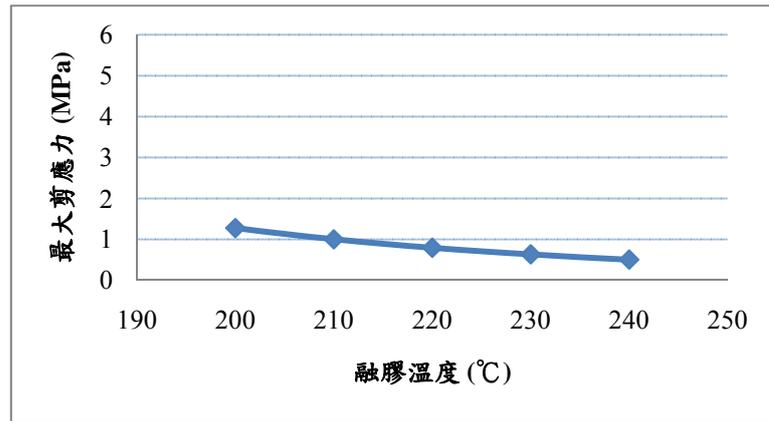


圖 5.5 PS 薄板於各融膠溫度下之最大剪應力反應圖

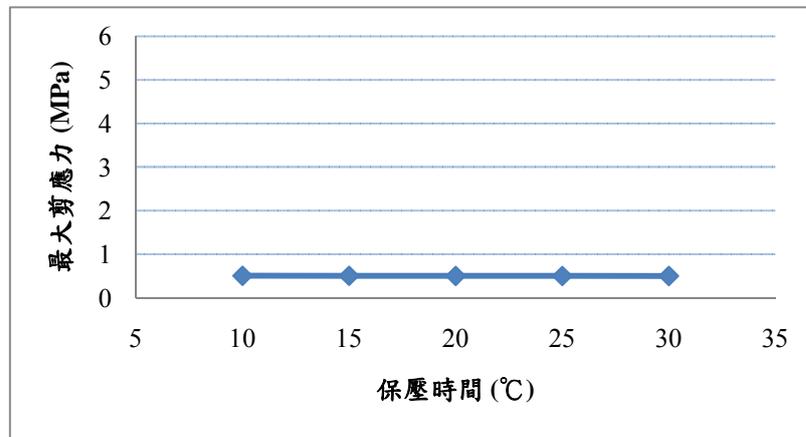


圖 5.6 PS 薄板於各保壓時間下之最大剪應力反應圖

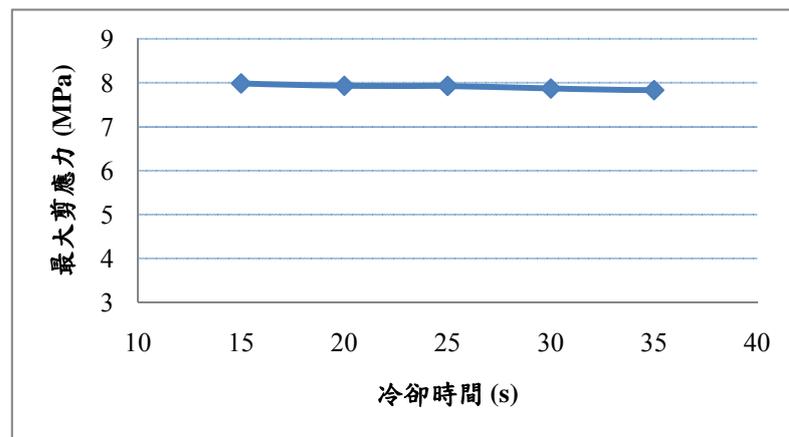


圖 5.7 薄板於各冷卻時間下之最大剪應力反應圖

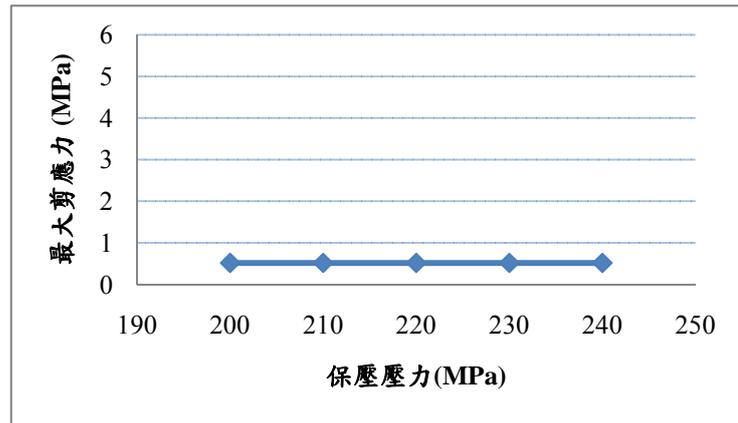


圖 5.8 薄板於各保壓壓力下之最大剪應力反應圖

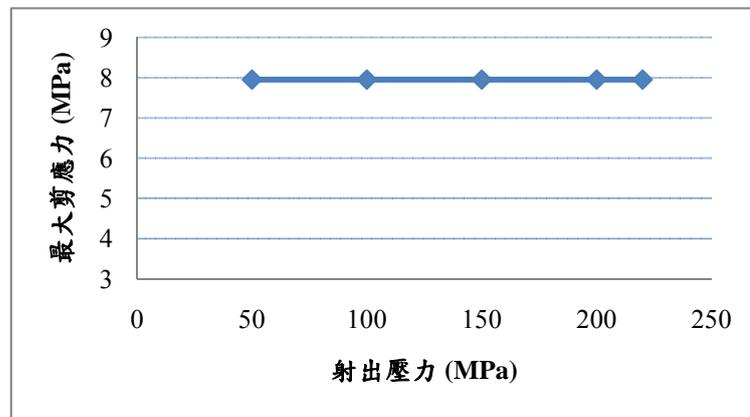


圖 5.9 薄板於各射出壓力下之最大剪應力反應圖

5-3 田口實驗法進行複數因子變化分析

在實際的實驗中，控制因子與控制因子之間可能會存在著交互作用的效應，因而影響控制因子的影響程度，為了更加符合實際射出成型的結果，在了解單一因子的影響程度特性與趨勢後，本研究就由田口氏實驗法進行複數因子變化的分析。

首先將所要分析的 6 項控制因子：射出時間、融膠溫度、射出壓力、

保壓時間、保壓壓力與冷卻時間等，依照不同的等級規劃出如表 5.7 所示的因子等級表，並依序給予 A~F 當作代號。本研究的實驗規劃中，有 6 項控制因子且各分別有 5 個等級，由(2.11)可得知實驗的自由度為 24，故選用相同自由度的表 5.8 $L_{25}(5^6)$ 直交表，進行 25 種加工條件組合的模流分析。

表 5.7 因子等級表

	Factor\Level	1	2	3	4	5
A	Injecting t (s)	0.25	0.5	0.75	1	1.25
B	Melt T (°C)	200	210	220	230	240
C	Packing t (s)	10	15	20	25	30
D	Cooling t (s)	15	20	25	30	35
E	Packing P (MPa)	200	210	220	230	240
F	Injecting P (MPa)	50	100	150	200	250

表 5.8 模擬分析直交表

No.\Factor	A	B	C	D	E	F
1	1	1	1	1	1	1
2	1	2	2	2	2	2
3	1	3	3	3	3	3
4	1	4	4	4	4	4
5	1	5	5	5	5	5
6	2	1	2	3	4	5
7	2	2	3	4	5	1
8	2	3	4	5	1	2
9	2	4	5	1	2	3

10	2	5	1	2	3	4
11	3	1	3	1	2	4
12	3	2	4	1	3	5
13	3	3	5	2	4	1
14	3	4	1	3	5	2
15	3	5	2	4	1	3
16	4	1	4	2	5	3
17	4	2	5	3	1	4
18	4	3	1	4	2	5
19	4	4	2	5	4	1
20	4	5	3	1	4	2
21	5	1	5	4	3	2
22	5	2	1	5	4	3
23	5	3	2	1	5	4
24	5	4	3	2	1	5
25	5	5	4	3	2	1

本研究以兩種模型進行模擬分析，一種為幾何形狀較為簡單的薄板模型，另一種則為較為複雜的機器人足部零件，以射出成型製程之後殘留應力、翹曲做為分析結果，並以光學模組中的光彈條紋輔助觀察，記錄光彈條紋級數以及其標準差，作為殘留應力分布狀況的參考。

5-3-1 薄板模型

1. 最大剪應力

根據 Maxwell 的應力－光學定律[12]，在平面二維的狀態下，最大剪應力值為殘留應力的等效值，本研究所使用的模型皆為長、寬度遠大於厚度，可是為平面狀態，故在殘留應力的分析上選用最大應力值作為分析結果。

最大剪應力分布狀態均與圖 5.10 相同，最大值位於進澆口位置附近，整體殘留應力以進澆口為中心，以輻射狀向外擴散，數值由大而小。

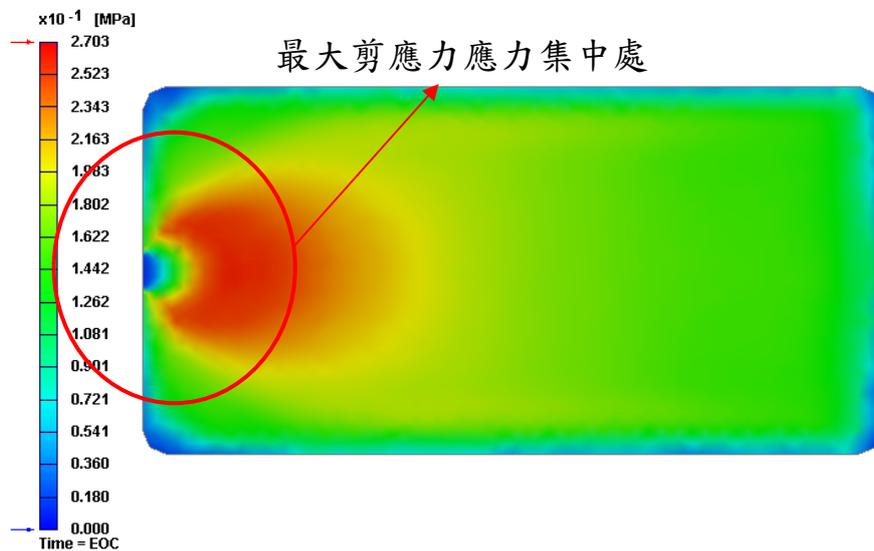


圖 5.10 薄板最大剪應力分布圖

將各項組合分析的最大剪應力值的最大值分別記錄下來，如表 5.9 所示，對照控制因子與等級計算出各個控制因子的平均響應，繪製出表 5.10 的反應表與圖 5.11 的反應圖。

由表 5.10 與圖 5.11，可看出相較於其他加工條件，射出時間與融膠溫度對於殘留應力的影響較為顯著。

表 5.9 薄板最大剪應力模擬分析結果

No. \ Factor	A	B	C	D	E	F	MSS(MPa)
1	1	1	1	1	1	1	0.408
2	1	2	2	2	2	2	0.3418
3	1	3	3	3	3	3	0.286
4	1	4	4	4	4	4	0.2349
5	1	5	5	5	5	5	0.2021
6	2	1	2	3	4	5	0.8638
7	2	2	3	4	5	1	0.6715
8	2	3	4	5	1	2	0.5481
9	2	4	5	1	2	3	0.3929
10	2	5	1	2	3	4	0.3814
11	3	1	3	5	2	4	1.253
12	3	2	4	1	3	5	1.005
13	3	3	5	2	4	1	0.7897
14	3	4	1	3	5	2	0.641
15	3	5	2	4	1	3	0.5159
16	4	1	4	2	5	3	0.9919
17	4	2	5	3	1	4	0.791
18	4	3	1	4	2	5	0.6869
19	4	4	2	5	3	1	0.5678
20	4	5	3	1	4	2	0.4708
21	5	1	5	4	3	2	0.841
22	5	2	1	5	4	3	0.6863
23	5	3	2	1	5	4	0.5593
24	5	4	3	2	1	5	0.4607
25	5	5	4	3	2	1	0.4079

表 5.10 薄板最大剪應力反應表

Level	A	B	C	D	E
1	0.29456	0.87154	0.56072	0.58014	0.56898
2	0.57154	0.69912	0.56972	0.58434	0.56854
3	0.84092	0.574	0.6284	0.58958	0.5746
4	0.70168	0.45946	0.63756	0.5947	0.64392
5	0.59104	0.39562	0.60334	0.65098	0.67194

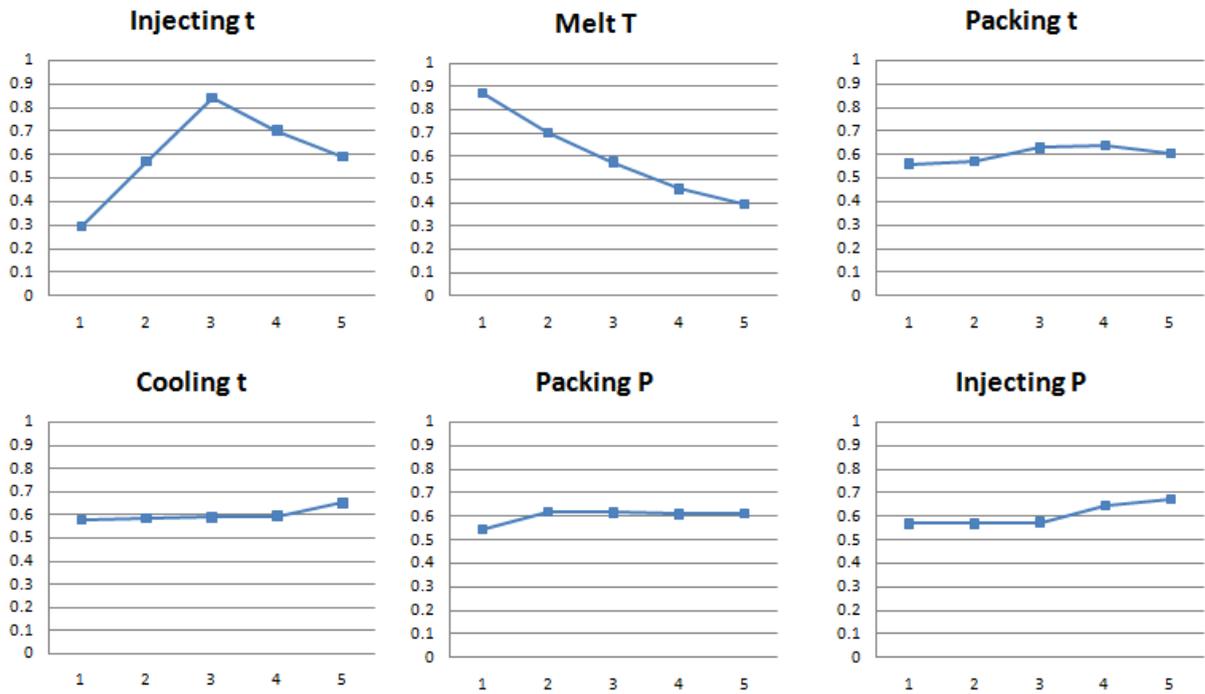


圖 5.11 薄板最大剪應力反應圖

2. 翹曲

研究所分析的翹曲是取翹曲變形總位移結果中的最大值，將翹曲值最大的部份進行比較，如圖5.12。

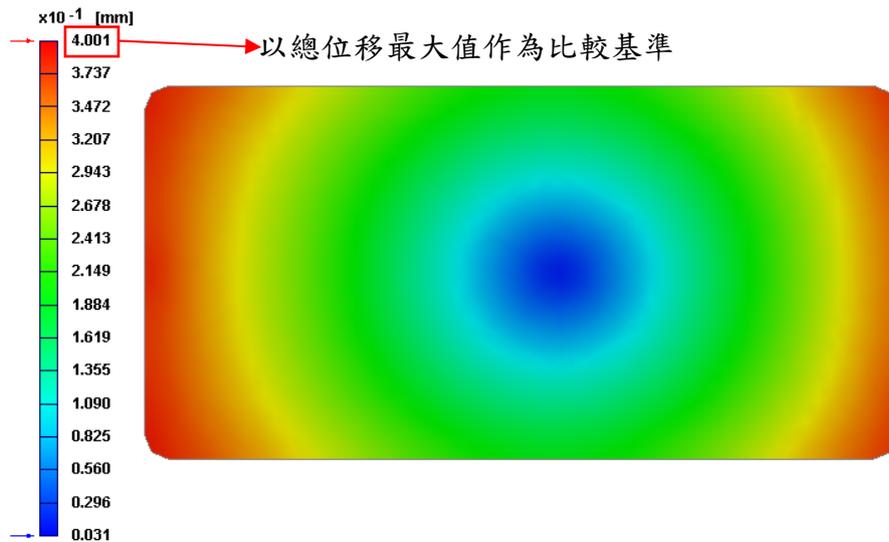


圖 5.12 薄板總位移分布圖

將總位移的最大值記錄於直交表之後，如表 5.11 所示，同樣根據控制因子與等級計算出各個控制因子的平均響應，繪製出表 5.12 與圖 5.13 的反應表與反應圖。

觀察表 5.10 與圖 5.10，冷卻時間與保壓壓力對於成品的翹曲總位移有較明顯的影響，但冷卻時間在等級 2 到 4 之間的影响程度下降，即 20 秒、25 秒、30 秒三個時間中對於翹曲是較無影響的。

表 5.11 薄板翹曲模擬分析結果

No.\Factor	A	B	C	D	E	F	WP(mm)
1	1	1	1	1	1	1	0.04035
2	1	2	2	2	2	2	0.0419
3	1	3	3	3	3	3	0.04404
4	1	4	4	4	4	4	0.04673
5	1	5	5	5	5	5	0.05313
6	2	1	2	3	4	5	0.04607

7	2	2	3	4	5	1	0.04865
8	2	3	4	5	1	2	0.04154
9	2	4	5	1	2	3	0.04279
10	2	5	1	2	3	4	0.04736
11	3	1	3	5	2	4	0.04371
12	3	2	4	1	3	5	0.044
13	3	3	5	2	4	1	0.04963
14	3	4	1	3	5	2	0.05128
15	3	5	2	4	1	3	0.04135
16	4	1	4	4	5	3	0.05145
17	4	2	5	5	1	4	0.04091
18	4	3	1	1	2	5	0.04371
19	4	4	2	2	3	1	0.04977
20	4	5	3	3	4	2	0.04741
21	5	1	5	2	3	2	0.04609
22	5	2	1	3	4	3	0.04783
23	5	3	2	4	5	4	0.0495
24	5	4	3	5	1	5	0.03969
25	5	5	4	1	2	1	0.04311

表 5.12 薄板翹曲反應表

Level	A	B	C	D	E	F
1	0.04523	0.045534	0.044747	0.042792	0.040768	0.046302
2	0.045282	0.044658	0.045718	0.04695	0.043044	0.045644
3	0.045994	0.045684	0.0447	0.047326	0.046252	0.045144
4	0.04665	0.046052	0.045366	0.047536	0.047534	0.045642
5	0.045244	0.046472	0.04651	0.043796	0.050802	0.04532

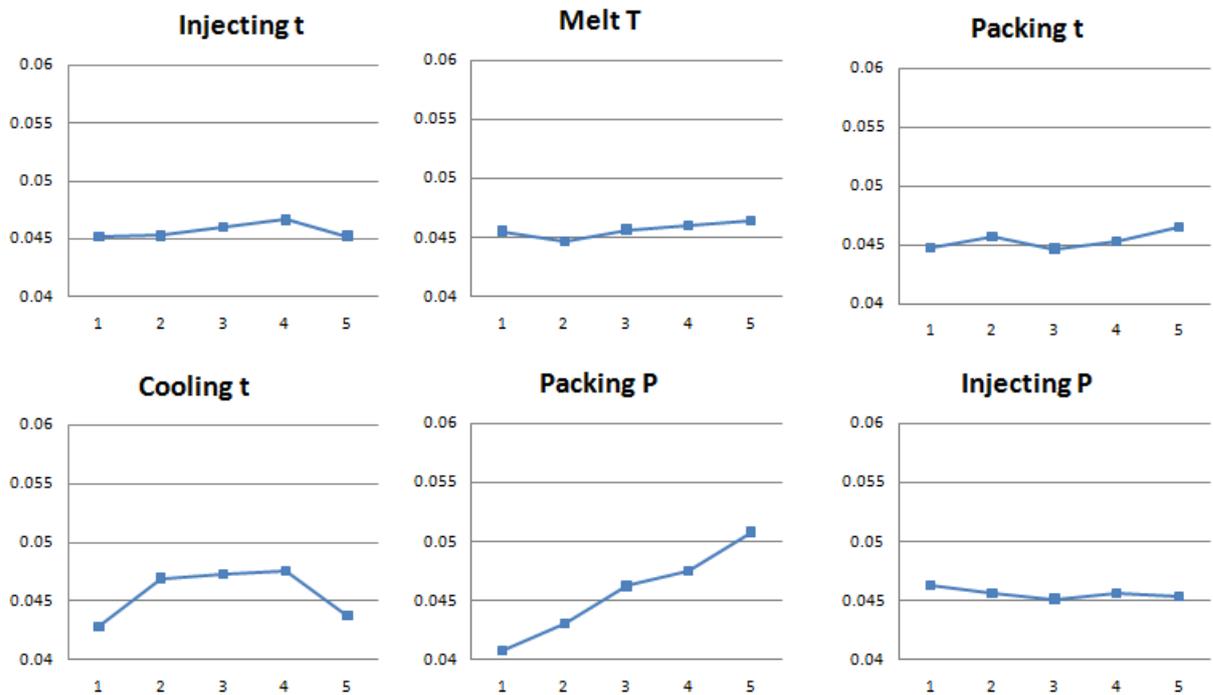


圖 5.13 薄板翹曲反應圖

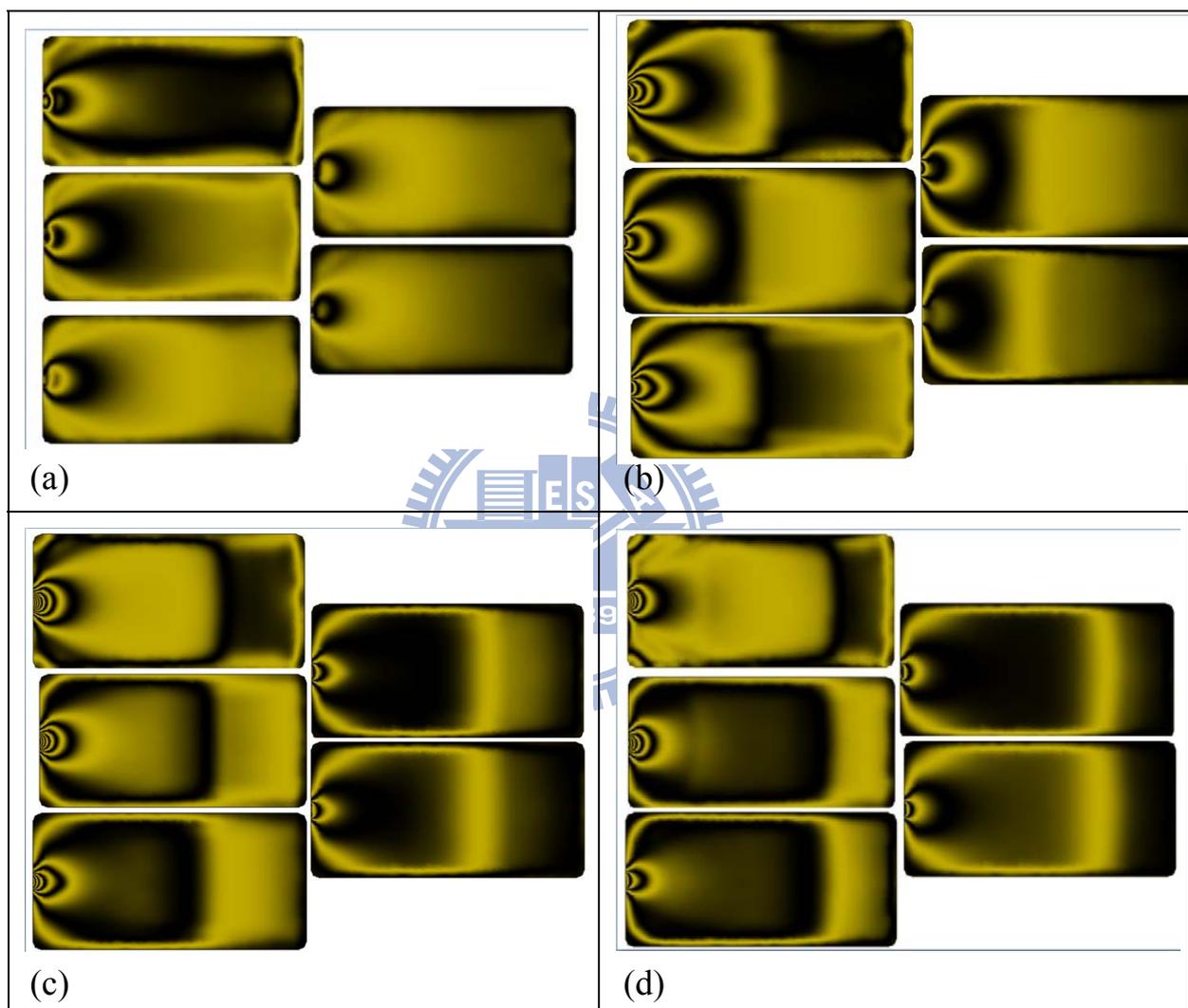


3. 光彈條紋級數

Moldex3D 模流分析軟體中的光學模組能夠模擬實驗中，將透明塑膠件放置於偏光儀下所呈現出的光彈條紋現象，藉由觀察條紋的階層與計算條紋級數，比起應力分布圖更清楚的了解應力的分佈。在現實中，無法測量出如同模流分析軟體所呈現的殘留應力的分佈圖，實際實驗上是利用透過應變規將測量的位置的應變換算成應力值，或是將成品放置於偏光儀之下，得到光彈條紋，在應用應力－光學定律，將光彈級數轉換成等效應力值。透過光學模組的模擬光彈條紋，能夠將模擬分析的結果更容易的與實際的實驗結果做出比較與驗證。

圖 5.14 為 25 組不同加工條件組合下所模擬出的光彈條紋，在不同的加

工條件下，條紋的數量、間隔、寬度都會有所改變，當愈接近交口處時，條紋形狀呈現細、密，數量也比其他的地方高出許多，表示著應力集中於該處。



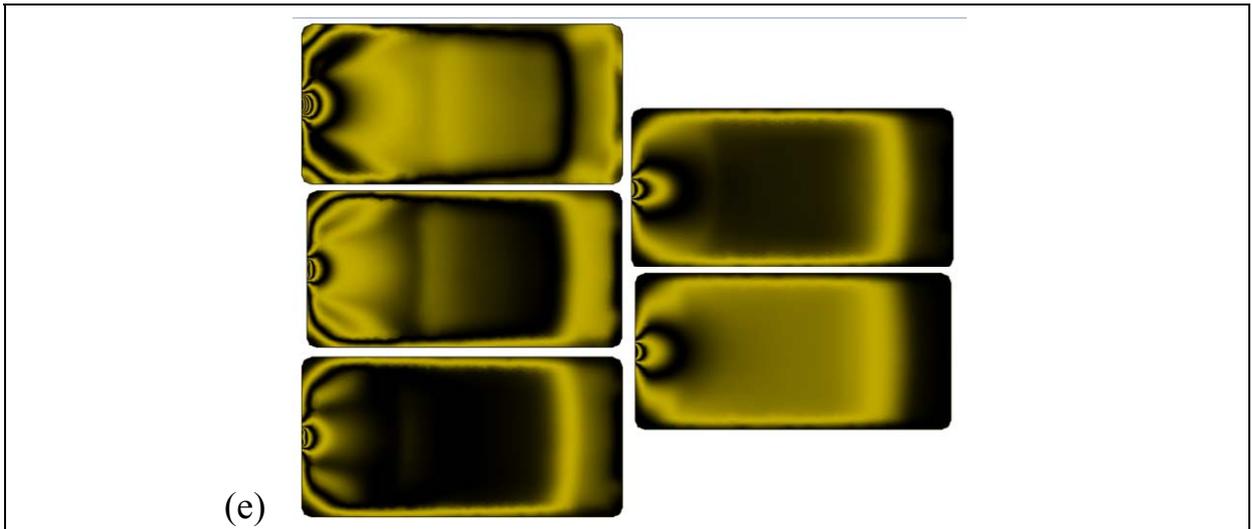


圖 5.14 薄板光彈條紋

(a)表 5.13：1~5 組 (b)表 5.13：6~10 組 (c)表 5.13：11~15 組
 (d)表 5.13：16~20 組 (e)表 5.13：21~25 組

為了能更確實的分析加工條件的影響程度，本研究將光彈條紋的最大級數作為分析結果，記錄如表 5.13，同樣計算出每個等級的平均響應，會製程反應表與反應圖，如表 5.14、圖 5.15 所示。加工條件對於光彈條紋級數和最大剪應力的影響有著同樣的趨勢，有著較顯著的影響的也同樣是射出時間與融膠溫度兩項加工條件。

表 5.13 薄板光彈條紋級數模擬分析結果

No.\Factor	A	B	C	D	E	F	PL
1	1	1	1	1	1	1	2.204
2	1	2	2	2	2	2	2.008
3	1	3	3	3	3	3	1.75
4	1	4	4	4	4	4	1.453
5	1	5	5	5	5	5	1.282
6	2	1	2	3	4	5	6.292

7	2	2	3	4	5	1	5.147
8	2	3	4	5	1	2	4.479
9	2	4	5	1	2	3	3.387
10	2	5	1	2	3	4	1.748
11	3	1	3	5	2	4	9.526
12	3	2	4	1	3	5	7.716
13	3	3	5	2	4	1	6.146
14	3	4	1	3	5	2	3.65
15	3	5	2	4	1	3	3.265
16	4	1	4	4	5	3	8.264
17	4	2	5	5	1	4	6.919
18	4	3	1	1	2	5	4.189
19	4	4	2	2	3	1	3.766
20	4	5	3	3	4	2	3.353
21	5	1	5	2	3	2	7.636
22	5	2	1	3	4	3	5.026
23	5	3	2	4	5	4	4.347
24	5	4	3	5	1	5	3.808
25	5	5	4	1	2	1	3.342

表 5.14 薄板光彈條紋級數反應表

Level	A	B	C	D	E	F
1	1.7394	6.7844	3.3634	4.1676	4.135	4.121
2	4.2106	5.3632	3.9356	4.2608	4.4904	4.2252
3	6.0606	4.1822	4.7168	4.0142	4.5232	4.3384
4	5.2982	3.2128	5.0508	4.4952	4.454	4.7986
5	4.8318	2.598	5.074	5.2028	4.538	4.9422

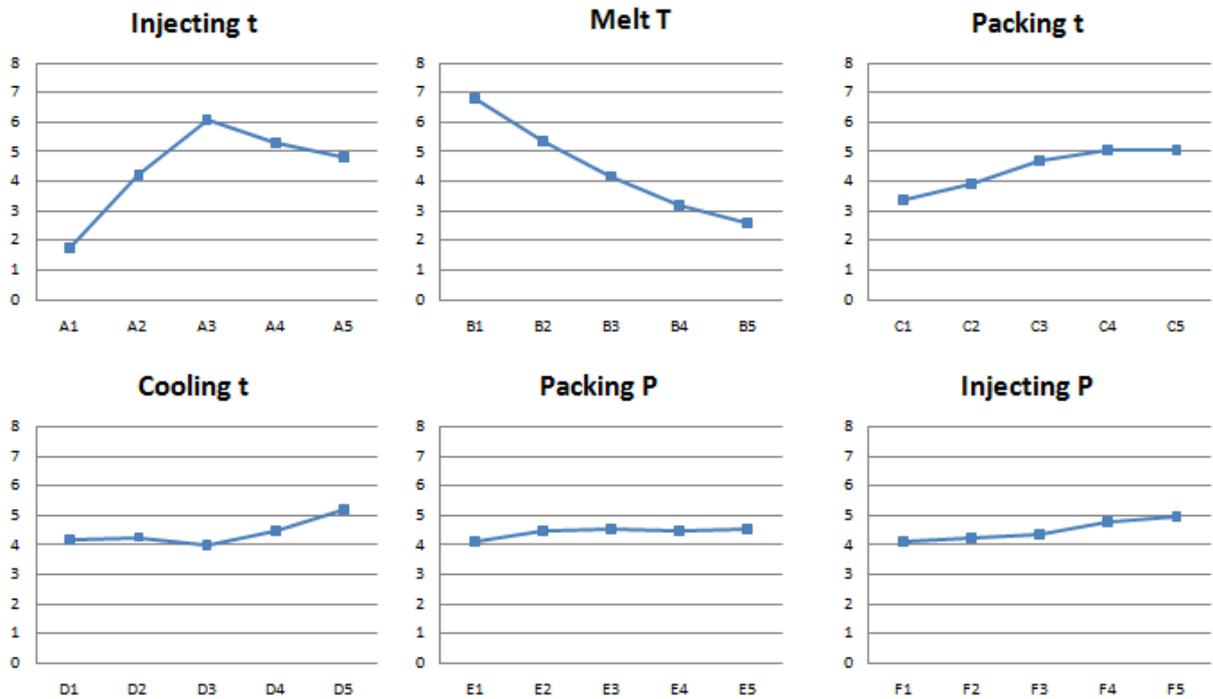


圖 5.15 薄板光彈條紋級數反應圖

4. 光彈條紋級數標準差

為了將光彈級數的分布數值化，本研究使用 Moldex3D 軟體，計算出模型中所有網格元素的光彈級數的標準差，標準差是一組數值自平均值分散開來的程度的一種測量觀念。一個較大的標準差，代表大部分的數值和其平均值之間差異較大；一個較小的標準差，代表這些數值較接近平均值，標準差的運算式如式 5.1 所示：

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (5.2)$$

光彈級數的標準差代表著光彈級數的分布差異，當標準差數值愈大，代表每個元素的光彈級數差異愈大，應力分布愈不均勻，相反的，標準差愈小，則殘留應力分布愈是均勻，此外因為殘留應力分布平均亦代表著雙折射的現象較不易發生，成品的光學性質較佳。

將各組模擬分析的結果記錄成表 5.15，並繪製成表 5.16 與圖 5.16，藉此觀察加工條件對於光彈條紋級數標準差的影響程度，由數據可以得知射出時間與融膠溫度對愈標準差的值有著顯著的影響。

表 5.15 薄板光彈級數標準差模擬分析結果

No. \ Factor	A	B	C	D	E	F	SD
1	1	1	1	1	1	1	0.2661
2	1	2	2	2	2	2	0.2057
3	1	3	3	3	3	3	0.1678
4	1	4	4	4	4	4	0.1314
5	1	5	5	5	5	5	0.1035
6	2	1	2	3	4	5	0.5855
7	2	2	3	4	5	1	0.4673
8	2	3	4	5	1	2	0.3897
9	2	4	5	1	2	3	0.2916
10	2	5	1	2	3	4	0.1785
11	3	1	3	5	2	4	0.7552
12	3	2	4	1	3	5	0.6147
13	3	3	5	2	4	1	0.4864
14	3	4	1	3	5	2	0.3272
15	3	5	2	4	1	3	0.2845
16	4	1	4	4	5	3	0.6936
17	4	2	5	5	1	4	0.558
18	4	3	1	1	2	5	0.3882
19	4	4	2	2	3	1	0.3287
20	4	5	3	3	4	2	0.292

21	5	1	5	2	3	2	0.6544
22	5	2	1	3	4	3	0.4569
23	5	3	2	4	5	4	0.3841
24	5	4	3	5	1	5	0.329
25	5	5	4	1	2	1	0.2798

表 5.16 薄板光彈條紋級數標準差反應表

Level	A	B	C	D	E	F
1	0.1749	0.59096	0.32338	0.36808	0.36546	0.36566
2	0.38252	0.46052	0.3577	0.37074	0.3841	0.3738
3	0.4936	0.36324	0.40226	0.36588	0.38882	0.37888
4	0.4521	0.28158	0.42184	0.39218	0.39044	0.40144
5	0.42084	0.22766	0.41878	0.42708	0.39514	0.41002

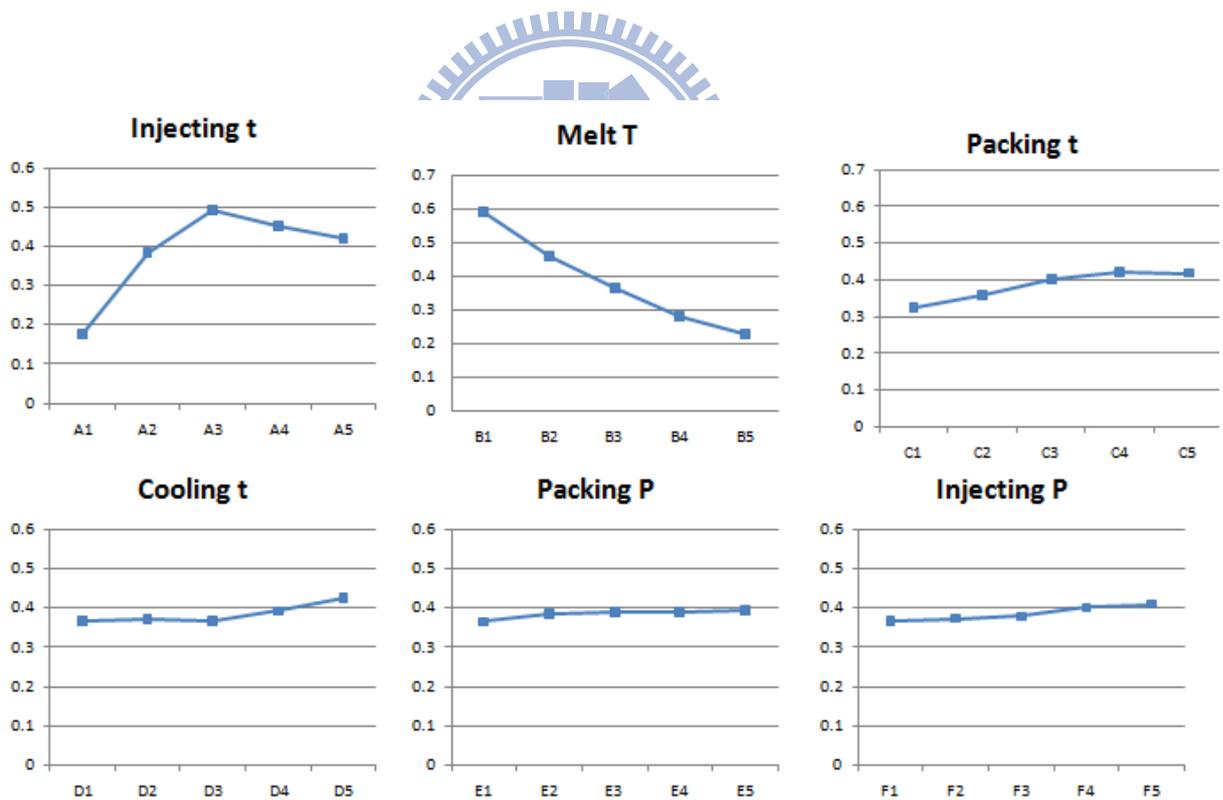


圖 5.16 薄板光彈條紋級數標準差反應圖

5-3-2 機器人足部模型

1. 最大剪應力

本研究所使用的機器人足部零件，其厚度遠小於長、寬度，因此可視為 2D 平面狀態，故以最大剪應力作為殘留應力的比較基準。如圖 5.17 所示，最大剪應力其最大值位於進澆口的附近，並隨著流動的方向慢慢遞減，由與模型有著圓孔、凹孔等特徵，會阻礙融熔狀態的材料流動，因此造成在這些特徵周遭會有應力集中的情形，應力值的大小與分布上都叫薄板模型來得高。

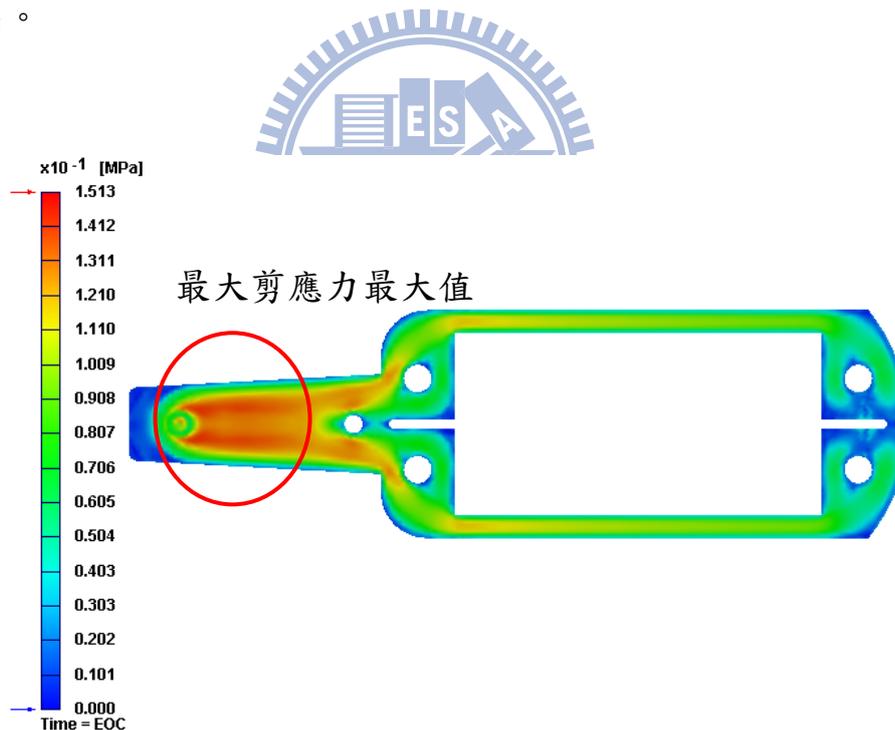


圖 5.17 足部零件最大剪應力分布圖

根據表 5.17 的分析結果表計算出因子的平均響應，並繪製成表 5.18、圖 5.18 的反應圖表，由這兩張圖表可觀察出，射出時間與融膠溫度對於殘

留應力有著非常顯著的影響。

表 5.17 足部模型最大剪應力模擬分析結果

No.\Factor	A	B	C	D	E	F	MSS(MPa)
1	1	1	1	1	1	1	0.3663
2	1	2	2	2	2	2	0.1513
3	1	3	3	3	3	3	0.1239
4	1	4	4	4	4	4	0.1131
5	1	5	5	5	5	5	0.1038
6	2	1	2	3	4	5	0.6258
7	2	2	3	4	5	1	0.3665
8	2	3	4	5	1	2	0.2273
9	2	4	5	1	2	3	0.1471
10	2	5	1	2	3	4	0.1164
11	3	1	3	5	2	4	3.417
12	3	2	4	1	3	5	1.511
13	3	3	5	2	4	1	0.7935
14	3	4	1	3	5	2	0.4722
15	3	5	2	4	1	3	0.2814
16	4	1	4	2	5	3	4.838
17	4	2	5	3	1	4	4.547
18	4	3	1	4	2	5	3.824
19	4	4	2	5	3	1	2.567
20	4	5	3	1	4	2	1.601
21	5	1	5	4	3	2	4.792
22	5	2	1	5	4	3	4.932
23	5	3	2	1	5	4	4.779
24	5	4	3	2	1	5	4.424
25	5	5	4	3	2	1	2.916

表 5.18 足部模型最大剪應力反應表

Level	A	B	C	D	E	F
1	0.17168	2.80782	1.94218	1.75288	1.9692	1.40186
2	0.29662	2.30156	1.6809	1.68404	2.09108	1.44876
3	1.29502	1.94954	1.98648	1.55098	1.82206	2.06448
4	3.4754	1.54468	1.92108	2.0756	1.61308	2.5945
5	4.3686	1.00372	2.07668	2.54382	2.1119	2.27476

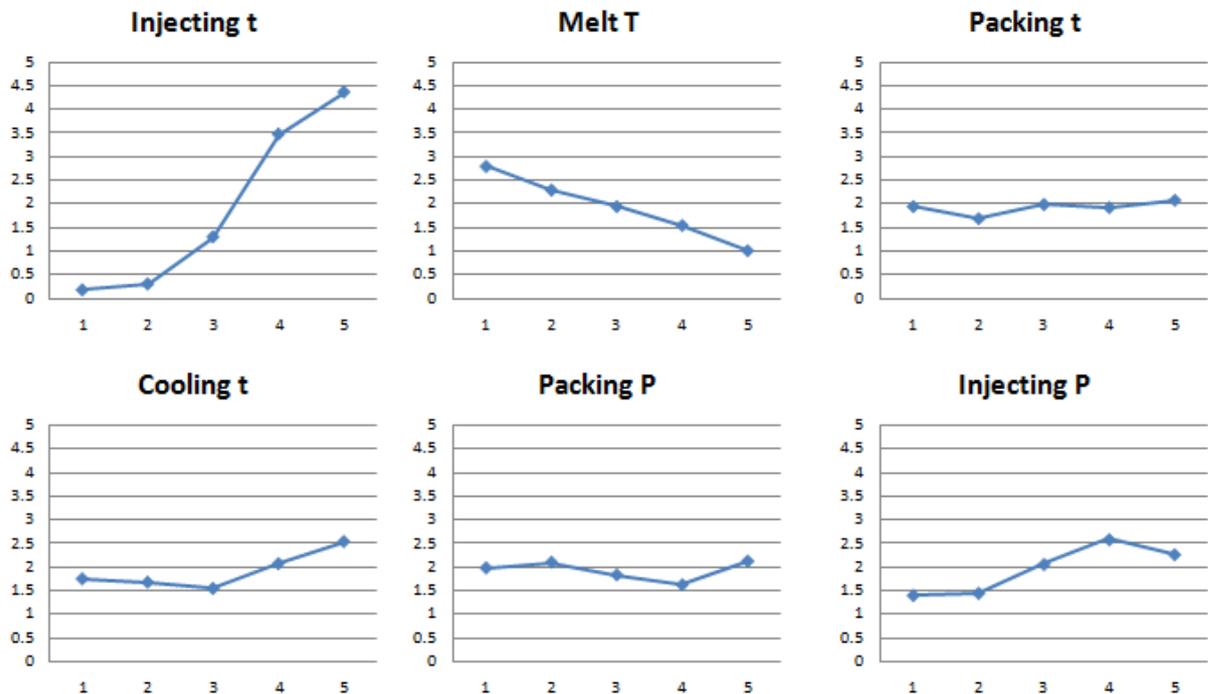


圖 5.18 足部模型最大剪應力反應圖

2. 翹曲

與薄板相同，對於足部零件的翹曲，選用總位移的最大值當做比較的標準，如圖 5.19 所示。

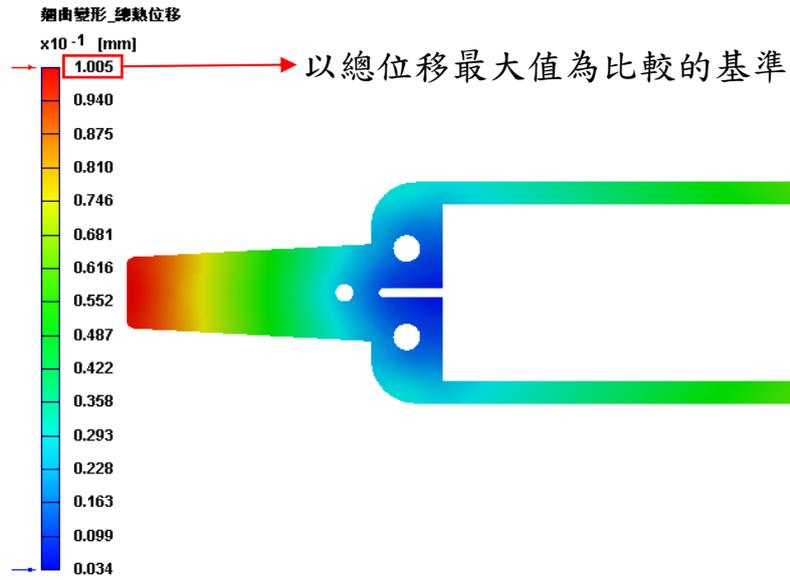


圖 5.19 足部零件總位移分布圖

觀察圖表 5.19、表 5.20 與圖 5.20 可知，影響總位移最大的加工條件為冷卻時間與保壓壓力，其中保壓壓力有著數值升高，總位移下降的明顯趨勢。

表 5.19 足部模型翹曲模擬分析結果

No.\Factor	A	B	C	D	E	F	WP(mm)
1	1	1	1	1	1	1	0.0266
2	1	2	2	2	2	2	0.02688
3	1	3	3	3	3	3	0.02785
4	1	4	4	4	4	4	0.02905
5	1	5	5	5	5	5	0.03065
6	2	1	2	3	4	5	0.03172
7	2	2	3	4	5	1	0.03258
8	2	3	4	5	1	2	0.02223
9	2	4	5	1	2	3	0.02415
10	2	5	1	2	3	4	0.03059
11	3	1	3	5	2	4	0.02632
12	3	2	4	1	3	5	0.02805
13	3	3	5	2	4	1	0.02944
14	3	4	1	3	5	2	0.03476
15	3	5	2	4	1	3	0.02437
16	4	1	4	2	5	3	0.03337
17	4	2	5	3	1	4	0.02286
18	4	3	1	4	2	5	0.02857
19	4	4	2	5	3	1	0.02911
20	4	5	3	1	4	2	0.02984
21	5	1	5	4	3	2	0.02885
22	5	2	1	5	4	3	0.03312
23	5	3	2	1	5	4	0.03343
24	5	4	3	2	1	5	0.02327
25	5	5	4	3	2	1	0.02482

表 5.20 足部模型翹曲反應表

Level	A	B	C	D	E	F
1	0.028206	0.029372	0.028911	0.026438	0.023866	0.02851
2	0.028254	0.028698	0.029102	0.028974	0.026148	0.028512
3	0.028588	0.028304	0.027972	0.031458	0.02889	0.027718
4	0.02875	0.028068	0.027504	0.03056	0.030634	0.02845
5	0.028698	0.028054	0.02719	0.025066	0.032958	0.028452

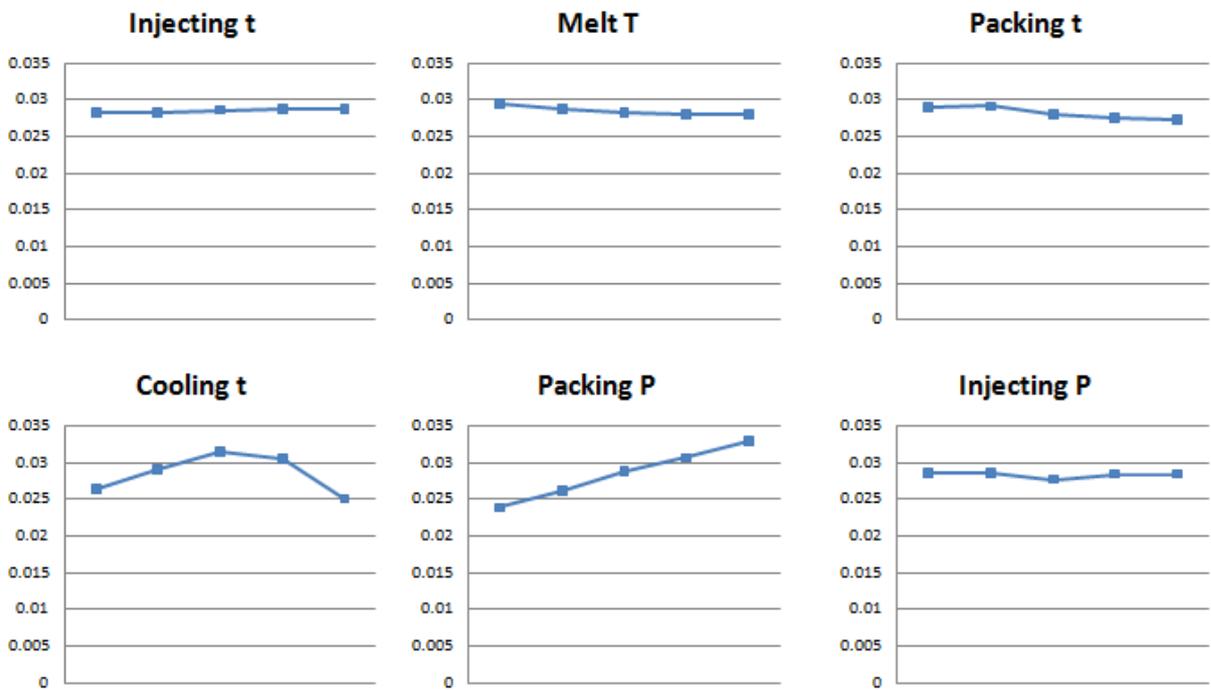


圖 5.20 足部模型翹曲反應圖

3. 光彈條紋級數

圖 5.21 為 25 組加工條件組合所模擬出來的光彈條紋，比起薄板模型，條紋的細度與密度都有明顯的上升，最大條紋級數也遠大於薄板。

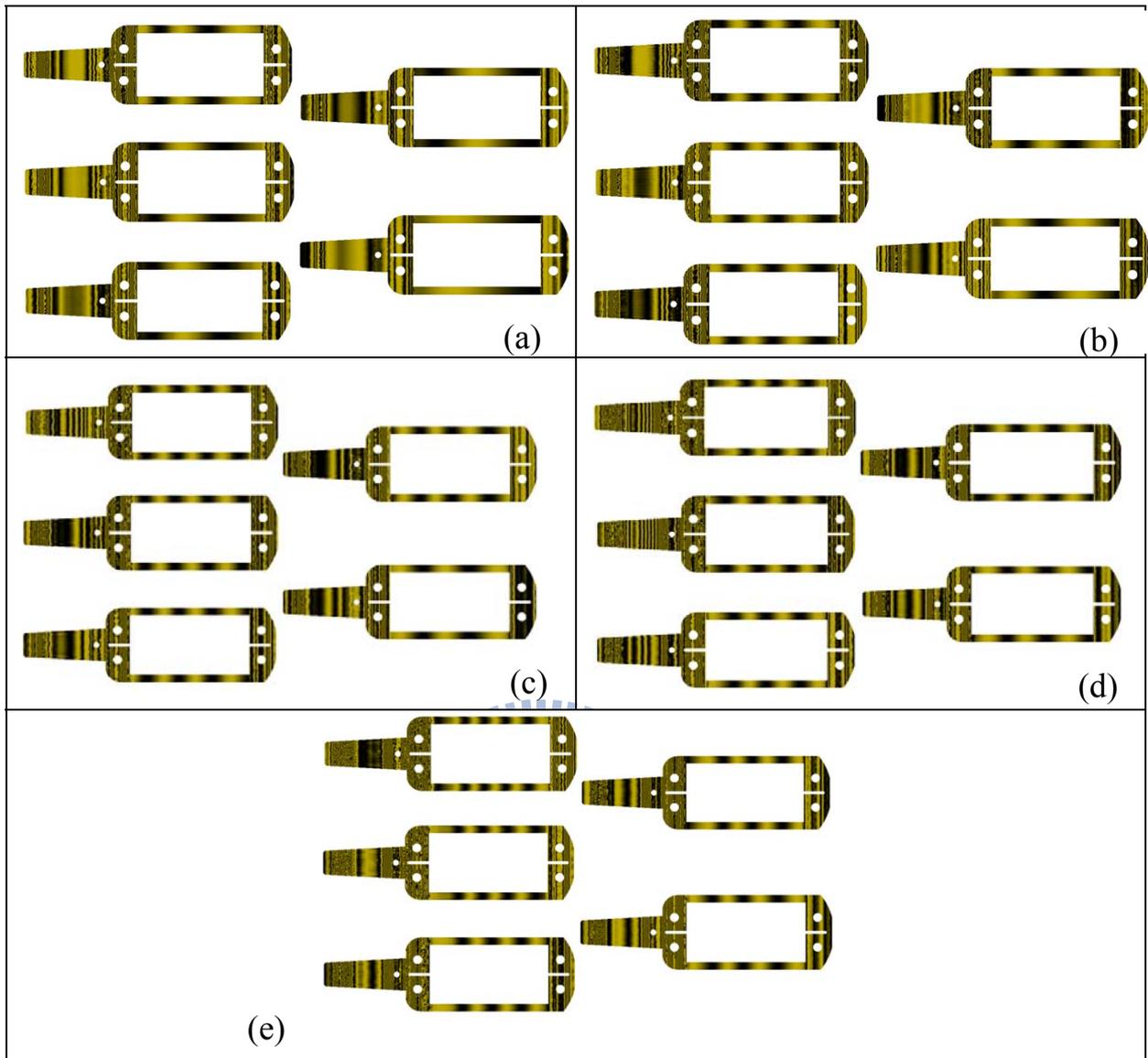


圖 5.21 足部零件光彈條紋

(a)表 5.21：1~5 組 (b)表 5.21：6~10 組 (c) 表 5.21：11~15 組
 (d) 表 5.21：16~20 組 (e) 表 5.21：21~25 組

由表 5.21、5.22 以及圖 5.22，加工條件對於殘留應力與光彈級數有著同樣的趨勢與影響，相較之下以射出時間、容膠溫度兩者影響較大

表 5.21 足部模型光彈條紋級數模擬分析結果

No.\Factor	A	B	C	D	E	F	PL
1	1	1	1	1	1	1	22.094
2	1	2	2	2	2	2	15.891
3	1	3	3	3	3	3	12.129
4	1	4	4	4	4	4	8.656
5	1	5	5	5	5	5	5.067
6	2	1	2	3	4	5	24.037
7	2	2	3	4	5	1	20.186
8	2	3	4	5	1	2	16.566
9	2	4	5	1	2	3	12.894
10	2	5	1	2	3	4	7.878
11	3	1	3	5	2	4	33.409
12	3	2	4	1	3	5	23.41
13	3	3	5	2	4	1	19.848
14	3	4	1	3	5	2	16.654
15	3	5	2	4	1	3	11.64
16	4	1	4	2	5	3	64.005
17	4	2	5	3	1	4	46.567
18	4	3	1	4	2	5	31.025
19	4	4	2	5	3	1	22.793
20	4	5	3	1	4	2	19.108
21	5	1	5	4	3	2	88.727
22	5	2	1	5	4	3	64.035
23	5	3	2	1	5	4	46.596
24	5	4	3	2	1	5	33.911
25	5	5	4	3	2	1	27.518

表 5.22 足部模型光彈條紋級數反應表

Level	A	B	C	D	E	F
1	12.7674	46.4544	28.3372	23.3882	26.1556	22.4878
2	16.3122	34.0178	24.1914	31.0274	24.1474	31.3892
3	20.9922	25.2328	23.7486	27.1926	30.9874	32.9406
4	36.6996	18.9816	28.031	30.2166	27.1368	28.6212
5	52.1574	14.2422	34.6206	27.104	30.5016	23.3646

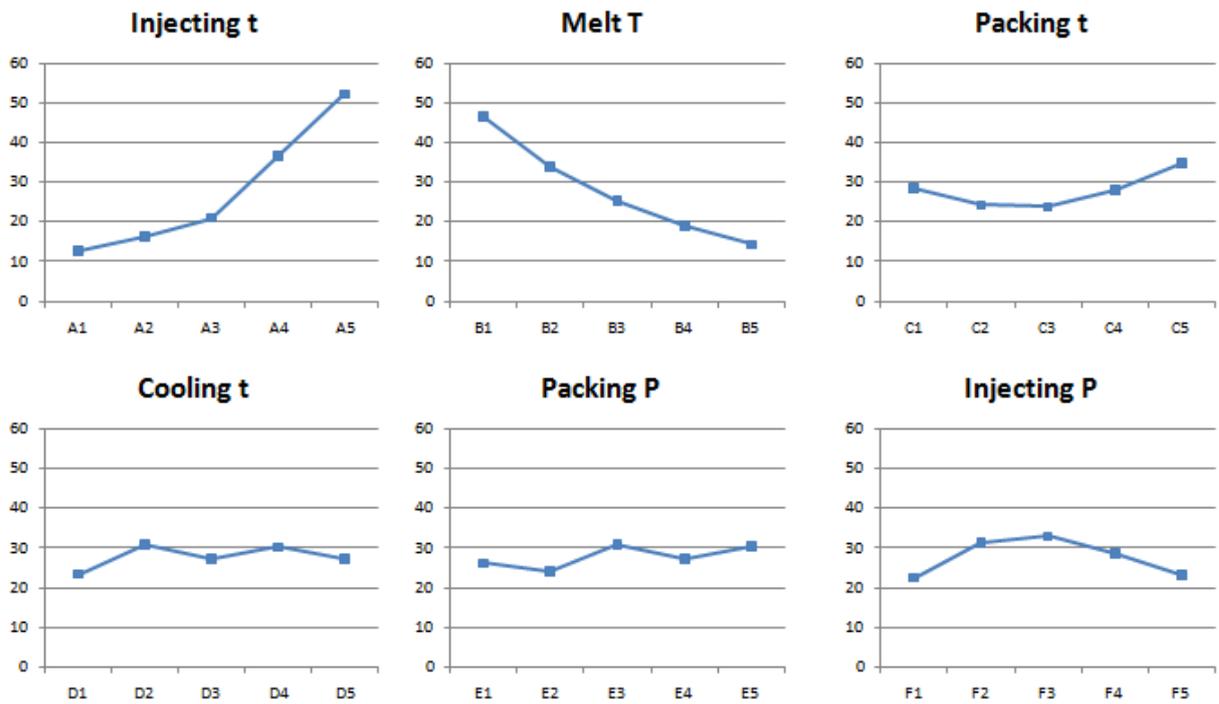


圖 5.22 足部模型光彈級數反應圖

4. 光彈級數條紋標準差

將各組模擬分析的結果記錄成表並繪製成反應表與反應圖，觀察加工條件對於光彈條紋級數標準差的影響程度。由表 5.23、5.24、圖 5.23，射出時間與融膠溫度對於光彈條紋的標準差，有著顯著的影響，代表著殘留應力的分佈狀態會隨著兩個加工條件的變化有很大的影響。

表 5.23 足部模型光彈條紋級數標準差模擬分析結果

No. \ Factor	A	B	C	D	E	F	SD
1	1	1	1	1	1	1	4.39
2	1	2	2	2	2	2	3.143
3	1	3	3	3	3	3	2.308
4	1	4	4	4	4	4	1.563
5	1	5	5	5	5	5	0.862

6	2	1	2	3	4	5	4.891
7	2	2	3	4	5	1	3.944
8	2	3	4	5	1	2	2.994
9	2	4	5	1	2	3	2.239
10	2	5	1	2	3	4	1.243
11	3	1	3	5	2	4	5.735
12	3	2	4	1	3	5	4.445
13	3	3	5	2	4	1	3.577
14	3	4	1	3	5	2	2.73
15	3	5	2	4	1	3	1.846
16	4	1	4	2	5	3	9.698
17	4	2	5	3	1	4	6.578
18	4	3	1	4	2	5	4.344
19	4	4	2	5	3	1	3.638
20	4	5	3	1	4	2	3.044
21	5	1	5	4	3	2	11.63
22	5	2	1	5	4	3	8.852
23	5	3	2	1	5	4	6.884
24	5	4	3	2	1	5	5.317
25	5	5	4	3	2	1	4.236

表 5.24 足部模型光彈條紋級數標準差反應表

Level	A	B	C	D	E	F
1	2.4532	7.2688	4.3118	3.9308	4.225	3.957
2	3.0622	5.3924	4.0804	4.6462	3.9394	4.7082
3	3.6666	4.0214	4.0696	4.365	4.6528	4.9886
4	5.4604	3.0974	4.5872	4.787	4.3854	4.4006
5	7.3838	2.2462	4.9772	4.2972	4.8236	3.8826

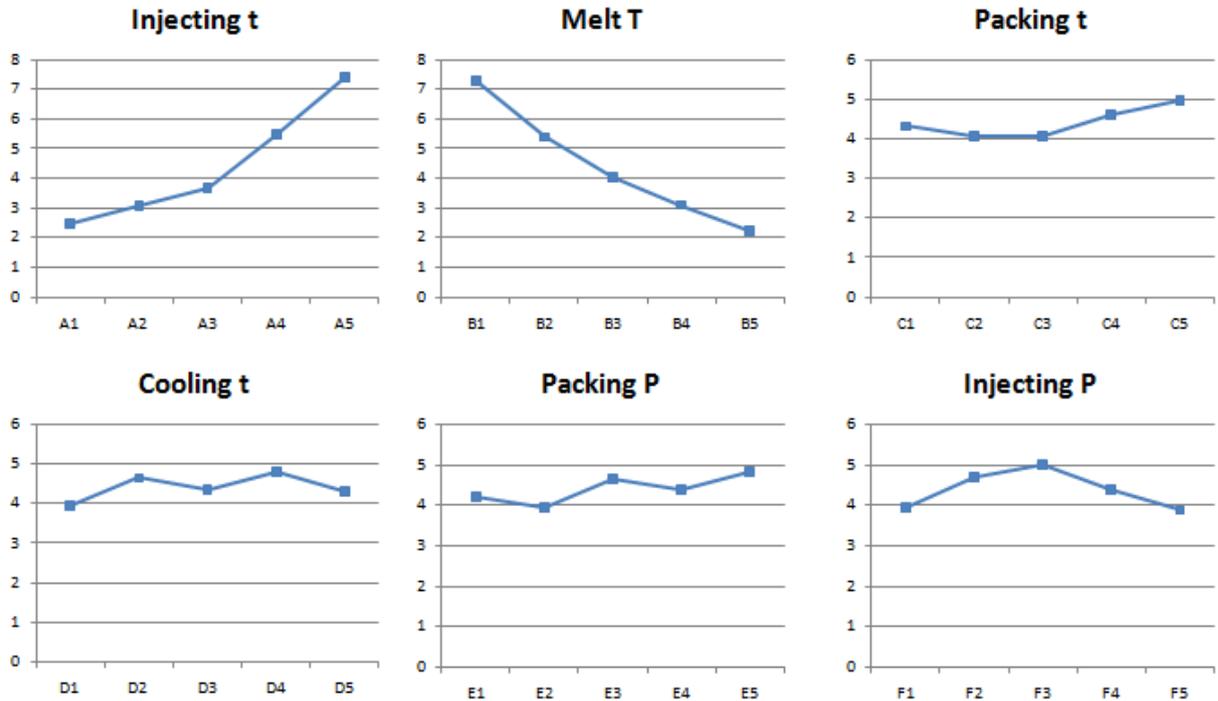


圖 5.23 足部模型光彈條紋級數標準差反應圖



5-4 實驗比較結果

5-4-1 單一因子變化 V.S 複數因子變化分析

藉由 5-2 與 5-3-1 兩章節的分析結果，我們可以歸納出：

1. 射出成型製程後內部的殘留應力的大小，在射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間等六個加工條件中，以射出時間、融膠溫度有比較顯著得影響。
2. 射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間對於射出成形成品內部的殘留應力，沒有很顯著的改變與影響。
3. 在單一因子變化分析中，冷卻時間有著隨著時間上升殘留應力會逐漸下

降的趨勢，但在複數因子變化分析的結果卻完全相反，可能是因為受到與其他因子交互作用效應的影響。圖 5.24 中，各條曲線均與其他曲線交錯，尤以融膠溫度與射出壓力最為錯綜複雜，代表著冷卻時間與其他的都有者交互作用，與融膠溫度、射出壓力最為強烈。

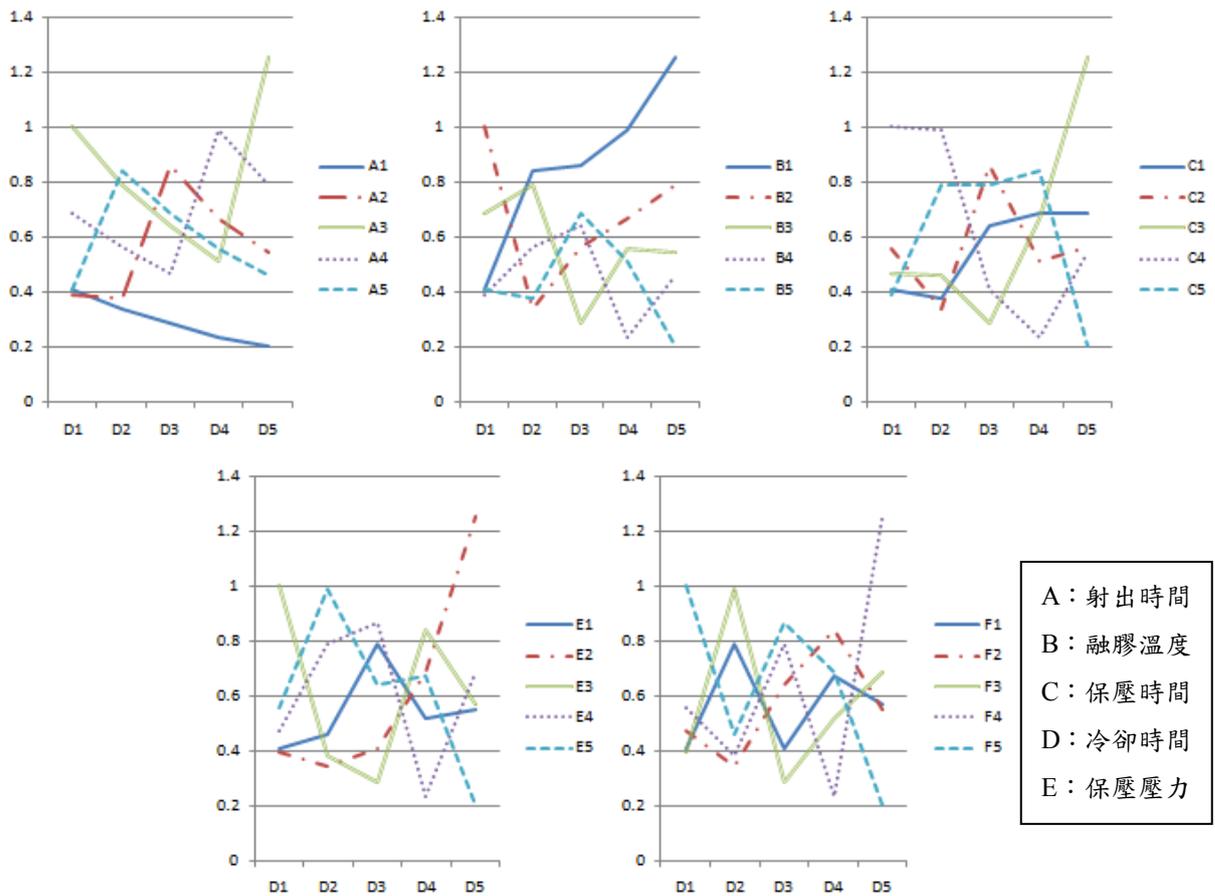


圖 5.24 冷卻時間交互作用曲線圖

5-4-2 加工條件對於殘留硬力的大小、分布與翹曲的影響

將 5-3-1 與 5-3-2 做一對照可得到：

1. 對於殘留應力大小的影響，以射出時間與融膠溫度較為顯著。

2. 射出時間與融膠溫度對於殘留應力的分佈有著較大的影響力，間接影響成品的光學性質。
3. 影響成品翹曲，以冷卻時間和保壓壓力有較大的影響力

5-4-3 殘留應力與翹曲的最佳化設定

過去文獻中以及現今業界上，大部分都以翹曲這類影響產品的外觀、品質、精度及成品強度作為最佳化的設定目標，然而殘留應力的存在，也確實影響成品的外觀尺寸變形及翹曲、環境應力破壞、使用或二次加工的強度以及光學塑膠件的光學性質，因此為了讓成品能有高品質的外觀與經度外，保有高度的強度、環境耐性、壽命或是光學性質，勢必要同時考慮殘留應力與翹曲的最佳化設定。

在 5-3-1 與 5-3-2 的章節中，薄板模型與機器人足部零件進行分析，由圖 5.11、圖 5.13 與圖 5.18、圖 5.20，可以發現：

1. 射出時間對於殘留應力與翹曲有著相同的趨勢。
2. 融膠溫度雖然對於殘留應力有著顯著的影響，但對於翹曲影響程度卻十分有限
3. 冷卻時間與保壓壓力對於翹曲都有著很大的影響力，但對殘留應力的影響卻不大。
4. 保壓時間與射出壓力對於殘留應力與翹曲，其影響力都十分的有

限。

根據上述描述，針對薄板模型本研究選擇如表 5.25 的組合，即射出時間 0.25 秒、容膠溫度 240°C、保壓時間 10 秒、冷卻時間 15 秒、保壓壓力 200MPa、射出壓力 150MPa；對於機器人足部零件選用表 5.26 的組合：射出時間 0.25 秒、容膠溫度 240°C、保壓時間 25 秒、冷卻時間 35 秒、保壓壓力 200MPa、射出壓力 150MPa，作為最佳化的設定組合，使用 Moldex3D 進行分析。

表 5.25 薄板最佳化組合

No. \ Factor	A	B	C	D	E	F
26	1	5	1	1	1	3

表 5.26 足部零件最佳化組合

No. \ Factor	A	B	C	D	E	F
26	1	5	4	5	1	3

分析的結果如圖 5.25、5.26 薄板模型的最大剪應力分布圖、翹曲分布圖，其最大剪應力最大值為 0.1693MPa，總位移為 0.02403mm，圖 5.27、5.28 為機器人足部零件的最大剪應力與翹曲分布圖，最大剪應力最大值為 0.1070MPa，總位移最大值則為為 0.02213mm，均小於其他 25 組的結果，達到同時降低殘留應力與翹曲的期望。

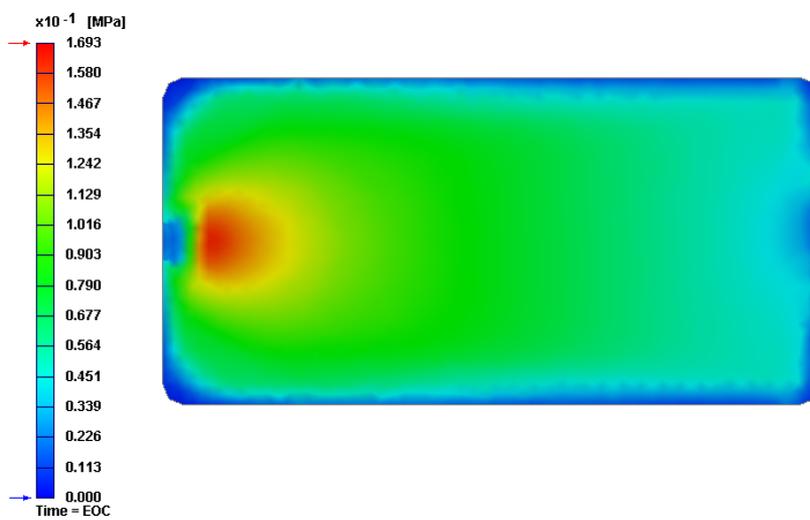


圖 5.25 薄板最佳化最大剪應力分布圖

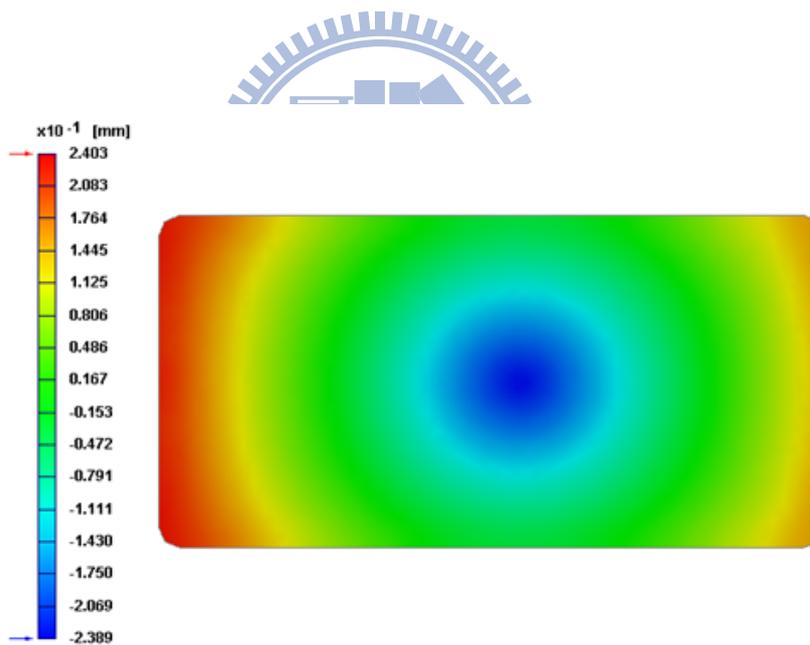


圖 5.26 薄板最佳化最總位移分布圖

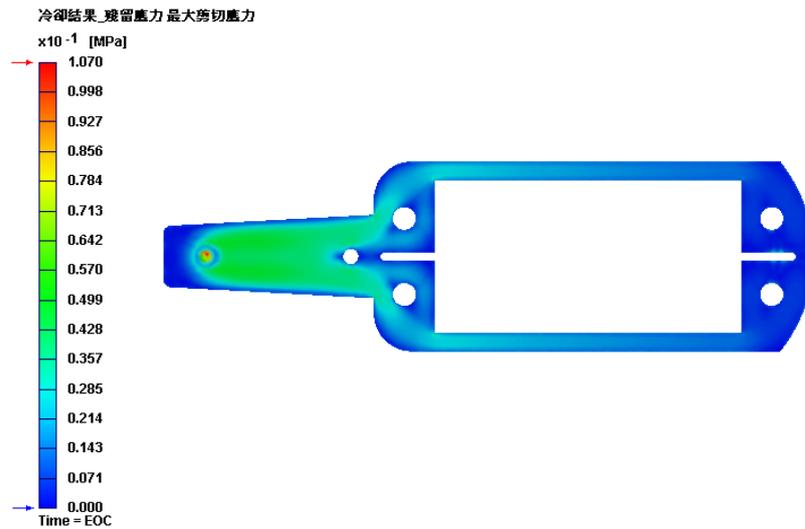


圖 5.27 足部零件最佳化最大剪應力分布圖

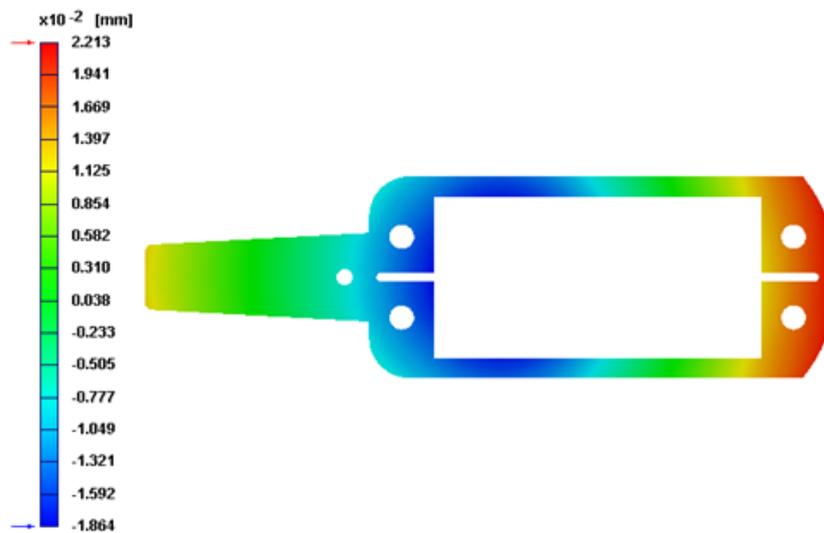


圖 5.28 足部零件最佳化翹曲分布圖

圖 5.29 與圖 5.30 為薄板模型與機器人足部零件的模擬光彈模型，與圖 5.14、5.21 的光彈條紋相比較，最佳化後的光彈條紋，在條紋細度、數量與密度上都有明顯的降低，代表著殘留應力的分佈較為平均，減少應力集中的現象。

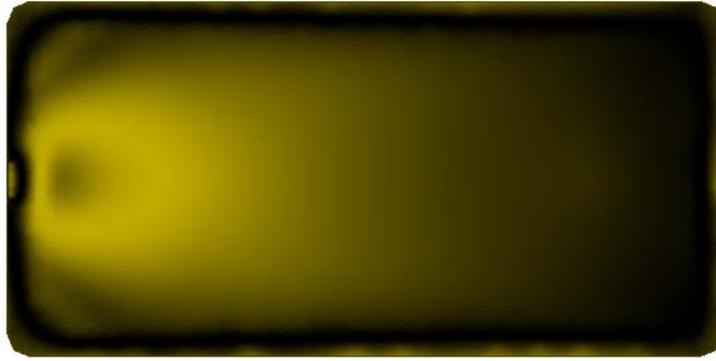


圖 5.29 薄板最佳化最光彈條紋

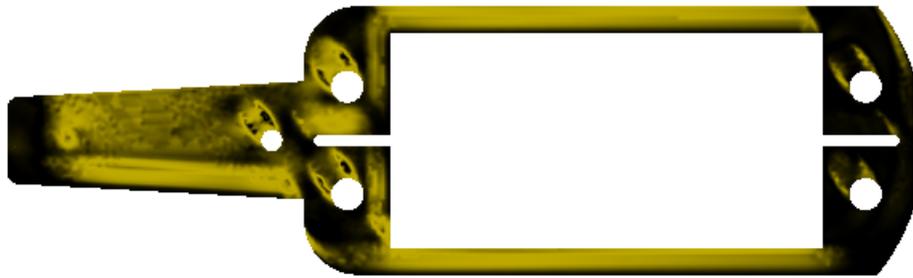


圖 5.30 足部零件最佳化最光彈條紋

第六章 結論與未來研究方向

6-1 結論

對工程上的設計和分析而言，射出成型是非常複雜的加工程序，利用電腦模擬射出過程是一個有效率而且經濟的方式，配合田口實驗法進行最佳化分析，更能減少必要的實驗次數，取代傳統的試誤法，大大的節省了時間、金錢與資源。

本研究使用Moldex3D模流分析軟體，以模擬射出成型製程與光彈條紋，在經過修正材料特性與計算參數校正模擬結果，使模擬分析更加接近實際實驗結果。藉由模擬分析結果研究各種加工條件對於射出成型製程後內部殘留應力的大小、分布與外型的翹曲的影響程度。除了一般業界以翹曲為品質好壞為基準，防止成品產生過大的變形，本研究更進一步在維持理想外型的前提下分析成品的內部，降低射出成型件的殘留應力，減少應力集中的現象，使成品不受到往後環境、二次加工的影響，增加成品的強度、環境耐性與壽命。

針對於加工條件對於射出成型件內部殘留應力與翹曲的影響，本研究有以下幾點結論：

1. 射出成型件內部的殘留應力一般會集中於進澆口的周邊，並散佈於成品的表面，故設計進澆口的地點能夠有效控制殘留應力出現的區域與分

布。

2. 對於PS材料射出成型件而言，在射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間等六個射出成型加工參數中，射出時間、融膠溫度對於射出成型製程後，成品內部的殘留應力大小與分布的影響最為顯著。
3. 融膠溫度有著隨著溫度上升，殘留應力的大小會逐漸下降，但由於溫度會受限於材料特性，無法無限制的上升；射出時間的增加也會增加殘留應力的大小，但當時間到達一定長度時，殘留應力便會緩慢下降。
4. 殘留應力的分布趨勢也深受射出時間、融膠溫度的影響，其趨勢與殘留應力的大小值相似。殘留應力分布的愈平均，則射出件比較不易產生雙折射的現象，產品的光學性質會因而提升。
5. 幾何造型的改變，對於殘留應力的大小與分布的影響較加工條件的變化要顯著許多，較複雜的外型在充填階段對於材料的流動形成阻礙，造成應力的累積與集中。
6. 對於PS材料射出成型件而言，在射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間等六個加工條件中，射出成型件的翹曲主要受到保壓壓力與冷卻時間的影響，有著保壓壓力愈大，翹曲愈大的趨勢。
7. 冷卻時間對於翹曲有著顯著的影响力，但在本研究中，在20秒、25

秒、30秒三段時間長度，翹曲不會有顯著的改變。

8. 射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間等六項加工參數，對於殘留應力與光彈條紋級數的影響程度有著相同的趨勢，因此藉由模流軟體所模擬之光彈條紋與實際實驗所得出的光彈條紋結果想對照，能夠得出實際射出成形件內部的應力分布趨勢。

根據上述結論，在射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻時間等六個加工條件中對於成品內部的殘留應力有著較大影響力的加工條件為射出時間與融膠溫度，造成成品外型翹曲有顯著變化的加工條件則為保壓壓力與冷卻時間，在這當中，根據第五章分析結果，射出時間對於殘留應力與翹曲有著相同的趨勢：射出時間的增加也會增加殘留應力的大小，但當時間到達一定長度時，殘留應力便會緩慢下降；融膠溫度雖然對於殘留應力有著顯著的影響，但對於翹曲影響程度十分有限，相同的，冷卻時間與保壓壓力對於翹曲都有著很大的影響力，但對殘留應力的影響卻不大。保壓時間與射出壓力對於殘留應力與翹曲，其影響力都十分的有限。

為了讓射出成型製品在製程後，能夠保有理想的外型，而其強度、環境耐性、壽命或是光學性質能達到一定的水準，對於外型之翹曲與內部的殘留應力上都要有最佳的改善，藉由前述的模擬分析與結論，本研究歸納出針對設定射出時間、融膠溫度、射出壓力、保壓時間、保壓壓力與冷卻

時間等六個射出成型加工參數，來同時改善成品的殘留應力與翹曲的流程：

1. 射出時間對於殘留應力與翹曲的影響趨勢相同，故選則對兩者最佳的等級。
2. 融膠溫度對於殘留應力的影響遠大於翹曲，故融膠溫度針對殘留應力做最佳化設定。
3. 保壓壓力與冷卻時間在翹曲的影響上比起翹曲有較為顯著的變化，故可針對翹曲選擇保壓壓力與冷卻時間的最佳設定參數。
4. 綜合上述三點，能夠選出一組最佳組合，此組組合能有效地降低殘留應力的大小、分布，亦能減少成品的翹曲。



6-2 未來研究方向

1. 加入成品的尺寸外觀設計，或是射出成型的模具設計如澆道設計、冷卻水路等，將產品品質最佳化，歸納出更為完整、更有系統的設計流程。
2. 投入更多不同特性的材料，研究分析交工參數對於不同材料的影響差異，整理出完整的材料特性資料庫。
3. 將非薄殼射出件以同樣的分析方法，研究本研究的影響程度與最佳化流程是否能應用於此類模型分析上。
4. 以模擬光彈條紋與實驗的照片比較，進一步驗證研究的準確性。

參考文獻

- [1] K. M. B. Jansen, D. J. Vandijk, M. H. Husselman, “Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding”, Polymer Engineering and Science, May 1998, vol. 38, NO.5
- [2] D.S. Choi, Y.T. Im, “Prediction of Shrinkage and Warpage in Consideration of Residual Stress in Integrated Simulation of Injection Molding”, Composite Structures, 47, pp. 655-665, 1999
- [3] E. O’Neill, C. Wilson, D. Brown. “The benefits of sold modeling in the plastic injection moulding industry”, Fifth International Conference on Factory 2000, 2-4 April 1997, Conf. Publ. No. 435.
- [4] Lu X. and Khim L. S., 2001, “A Statistical Experimental Study of the Injection Molding of Optical Lens,” Journal of Materials Processing Technology, Vol.113, pp.189-195.
- [5] 黃東鴻，「薄殼射出件翹曲變形與殘留應力研究」，國立成功大學，2002
- [6] T. Erzurumlu , B. Ozcelik, “Minimizatioon of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts uring Taguchi optimization method” , Materials and Design, 27, pp. 853-861, 2006.
- [7] 科盛科技股份有限公司，「Moldex-3D模流分析技術與應用」，全華圖書股份有限公司，2007。
- [8] L. F. A. Douven, F. P. T. Baaijens, and H. E. H. Meijer, “The computation of properties of injection-moulded products”, 2000.
- [9] 洪光民，馬劍清，曾垂拱，「光彈等色線條西線話之數位影像處理方法」，國立台灣大學「台大工程」學刊，第八十七期，p.p.52-69，2003

- [10] Callister, William D. Jr 著, 簡仁德, 楊子毅, 張柳春 譯, 「材料科學與工程」, 三版, 台北市, 學銘, 2005
- [11] 楊健人, 「光學原理」, 徐氏基金會出版, 1992。
- [12] James W. Dally & William F. Riley, "Experimental Stress Analysis", 3rd ed., New York: McGraw-Hill, 1991.
- [13] T. Erzurumlu, B. Ozcelik, "Minimization of warpage and sink index in injection-molded thermoplastic parts using Taguchi optimization method", Materials and Design, 27, pp. 853-861, 2006.
- [14] Glen, Stuart Peace, "TAGUCHI METHODS: A HANDS-ON APPROACH", ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC., 1993.
- [15] 張季娜 等譯, 「田口式品質工程導論」, 再版, 中華民國品質管制學會出版委員會, 中華民國品質管制學會, 1990。
- [16] 科盛科技股份有限公司, Moldex3D線上使用手冊, 第17章 Moldex3D-光學模組簡介, 2009。
- [17] 張榮語、鄭璧瑩、蘇軒丞, 「光彈性質研究」, 科盛科技大專學生專題研究計畫, 2009。
- [18] 鄭璧瑩、陳亮瑜, 「應用於非連續河石地形四足機器人的創新設計與實作。」, 第十二屆機構與機器設計學術研討會論文集, 2009。
- [19] 鄭璧瑩, 「CIDM實驗室射出成型光彈條紋模擬分析備忘錄」, 國立交通大學, 2010。
- [20] 韋仁旌, 「以熱處理方式消除射出成型製品殘留應力之研究」, 國立交

通大學，2008。

[21] 羅壬成，「模流分析與射出成型控制參數的優化」，國立交通大學，2006。

[22] 鄭穎聰，「鏡片射出成型與模具設計」，國立高雄應用科技大學，2004。

