

私立中原大學
機械工程學系

碩士學位論文

厚件產品保壓過程對於收縮率與殘留
應力影響之研究

Study of the Influence of Packing Process
on Shrinkage and Residual Stress in Thick
Parts

指導教授：陳夏宗

研究生：林炫良

中華民國九十二年 七月

中文摘要

本研究乃是針對厚件成品之成型品性質中的殘留應力及收縮方面作一研究與探討。在實驗中我們使用截面為長 105mm，寬 90mm 的方形試片模具，其模具可改變成型品的厚度，分別針對不同三種厚度（4mm，6mm，8mm）兩種不同材料（PMMA、PC）對其做改變不同保壓壓力及保壓時間兩種不同製程參數。並且利用實驗所得之實驗參數代入 CAE 分析軟體 MPI 模擬其成型情形，以驗證其軟體在這方面之準確性。

在探討收縮方面，我們可以發現隨著保壓壓力的增加，收縮的情形也隨著加以改善。由實驗中發現保壓壓力及保壓時間的增加時，成型品的重量值也會隨著上升。由實驗結果以及分析結果中皆可發現在相同的保壓條件下，厚度越大，其收縮率的值也就相對的變大。

在量測殘留應力方面，我們利用光彈量測系統照射其成型品來觀察成品不同厚度、材料及製程參數所成型之試片表面做量測，觀察其雙折射率差值在成型品之表面所形成的分佈狀況，進而判斷殘留應力的分佈。在實驗結果中，我們得到在不同厚度下，隨著保壓壓力的增加，殘留應力也隨之上升，但在不同材料中，又可知不論實驗或模擬分析，PMMA 的成型品較 PC 的成型品之殘留應力小。

關鍵詞：厚件成品、保壓、殘留應力、收縮

Abstract

The study concerns about the residual stress and shrinkage in injection molded thick parts. In the experiment, flat parts with 105 mm in length and 90 mm in width were injection molded. Part thickness were varied from 4 mm to 6 mm and to 8 mm. Different processing parameters including holding pressure and holding time were used. CAE analyses were also implemented to assist in the evaluation of residual stress and shrinkage formation.

The digital photo elasticity system is implemented to measure the residual stress and the associated distribution and to check how it varies with thickness and processing parameters.

For the thick parts, different processing parameters make a great effect. The residual stress show significant increases with increased holding pressure. And with thickness being greater, the shrinkage of thick part becomes greater. The result of CAE prediction shows qualitative trend with the observation of experiments.

Keywords : thick parts, packing, residual stress, shrinkage

致 謝

兩年的研究所讀書生涯轉眼間就過去了，在這兩年的求學過程中，讓我學習到相當多的之事以及待人處事的態度。由衷地感謝指導教授陳夏宗老師在研究期間對學生之悉心指導，給予生活上的照顧以及做人處事的叮嚀和教誨，師恩浩瀚，僅致上最誠摯的感激。同時，承蒙 鍾文仁老師及簡仁德老師對本文的費心審核與指正，使本文更加完備，特在此表達由衷的謝意。

感謝實驗室黃鐳迪學長、彭信舒學長、鍾明修學長、陳彥成學長、張仁安學長多方的指導，以及同學鈺婉、柏祺、仁德、嘉濠、育詮、宗雄，和學弟妹建彰、世存、評順、志良、進傳、莉琪在實驗及模擬分析方面的協助，使得論文得以順利完成，另外也要感謝助理建穎、玉紋、嘉玲在各方面的照顧及協助。

最後，僅將本文獻予我最摯愛的父母及家人，感謝他們在我求學期間給予我最大的支持與關懷，讓我得以無後顧之憂地完成學業，謝謝你們的包容，並以此微小之成就與他們及所有曾經關心、支持我的長輩、朋友們一起分享。

目錄

中文摘要	
英文摘要	
致謝	
目錄	
表目錄	
圖目錄	
第一章 序論	1
1-1 前言	1
1-2 傳統射出成型製程簡介	1
1-3 研究動機與目的	3
1-4 文獻回顧	5
1-5 本文結構	6
第二章 實驗設備與方法	7
2-1 射出成型機	7
2-2 模具	7
2-3 成型材料與模溫控制器	7
2-4 實驗方法	8
2-5 光彈系統	9

第三章 射出成型理論分析及殘留應力理論分析.....	14
3-1 基本假設	14
3-2 傳統射出成型之理論模式	15
3-2-1 流道系統	15
3-2-2 平板系統	17
3-3 殘留應力之基本理論	19
3-3-1 熱殘留應力	20
3-3-2 流動殘留應力	23
3-4 材料性質	25
3-4-1 熔膠狀態方程式	26
3-4-2 熔膠黏度方程式	27
3-5 分析邏輯與流程	27
第四章 雙折射率差值之量測的理論分析	32
4-1 傳統光彈理論	32
4-1-1 應力與光學關係及雙折射率差值理論	32
4-2 受應力平板在圓偏振儀中的效應	34
4-3 數位光彈理論	35
4-4 材料的條紋值	36
第五章 結果與討論	40

5-1 前言	40
5-2 實驗結果	40
5-2-1 收縮率量測方面	40
5-2-2 殘留應力量測方面	41
5-3 分析結果	42
5-3-1 收縮率之分析結果	42
5-3-2 殘留應力之分析結果	42
第六章結論及未來展望	62
6-1 結論	62
6-2 未來展望	63
參考文獻	64



表目錄

表 2-1 實驗組別表	13
表 5-1 成型品之重量表 & 收縮率(實際值 & 分析值).....	44



圖目錄

圖 2-1 日鋼 JSW 射出成型機	10
圖 2-2 模具外觀圖	10
圖 2-3 成品尺寸圖	11
圖 2-4 油路循環模溫控制機	11
圖 2-5 中央控制烘料機	12
圖 2-6 數位式光彈量測系統	12
圖 3-1 軸對稱管徑流動示意圖.....	30
圖 3-2 平板流動示意圖	30
圖 3-3 在厚度方向的溫度場與殘留應力之關係.....	31
圖 3-4 流動波前追蹤示意圖	31
圖 4-1 雙軸應力場中一點的折射率橢球體	38
圖4-2 光彈量測系統示意圖	38
圖 4-3 穿透式光彈示意圖	39
圖5-1 PMMA在厚度4mm之保壓效果趨勢圖(實際值 & 分析值)....	45
圖5-2 PMMA在厚度6mm之保壓效果趨勢圖(實際值 & 分析值)....	46
圖 5-3 PMMA 在厚度 8mm 之保壓效果趨勢圖(實際值 & 分析值)....	47
圖 5-4 厚度 4mm 之收縮率比較圖 (實際值 & 分析值)	48

圖 5-5 厚度 6mm 之收縮率比較圖 (實際值 & 分析值)	49
圖 5-6 厚度 8mm 之收縮率比較圖 (實際值 & 分析值)	50
圖 5-7 分析模型與實際成型品之比較圖	51
圖 5-8 厚度 4mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(1) .	51
圖 5-9 厚度 4mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(2) .	52
圖 5-10 厚度 4mm 之相同保壓時間不同保壓壓力 之光彈比較圖(3)	52
圖 5-11 厚度 6mm 之相同保壓時間不同保壓壓力 之光彈比較圖(1)	53
圖 5-12 厚度 6mm 之相同保壓時間不同保壓壓力 之光彈比較圖(2)	53
圖 5-13 厚度 6mm 之相同保壓時間不同保壓壓力 之光彈比較圖(3)	54
圖 5-14 厚度 8mm 之相同保壓時間不同保壓壓力 之光彈比較圖(1)	54
圖 5-15 厚度 8mm 之相同保壓時間不同保壓壓力 之光彈比較圖(2)	55
圖 5-16 厚度 8mm 之相同保壓時間不同保壓壓力 之光彈比較圖(3)	55

圖 5-17 未保壓之三種厚度殘留應力比較	56
圖 5-18 相同保壓條件 (50.7 MPa 5sec)	
之三種厚度殘留應力比較	56
圖 5-19 相同保壓條件 (50.7 MPa 10sec)	
之三種厚度殘留應力比較	57
圖5-20 相同保壓條件 (50.7 MPa 15sec)	
之三種厚度殘留應力比較	57
圖 5-21 相同保壓條件 (84.5 MPa 5sec)	
之三種厚度殘留應力比較	58
圖 5-22 相同保壓條件 (84.5 MPa 10sec)	
之三種厚度殘留應力比較	58
圖 5-23 相同保壓條件 (84.5 MPa 15sec)	
之三種厚度殘留應力比較	59
圖 5-24 相同保壓條件 (118.3 MPa 5sec)	
之三種厚度殘留應力比較	59
圖 5-25 相同保壓條件 (118.3 MPa 10sec)	
之三種厚度殘留應力比較	60
圖 5-26 相同保壓條件 (118.3 MPa 15sec)	
之三種厚度殘留應力比較	60

圖 5-27 CAE 所得之殘留應力分佈圖

(PMMA, 厚度 6mm, 50.7 MPa, 5sec)61

圖 5-28 CAE 所得之殘留應力分佈圖

(PC, 厚度 6mm, 50.7 MPa, 5sec)61



第一章 序論

1-1 前言

近年來科技進步，3C 產品愈來愈多樣化，產品之外型亦增加其複雜性，以及為製程成帶來一新挑戰，因此其製程之需求性也隨著上升。3C 產品如液晶螢幕、掃描器等其外殼常為廠商之設計重點，因此在此設計上需要新的思維，因此舊有的厚薄觀念必須要有新的突破。

雖然國內射出成型業已逐漸追上德國、日本等先進國家的腳步，但仍繼續努力，尤其是世界潮流一昧的在追求射出成型品輕薄短小之際，厚件產品仍有其努力的課題，如殘留應力的改善，收縮率的減小等，因此在厚件產品上的研究課題亦是不可忽視的。

1-2 傳統射出成型製程簡介

傳統射出成型製程應用於日常生活用品已行之多年，並且帶給大眾極大的便利。諸如漱口杯、臉盆，更或者是手機外殼等，皆是射出成型之製品。而一般傳統的射出成型製程主要可劃分為兩個階段：充填階段（Filling Stage）和後充填階段（Post-Filling Stage）；充填階段是將固態、顆粒狀的塑料加入射出成型機的料桶或中央烘料機的料桶內，加熱烘乾約 3~4 小時，溫度約在 80 90 ，將塑料乾燥處理至塑膠含水率在 0.1%，主要目的是避免流紋、氣泡及水氣的產生。

藉著料管外之加熱片將塑料加熱至成型溫度後，經由螺桿的均勻攪拌，以一定之射速、射壓，將熔融狀態的塑料，射入成型模穴中，此階段稱之為充填階段（Filling Stage）。

在後充填階段中，又可分為保壓階段（Packing Stage）及冷卻階段（Cooling Stage）。充填過程中，由於高溫的塑膠高分子溶體經由螺桿的推動進入低溫的模穴中直至熔膠充滿整個模穴為止。由於熔膠為可壓縮性，及高溫熔膠在冷卻時有相當程度的收縮。因此保壓階段（Packing Stage）是為減少因收縮所造成的尺寸誤差之重要階段。而後充填階段之最後階段為冷卻階段（Cooling Stage），其階段為持續將模穴中高溫熔膠冷卻至模穴表面固化之相當程度才脫膜頂出。在傳統射出成型中的保壓和冷卻階段之製程參數是後充填過程影響成型品之收縮、翹曲變形、殘餘應力、和尺寸精密度等成品品質之關鍵。目前製程均走向精密化，因此在後充填階段所造成之影響已然成為成型品品質的好壞。

大致來說，射出成型製程中，模穴內的熔膠各點之壓力、流速、溫度與密度變化以及這些參數分佈不均所造成的缺陷均會影響產品品質。常見的成品缺陷包括：收縮凹陷（Sink Mark）、收縮

（Shrinkage）、殘留應力（Residual Stress）等。但由於成型製程中必須將塑料以高壓射入模穴中，以及後續保壓過程中持續維持的高壓會

引起模穴內熔膠不均勻的壓力分佈而使得成品產生翹曲變形、殘留應力等等的缺陷，這些缺陷的是精密射出成型所要探討的問題。因此後來才会有許多新穎之製程的產生，如雙料共射出成型、水輔助射出成型以及氣體輔助射出成型的發展。

1-3 研究動機與目的

射出成型是目前市面上對於多樣或複雜塑膠的製品之諸多方法中最为普遍且實用的製程方法之一，以往由於射出成型製程參數控制與模具設計相關課題必須相當依賴經驗和嘗試，所以一直難於應用於複雜、高品質和高經濟價值之成品；近年來由於工程分析軟體在射出成型製程上的應用成功，逐漸受到業界及學界的肯定，提供射出成型製程流動平衡、流道設計、澆口位置、成形模腔數量、冷卻液與管路設計和成形週期控制等製程參數設計及模擬，降低了經驗的依賴性和縮短了嘗試期，使得射出成型之產品應用廣泛，涵蓋了電子工業、汽車工業、家電工業、光學儀器乃至於航太工業等，其中高精密零組件所要求的成品品質，均有賴於成形技術的改良、正確的分析與控制。

而對於傳統射出成型存在保壓和冷卻之後充填過程仍是對成形品之收縮、翹曲變形、殘餘應力、和尺寸精密度等成品品質具有關鍵性的影響。雖然分析軟體對傳統射出成型製程之應用逐漸受到大眾的肯定，但對於近年來逐漸蓬勃發展的新穎製程技術，如雙料共射出成型、氣體輔助射出成型等，在缺乏經驗的累積下，在製程分析方面的準確性仍是有待檢測的。並且新的製程技術中也引進了新的製程參數，同時製程控制的複雜性也相對提高，因此在製程分析方面，仍是模流分析中之重要課題。

對於傳統射出成型後充填過程中，可壓縮性熔膠於高壓流動和成品收縮利用保壓階段補償後之流動現象或收縮之情形往往受限於實驗設備，以致於無法明確預測與觀察熔膠在成形模穴中的運動狀態，因此這是一個相當重要的課題。此外傳統射出成型在成型厚件產品時，往往受限機台的限制，而產生成型品的殘留應力及收縮之影響品質。

因此本研究中將針對保壓階段對於厚件產品之影響作一探討，並且對於保壓階段中的重要因素：保壓壓力大小、保壓時間長短，做一實驗規劃，期望找出影響殘留應力之主要因素，以及影響收縮率之因素。

1-4 文獻回顧

由於厚件產品在射出成型製程中常以多段射出或加大保壓壓力，來達到其成型之目的，而在殘留應力方面卻不常是考慮的重點，因此在許多文獻中常忽略其重要性。而在 Furong Gao [1] 曾指出在一定模穴內，若以常數的保壓壓力來做保壓，則在保壓壓力低的時候，在澆口附近的厚度會較薄，並且逐漸增加保壓壓力的時候，可改善成型品的表面平整度 (evenness)，但保壓壓力過大的時候不僅會降低平整度，而且會使得成型品產生毛邊 (Flash)，也就是造成過保壓的情形。Xi Chen [2,3] 曾指出在保壓壓力不高於一定值 (500 bar) 的情形下，成型品就不會出現毛邊的現象。

對於射出成型品之殘留應力的觀察與量測，光彈法 (Photoelasticity) 是為最廣泛地被使用來量測透明成型品的殘留應力及雙折射率差值的方法 [4]，而且此法為非破壞檢測的方法之一。Koita [5] 曾指出，對相同厚度的成型品，干涉條紋分佈狀況，表示其產品內部之收縮情形，進而判讀其殘留應力分佈情形。而量測雙折射率差值的成品所產生之干涉條紋的光彈圖形是利用光學應力定律 (Optical Stress Law) 來計算塑膠成品之雙折射率差值，對研究者而言，是相當迅速且便利的 [6-8]，而且可以避免直接量測及計算殘留應力時之繁雜的運算工作，可使得研究者容易的得到其殘留應力的分佈趨勢。

總而言之，雖說目前薄殼 3C 產品為市場及研究之主流，但厚件成品之殘留應力及收縮率影響之研究仍有其重要性，而且目前針對研究厚件產品之研究成果並不多，尤其是不同厚度的厚件產品，因此在厚件產品的成型法、成型製程仍是一個相當重要的課題。

1-5 本文架構

本文共分為六章。第一章針對一般傳統射出成型的製程做一簡單介紹，同時分析射出成型在厚件產品上的殘留應力和收縮率的改善之應用現況。並對本文的研究動機、相關文獻作一說明。第二章主要以介紹實驗設備及材料為主，並對實驗方法作一說明。第三章以說明實驗上所用到的射出成型理論為主，並對殘留應力理論之探討，以及分析所須用到之理論模式，加以探討。第四章介紹光彈之應用理論與光學性質材料之雙折射率差值量測理論。第五章則是對所做實驗之結果，針對殘留應力及收縮率，並與模擬分析作一比較及對結果作一詳盡探討。第六章對相關製程研究做一結論及對未來發展方向作一說明。

第二章 實驗設備與實驗方法

2-1 射出成型機

實驗所用的全電式射出成型機為日鋼 JSW J85EL 全電式射出成型機，如圖 2-1，噸數為 100 噸，最大射壓為 $1670 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ (169 MPa)，最大射速為 $200 \text{ mm}/\text{sec}$ ，鎖模力為 85 噸，螺桿直徑為 35 mm，螺桿最大行程為 120 mm。

2-2 模具

實驗模具為一個一模一穴之模具，如圖 2-2，成品為一平板，其尺寸如圖 2-3，在成品的厚度方面，在模仁的設計上特別設計為厚度為可替換式的，因此可將成品之厚度及澆口作 4mm、6mm、8mm 等 3 種不同的厚度變化。

2-3 成型材料與模溫控制器

為了能方便光彈觀測殘留應力的集中現象，因此在實驗中選定材料為 PC 及 PMMA。PC 其密度為 $1.0603 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，工作溫度在 260 300 之間，玻璃轉換溫度約在 150。PMMA 其密度為 $1.0606 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，工作溫度在 190 255，玻璃轉換溫度約在 95。

為使模穴內之熔膠流動正常，因此在模溫控制部分則是利用油路循環模溫控制機(如圖 2-4)，並且為不使公模與母模溫度差異太大，

因此其油路循環採 4 個循環，溫度由室溫加熱至 90 的工作溫度，以期得到好的溫度控制。

2-4 實驗方法

在成型性上依據成型品的厚度不同，藉由製程參數之設計尋找出在厚件的製程上，最適合的製程參數，並更進一步的透過這些參數的設定來找出如何利用傳統射出成型的原理，改善厚件的殘留應力問題及收縮率問題。

首先在實驗設計上，先對每一種厚度（4mm、6mm、8mm）利用短射實驗作一充飽模穴但不加任何保壓效果之原始比較試片。其次透過改變保壓壓力（50.7 MPa、84.5 MPa、118.3 MPa）保壓時間（5 sec、10sec、15sec）的方式，在均一厚度為 4 mm 的成型品上，來觀察對成型品之殘留應力及收縮率的影響，依次變換其厚度，分別有 4 mm，6 mm，8 mm 等三種不同厚度。由於材料特性之不同，因此挑選兩種材料 --- PC、PMMA。其中作為觀測殘留應力之材料為 PC，作為量測收縮率之材料為 PMMA。而其如此選擇的原因為 PMMA 是為眾所皆知的光學材料之一，因此其殘留應力之現象自然就不明顯，所以 PMMA 就本研究來說並不適用於殘留應力之量測。而 PC 為大眾所知的最易產生殘留應力的材料之一。而實驗所規劃的組別如表 2-1 所示。

分析階段則是將實驗數值代入模流分析軟體 MPI 中，並將 MPI 中機台設定與實際機台相近，以確保分析結果之準確性。並利用軟體分析其保壓壓力、保壓時間對厚件產品的殘留應力及收縮改善情形之趨勢，以及分析之收縮率大小。最後與實驗做一比對。

2-5 光彈系統

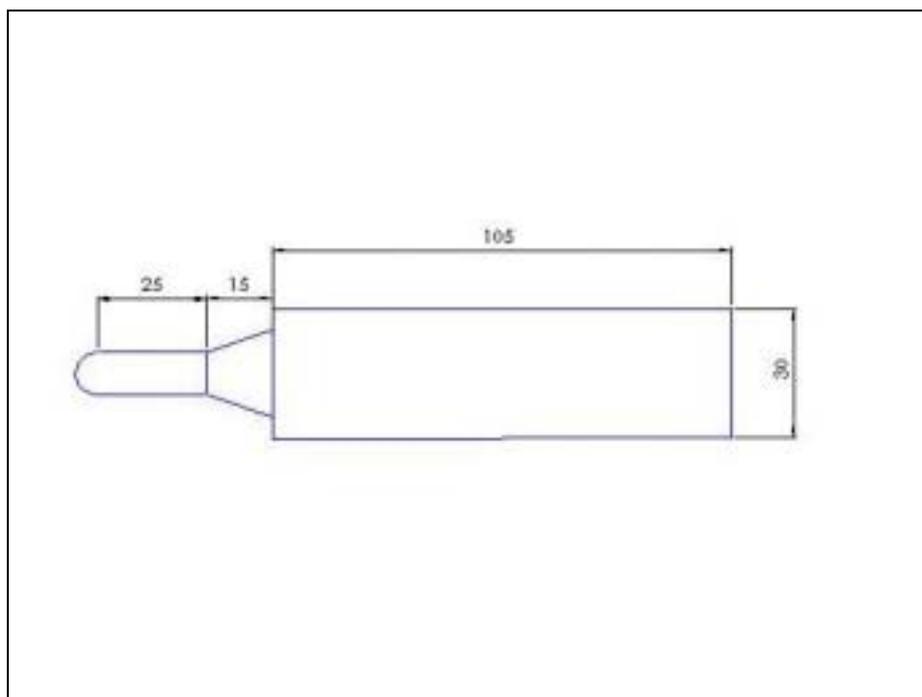
本研究所使用之光彈系統，其組件包括一波長為 589.3 nm 之鈉光源，直徑 40 mm 之平面偏振片以及兩片四分之一波板組成的穿透式光彈儀，並利用彩色 CCD 電子攝影鏡頭配合一部 586 個人電腦，抓取實驗成型品在光彈儀中的干涉影像，以分析其殘留應力集中的現象，如圖 2-6 所示。



圖 2-1 日鋼 JSW J85EL 全電式射出成型機



圖 2-2 模具外觀圖



單位：mm

圖 2-3 成品尺寸圖



圖 2-4 油路循環模溫控制機



圖 2-5 中央控制烘料機



圖 2-6 數位式光彈量測系統

表 2-1 實驗組別表

厚度 保壓 時間 保壓壓力	4 mm	6 mm	8 mm
	50.3 MPa	5 sec	5 sec
10 sec		10 sec	10 sec
15sec		15sec	15sec
84.5 MPa	5 sec	5 sec	5 sec
	10 sec	10 sec	10 sec
	15sec	15sec	15sec
118.3 MPa	5 sec	5 sec	5 sec
	10 sec	10 sec	10 sec
	15sec	15sec	15sec

第三章 射出成型理論分析及殘留應力理論分析

3-1 基本假設

射出成型製程過程之理論基礎自過去以來均架構於 Hele-Shaw 流動的模式，而且經過多年的驗證，證實了薄件成品的在工程上具有相當的準確性，但在厚件成品方面，分析之準確性仍有待探討。而本研究主要是以厚件產品的平板成型品為主，因此應用非等溫且具壓縮性之非牛頓黏性流體的流動模式，以補償厚件在後充填過程所產生收縮體積，並配合狀態方程式及黏度方程式，以探討傳統射出成型加工過程中可壓縮性高分子熔體在後充填過程後所產生的收縮體積及殘留應力對厚度成品的影響。在基本的邊界與初始條件則延續充填過程分析結果，利用保壓壓力、保壓時間等各項性質的變化，以探討保壓對殘留應力之影響及收縮率的改善情形。

在充填階段過程，基本假設如下：

- (1) 高分子熔體為一非牛頓流體，忽略彈性效應的黏性流體。
- (2) 以潤滑或潛變流動描述熔體流動狀態，忽略慣性力效應(Inertial Force) 與體力 (Body Force)，故採用 Hele-Shaw Flow 模式分析。
- (3) 由於厚度的量階遠小於成品各維度量階，厚度方向無壓力差，故厚度方向速度為零。

- (4) 由於高分子熔體熱傳導率較低，故在厚度方向的冷卻效應遠大於平面的方向，而忽略平面方向的熱傳導效應。
- (5) 在邊界面滿足不滑動 (No Slip) 條件
- (6) 比熱值與傳導係數以常數 (constant) 估計。

3-2 傳統射出成型之理論模式

基於傳統射出成型週期劃分法和假設，分別從流道系統和平板系統推導出系統統御方程式。

3-2-1 流道系統

針對傳送熔膠於成形模穴之澆道 (Sprue) 流道 (Runner) 等傳遞系統，而一般均以管徑流 (Tube Flow) 為模擬分析之模式，如圖 3-1。將高分子熔體在流道系統內的流動狀態分別簡化推導出暫態連續方程式 (3-1)、動量方程式 (3-2) 和能量方程式 (3-3)：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0 \quad (3-1)$$

$$0 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \eta \frac{\partial u}{\partial r} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3-2)$$

$$\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r k \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \eta \dot{\gamma}^2 \quad (3-3)$$

其中 $\dot{\gamma}$ 為剪切率 (Shear Rate)，定義為：

$$\dot{\gamma} = \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \quad (3-4)$$

x 和 r 分別代表軸向和徑向維度；u 為軸向速度，一般由量階分析得知徑向速度遠小於軸向速度，所以予以忽略不計。T 為時間變量。P、T 和 ρ 分別代表為熔膠流體之壓力、溫度和密度，而 η 為熔膠流體的黏滯係數(Viscosity)； C_p 和 k 分別為熱性質中的比熱(Specific Heat)和熱傳導係數(Thermal Conductivity)。

而方程式 (3-1)、(3-2) 和 (3-3) 也分別代表管徑流軸向之質量守恆、動量守恆和能量守恆概念。另外管徑流徑向邊界條件為：

$$u = 0 ; T = T_w \quad \text{當 } r = R \quad (3-5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} = 0 , \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad \text{當 } r = 0 \quad (3-6)$$

R 代表為圓管半徑， T_w 為模壁溫度。

為了得到系統方程式，首先從質量守恆觀點對 (3-1) 式作徑向積分，

$$2\pi \frac{\partial}{\partial t} \int_0^R \rho r dr + 2\pi \frac{\partial}{\partial x} \int_0^R \rho u r dr = 0 \quad (3-7)$$

並且從動量方程式積分可得：

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{r}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3-8)$$

因此

$$\begin{aligned} \int_0^R \rho u r dr &= \frac{1}{2} \rho u r^2 \Big|_0^R - \frac{1}{2} \int_0^R \rho r^2 du \\ &= \frac{1}{2} \int_0^R \frac{\rho r^3}{2\eta} \left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right) dr \end{aligned} \quad (3-9)$$

方程式 (3-7) 重新整理為

$$2\pi \frac{\partial}{\partial t} \int_0^R \rho r dr + 2\pi \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{2} \int_0^R \frac{\rho r^3}{2\eta} \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right) dr \right] = 0 \quad (3-10)$$

若考慮到分割區域中每一個元素 (Element) 其密度定義為定值 $\bar{\rho}$,

則 (3-10) 式可重新得到區域 (Local) 之統御方程式 :

$$\frac{A}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \pi \frac{\partial}{\partial x} \left[S_c \left(-\frac{\partial P}{\partial x} \right) \right] = 0 \quad (3-11)$$

其中 A 為圓管截面積 , 而 S_c 定義為圓管流導率 (Fluidity) :

$$S_c = \int_0^R \frac{r^3}{2\eta} dr \quad (3-12)$$

3-2-2 平板系統

由上述之基本假設 , 將高分子熔體在平板模穴內 (圖 3-2) 的流動狀態分別簡化 , 因而推導出連續方程式 (3-13) 動量方程式 (3-14、3-15) 與能量方程式 (3-16) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v) = 0 \quad (3-13)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3-14)$$

$$0 = \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3-15)$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \eta \dot{\gamma}^2 + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-16)$$

$$\text{其中, } \dot{\gamma}^2 = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2}$$

u和v分別代表x和y方向速度分量，z為平板厚度方向維度，由模擬分析得知厚度方向速度為0，遠小於x和y方向速度，所以可將其影響予以忽略不計。b代表為平板厚度。

另外邊界條件為，

$$u = 0, v = 0; \quad T = T_w \quad \text{當 } z = b/2 \quad (3-17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial z} = 0, \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{當 } z = 0 \quad (3-18)$$

為了推導得系統方程式，首先從質量守恆觀點對(3-13)式作厚度方向積分，

$$2 \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{b/2} \rho dz + 2 \frac{\partial}{\partial x} \int_0^{b/2} \rho u dz + 2 \frac{\partial}{\partial y} \int_0^{b/2} \rho v dz = 0 \quad (3-19)$$

並且從動量方程式積分可得

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{z}{\eta} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (3-20)$$

$$\frac{\partial v}{\partial z} = \frac{z}{\eta} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (3-21)$$

$$\text{因此} \quad \int_0^{b/2} \rho u dz = \rho u z \Big|_0^{b/2} - \frac{1}{2} \int_0^{b/2} \rho z^2 du$$

$$= \int_0^{b/2} \frac{\rho z^2}{2\eta} \left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right) dz \quad (3-22)$$

$$\int_0^{b/2} \rho v dz = \rho v z \Big|_0^{b/2} - \frac{1}{2} \int_0^{b/2} \rho z^2 dv$$

$$= \int_0^{b/2} \frac{\rho z^2}{2\eta} \left(-\frac{\partial P}{\partial y}\right) dz \quad (3-23)$$

將方程式 (3-19) 重新整理為

$$2\frac{\partial}{\partial t} \int_0^{b/2} \rho dz + 2\frac{\partial}{\partial x} \left[\int_0^{b/2} \frac{\rho z^2}{2\eta} \left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right) dz \right] + 2\frac{\partial}{\partial y} \left[\int_0^{b/2} \frac{\rho z^2}{2\eta} \left(-\frac{\partial P}{\partial y}\right) dz \right] = 0 \quad (3-24)$$

若考慮分割區域中每一個元素 (Element) 其密度為定值 $\bar{\rho}$ ，則

(3-24) 式可重新得到區域 (Local) 之統御方程式：

$$\frac{b}{\rho} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[S \left(-\frac{\partial P}{\partial x}\right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[S \left(-\frac{\partial P}{\partial y}\right) \right] = 0 \quad (3-25)$$

其中 S 定義為：

$$S = \int_0^b \frac{z^2}{2\eta} dz \quad (3-26)$$

3-3 殘留應力之基本理論

在整個射出成型過程中由於成品脫模前，熔膠材料隨著溫度的變化由液態至玻璃態，最後凝固成固態成品。其中熔膠材料經歷了相當程度複雜的機械效應以及化學效應，而導致成型品在整個成型過程中產生了兩種不同的殘留應力。其一為流動所引起之應力，此乃因熔膠在非等溫下之充填與保壓過程中所產生之剪切應力與正向應力被凍結在成型品中的結果。此種殘留應力被稱為流動殘留應力。另一種殘留應力則是因為熔膠在冷卻過程中，由於不均勻冷卻所造成，在

模穴內每一個位置及厚度方向之每一層於不同的時間若有不均勻的溫度分布，以致於使在模穴內之熔膠不均勻的固化及收縮，則因熔膠為具黏彈性質的高分子材料，所以在溫度低於玻璃轉換溫度時，由於模穴內的模溫不能均勻，因此就會造成密度及應力鬆弛效應的不平衡，以致於形成熱殘留應力。

3-3-1 熱殘留應力

本論文中將厚度方向的座標軸表示為 z ，而其他兩個垂直於厚度方向並互相垂直的座標軸則表示為 x 和 y 。假設熔膠為一具有等向性質的材料，因此在成品的某一區域已經不在流動的時候，此實這個區域的應力狀況為

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma \quad (3-27)$$

接下來於剪切應力 (Shear Stress) 方面，假設為 0 的狀況。

$$\sigma_{xy} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0 \quad (3-28)$$

其次考慮 z 方向的應力平衡

$$\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial x_z} = 0 \quad (3-29)$$

所以

$$\sigma_{zz}(x_z, t) = \sigma_{zz}(t) = -P \quad (3-30)$$

其中P是在時間t時的熔膠壓力。因此，應變的各個分量則為

$$\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{yy} = \varepsilon(x_z, t) \quad (3-31)$$

$$\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yz} = \varepsilon_{xz} = 0 \quad (3-32)$$

而膨脹方程式則為

$$2\sigma - P = 3K(2\varepsilon + \varepsilon_{zz} - 3\alpha\Theta) \quad (3-33)$$

其中是以參考溫度為基準的熱膨脹係數，而在本論文中將其假設為常數；K則是材料的容積模數（Bulk Modulus）如下式

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (3-34)$$

其中E是楊氏係數，而 ν 則是蒲松比。

在公式(3-33)中，由於熔膠平面方向的每一個位置及厚度方向之每一層，其溫度分佈及冷卻的速率均不相同，所以熔膠到達材料時間為0，意即停止流動時的時間也就互不相同。當熔膠停止流動的時候，則偏量應力和應變就被假設為0；也因此應力張量內其他三個元素其值就等於此時的

熔膠壓力。而在橫向壓力在應用迴轉定律 (Convolution Theorem) 可得

$$\sigma^* = P^* (R_1^* - R_2^*)s + 9K(\varepsilon^* - \alpha_0\Theta^*)R_1^*s \quad (3-35)$$

其中

$$R_1^* = \frac{2\mu^*}{(4\mu^*s + 3K)} \quad (3-36)$$

$$R_2^* = \frac{3K}{s(4\mu^*s + 3K)} \quad (3-37)$$

R_1 和 R_2 是決定壓力與溫度隨時間變化的效應而造成
在熔膠內壓力的對應函數，將 (3-35) 式以反拉普拉斯轉換法
(Inverse Laplace Transform Method) 處理，然後使用迴轉定律
之後可得

$$\begin{aligned} \sigma = & -[2R_1(\xi) + R_2(\xi)]P_0 + \int_0^\xi [R_1(\xi - \xi') - R_2(\xi - \xi')] \frac{\partial P}{\partial \xi'} d\xi' \\ & + 9K \int_0^\xi R_1(\xi - \xi') \frac{\partial}{\partial \xi'} (\varepsilon - \alpha_0\Theta) d\xi' \end{aligned} \quad (3-38)$$

以上式子是應用如下的初始 - 無偏量應變的狀況而得

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_{zz}(t) = -\frac{P_0}{3K} \quad (3-39)$$

其中 P_0 是當此層通過無流動溫度時之熔膠壓力，而同時
也將熱膨脹的參考溫度 Θ 假設等於無流動溫度。這是因為假
設在實際射出成型過程中，不論是在充填、保壓或者是冷卻
的過程，成型品由於受到射出壓力、保壓壓力、成型品本身

的幾何形狀以及其表面與模具間的摩擦力等因素作用下，而使其完全束縛在模穴中而不能作橫向的運動之結果。

熔膠自停止流動到冷卻階段結束為止都被假設固定束縛在模穴內，應用波尼級數表示法來描述剪切模數的方式以及參考Santhanam推導 $R_1(\xi)$ 和 $R_2(\xi)$ 的結果，因此其初始橫向應變如(3-39)式所表示，而將其代入(3-38)式可得

$$\sigma = -[2R_1(\xi) + R_2(\xi)]P_0 + \int_0^\xi R_1(\xi - \xi') \frac{\partial P}{\partial \xi'} d\xi' - \int_0^\xi R_2(\xi - \xi') \frac{\partial P}{\partial \xi'} d\xi' - 9K\alpha_0 \int_0^\xi R_1(\xi - \xi') \frac{\partial \Theta}{\partial \xi'} d\xi' \quad (3-40)$$

上式可用來描述成型品任一位置與其厚度上任一層當壓力與溫度隨時間變化時其熱殘留應力的數值；而圖3-3所表示的就是在厚度方向的溫度場與熱應力之關係。當成型品在模具內的冷卻過程結束後就會被頂出，此時其邊緣在模具內所受到的應力與彎曲力矩也同時被釋放掉，但是以凍結在內層之殘留應力並不會一起釋放掉。

3-3-2 流動殘留應力

流動殘留應力可應用一個在兩平行板內作非等溫高分子流動之Leonov理論模型來模擬，而此理論也可計算熔膠再模

穴內流動時所產生的剪應力、正向應力、雙折射率差以及其鬆弛與殘留現象。

Leonov理論是以熱動力學之不可逆過程為基礎，可用來計算於充填過程與後充填過程中所造成的流動殘留應力。對於剪切流 (Shear Flow) 其理論公式為

$$\tau(x_z, t) = 2 \sum_{k=1}^N \mu_k \begin{bmatrix} C_{xx,k}(x_z, t) & 0 & C_{xz,k}(x_z, t) \\ 0 & 1 & 0 \\ C_{zx,k}(x_z, t) & 0 & C_{zz,k}(x_z, t) \end{bmatrix} \quad (3-41)$$

$$+ 2\mu_s \gamma(x, t) \theta_1(T) \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

其中

$$\mu = \frac{\eta_0(T)}{2\theta_0(T)} \quad (3-42)$$

$$\mu_k = \frac{\eta_k(T)}{2\theta_k(T)} \quad (3-43)$$

而 $\theta_k(T)$ 和 $\eta_k(T)$ 分別代表在第 k 個模式下的鬆弛時間 (Relaxation Time) 與剪切黏度 (Shear Viscosity)， $\eta_0(T)$ 為零剪切黏度

$$\eta_0(T) = \sum_{k=1}^N \frac{\eta_k(T)}{1-s} \quad (3-44)$$

其中 s 是流變參數，其值在0與1之間視狀況而定。

$C_{ij,k}$ 是在第 k 個模式下彈性應變張量 (Elastic-Strain Tensor) 內的組成，而 $C_{ij,k}$ 之初始條件則是由絕緣穩態剪力以及全展開 (Fully-Developed) 的 Poiseuille 型態流動所決定。利用非彈性與黏彈性公式使其形成剪切應力而得到

$$\Lambda = \left(\frac{2\mu shU - 2 \sum_{k=1}^N \mu_k \int_0^h \frac{x_z C_{xz,k}}{\theta_1} dx_z}{\int_0^h \frac{x_z^2}{\theta_1} dx_z} \right) \quad (3-45)$$

式中 U 是已知位置 x_x 的容積速度 (Bulk Velocity)。

若目前 $C_{xz,k}$ 之值已知則在壓力梯度 Λ 代入之下就可以利用以上這些方程式將剪切率與容積速度之值算出。因此其後可隨時間的遞增而展開這些方程式已更新彈性應力張量內之組成，另外鬆弛時間 $\theta_k(T)$ 可以用 WLF 平移函數獲得。而在知道 $C_{ij,k}$ 之值後，就可以利用下是來計算出正向應力差。

$$\sigma_{xx} - \sigma_{zz} = 2 \sum_{k=1}^N \mu_k [C_{xx,k} - C_{zz,k}] \quad (3-46)$$

3-4 材料性質

傳統射出成型過程中，熔膠在成型模穴中後充填過程之保壓和冷卻過程，保壓階段塑膠原料於高溫高壓成型模穴中是為可壓縮物質；

另外對於熔膠的流動性或成型性，其黏滯特性顯現出相當重要的因素。熔膠流體之薄剪行為特性使得黏度係數隨著剪應率值的增加而減小，且受溫度和壓力的影響。所以在此過程為了正確得描述熔膠在成型模穴中之運動過程與壓力、溫度和速度變化等量場，必須正確的導入熔膠狀態方程式（PVT-State Equation）和黏度方程式（Viscosity Equation）。

3-4-1 熔膠狀態方程式

對於熔膠流體的狀態方程式，均有賴於實驗量測公式（Empirical Formulation）的近似描述，其中以Tait方程式最為代表性，模式可經由不同係數來描述非結晶性材料（Amorphous Material）和半結晶性材料（Semi-crystalline Material）其液態和固態二相態區。所以研究分析模式以Tait方程式為非結晶性可壓縮性熔膠的狀態方程式。所以本研究以Tait方程式作為非結晶性可壓縮性熔膠的狀態方程式：

$$v(P, T) = v_0(T)[1 - C \ln(1 + P/B(T))] + v_t(T, P) \quad (3-47)$$

$$v_0(T) = \beta_1 + \beta_2(T - \beta_5)$$

$$B(T) = \beta_3 \cdot \text{Exp}[-\beta_4 \cdot (T - \beta_5)]$$

$$T_t(P) = \beta_5 + \beta_6 \cdot P$$

$$v_i(P, T) = \beta_7 \cdot \text{Exp}(\beta_8(T - \beta_5) - \beta_9 \cdot P)$$

其中 $c=0.0894$ 為通用常數值， $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \beta_6, \beta_7, \beta_8$ 和 β_9 常數分別在液態和固態二相態區有不同常數值；而液態和固態二相態是以熔膠轉換溫度 T_t (Transition Temperature) 為分界點。當熔膠溫度小於轉換溫度 T_t 時， $v_i(P, T)=0$ 。

3-4-2 熔膠黏度方程式

有關熔膠的黏度方程式，為了顯現熔膠流體之薄剪行為特性使得黏度係數隨著剪應率值的增加而減小，且受溫度和壓力相當影響，故採用相當合理普遍的 Modified-Cross 模式 [12]：

$$\eta(T, \dot{\gamma}) = \frac{\eta_0(T)}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (3-48)$$

其中 η_0 為零剪切率黏度 (Zero-shear-rate Viscosity)，定義為

$$\eta_0(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \exp(\alpha P) \quad (3-49)$$

$\dot{\gamma}$ ， B 和 T_b 為材料常數， α 為黏度的壓力效應影響係數。而 n 為黏度剪應指數 (Shear Thinning Index)， P 和 T 分別代表為壓力和溫度。 $\dot{\gamma}$ 為剪應率。

3-5 分析邏輯與流程

本研究所用的方法採用的是控制體積/有限元素法 (CV/FEM) 來模擬分析熔膠的流動 [9-12] , 利用模型網格 (mesh) 上 , 每個節點所建立的控制體積來控制與描述流體的流動。

壓力場的求解首先利用 Galerkin 有限元素法 [9] 將分割區域的方程式 (3-48) 離散為壓力場的格點函數 , 再將區域方程式整合成全區域之離散方程式。

$$G(P,T) \frac{\partial P}{\partial t} - \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(S_1 \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(S_1 \frac{\partial P}{\partial y} \right) \right] + \left(\frac{\partial S_2}{\partial x} + \frac{\partial S_3}{\partial y} \right) = F(P,T) \quad (3-50)$$

其中

$$S_1 = \int_0^h \frac{z^2}{\eta_0 S} dz \quad (3-51)$$

$$S_2 = \int_0^h \frac{z}{\eta_0 S} \sum_{k=1}^N \frac{\theta_k}{\eta_k} C_{xz,k} dz \quad (3-52)$$

$$S_3 = \int_0^h \frac{z}{\eta_0 S} \sum_{k=1}^N \frac{\theta_k}{\eta_k} C_{yz,k} dz \quad (3-53)$$

而熔膠進入每個控制體積的淨流率 (net flow) , 可表示為 :

$$q_i^l = S^l \sum_{k=1}^{2or3} D_{ik}^l P_k^l \quad (3-54)$$

其中 D_{ik}^l 為節點壓力之影響係數 , 可表示為 :

$$D_{ik}^l = \sum_1^3 \frac{B_i B_k + C_i C_k}{4\Delta^{(l)}} \quad (3-55)$$

其中 $B_1 = y_2 - y_3$, $C_1 = x_3 - x_2$

而入口處淨 g 流率必須滿足

$$\sum_l q_i^l = Q \quad (3-56)$$

其他處則為 0 , 而 Q 為熔膠的全部體積流率 , 因此我們可以得到最終

的方程式為

$$[K]\{P\} = \{G\} \quad (3-57)$$

其中 $[K]$ 為係數矩陣， $\{G\}$ 之表示在入口處為

$$G_m * G_m = Q \quad (3-58)$$

而其他節點則為 0。

邊界條件的設定表示為：

$$\oint_C \left(-S \frac{\partial P}{\partial n} \right) ds = Q \quad (3-59)$$

其中 C 包含入口點的圍繞已充填熔膠部分之封閉曲線

為了描述波前的流動，本研究使用充填參數 f ，當 $f = 3$ 表示入口點， $0 < f < 1$ 表示波前節點， $f = 0$ 則代表尚未充填節點（如圖 3-4）。

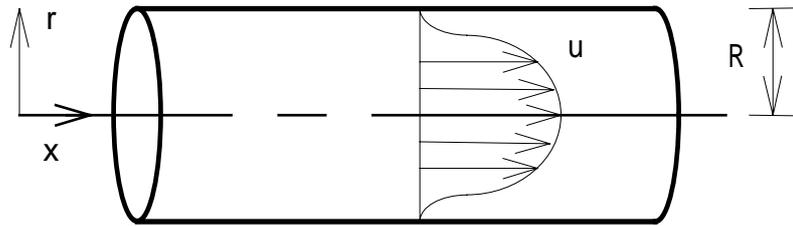


圖 3-1 軸對稱管徑流動示意圖

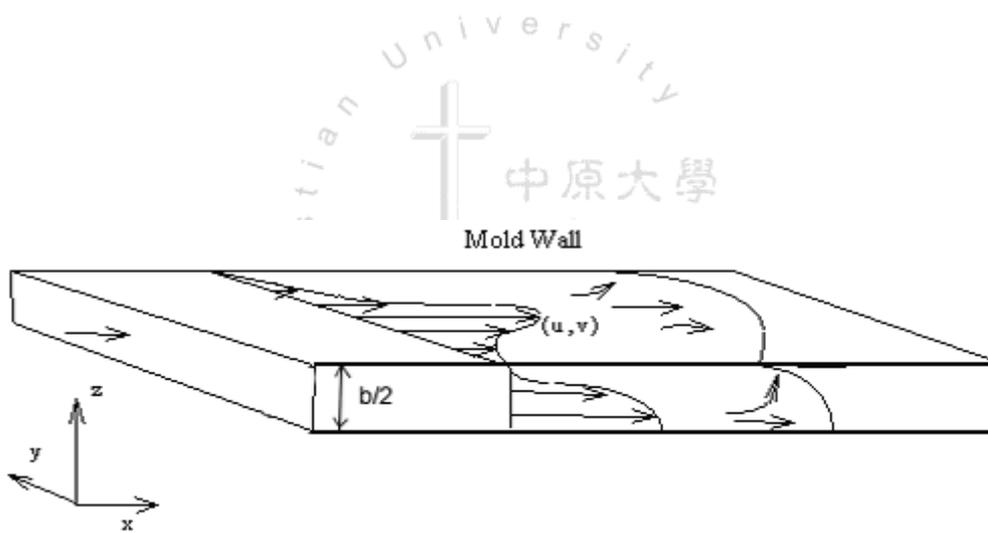


圖3-2 平板流動示意圖

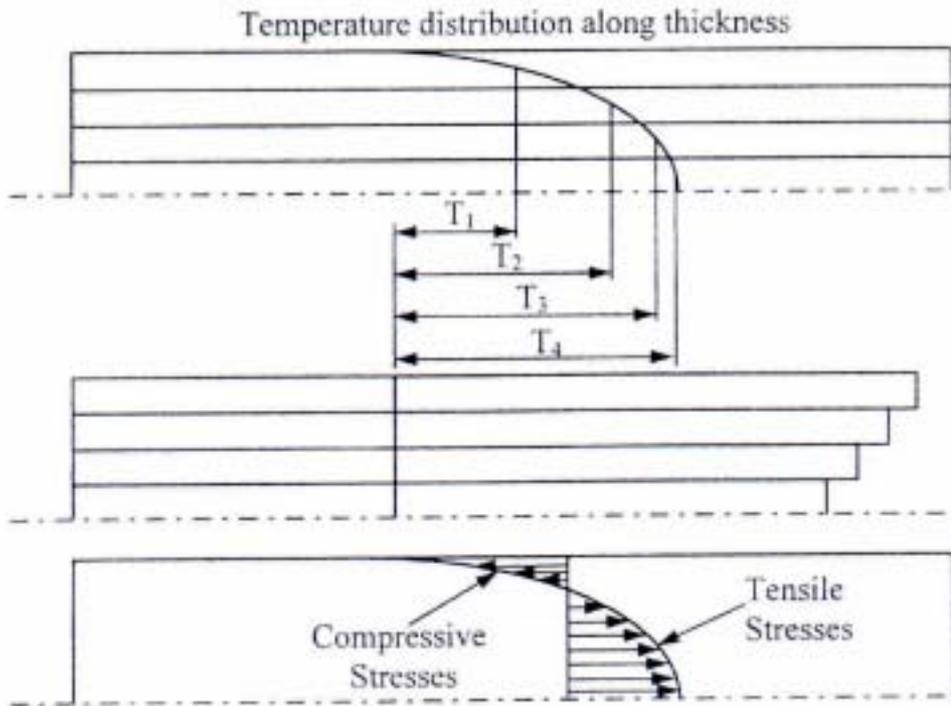


圖3-3 在厚度方向的溫度場與殘留應力之關係

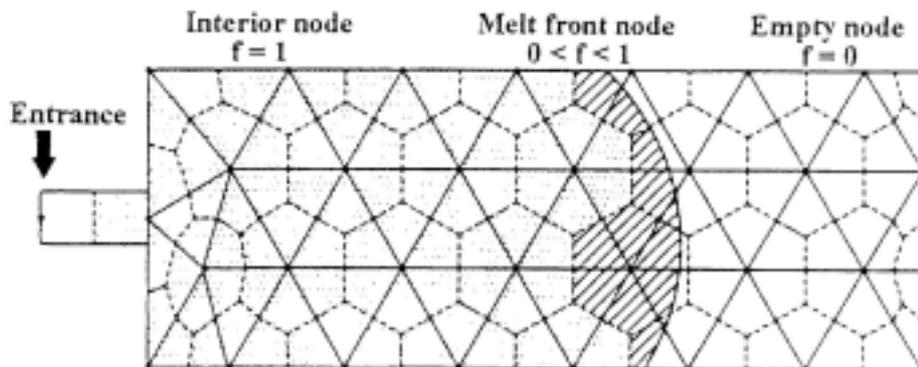


圖3-4 流動波前追蹤示意圖

第四章 雙折射率差值之量測的理論分析

4-1 傳統光彈理論

當一透明材質物件受外力作用，內部會產生不同的應力分佈情形，同時應力大小會與光線在該物質的折射率有直接的關係。於是我們可透過分析儀，藉由觀察光線在物質中的干涉現象（Interference）來讀出應力分佈的情形。

4-1-1 應力與光學關係及雙折射率差值理論

當光線射入某些晶體時，會在入射點被分解為兩個分量。這兩個分量通常會沿著不同方向透過晶體，因而這兩束光的折射率和透射速度會不相同，此種現象稱為雙折射。而其大小與分佈通常與材質內部的應力分佈狀況及收縮情況有關。

一般而言，投射到晶體上的光束，由於入射角的變化所產生的不同效應，可以很方便地用一種幾何形體直觀地顯示，此種幾何形體稱為折射率橢圓球（Index Ellipsoid）。橢圓球體的主軸與該點的應力主軸相重合，令 n_1 、 n_2 和 n_3 分別代表任意點上平行於主應力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 方向振動的光波主折射率。材料在一般三軸應力系統下主折射率和主應力的關係可以表示為：

$$n_i - n_j = (a - b)(\sigma_i - \sigma_j) = c(\sigma_i - \sigma_j) \quad i, j, k = 1, 2, 3 \quad (4-1)$$

其中 a 、 b 值取決於材料的參數，而 $c = a - b$ 稱為應力光學係數

(Stress-optic coefficient)。

另一方面，對於晶體內的光程差，(Optical path difference) 或相對滯後 (Relative retardation) 的問題，若考慮兩束波長相同的光線沿法向穿過厚度均為 d 但折射率各為 n_1 和 n_2 ($n_1 > n_2$) 的兩塊平板，則它們的光程差分別為 $n_1 d$ 與 $n_2 d$ 。於是光程差或相對滯後定義為：

$$\Delta = (n_1 - n_2)d \quad (4-2)$$

若考慮處於二維應力或雙軸應力狀態下平板的雙折射情況，板平面內的主應力 σ_1 ， σ_2 沿整個厚度是定量，而垂直於板平面的主應力 $\sigma_3 = 0$ ，於是任意點的光學特性可用一個三軸橢圓球體來表示，橢圓球體的主軸與主應力相重合，如圖 4-1 所示。由 (4-1) 式可得

$$\begin{aligned} n_1 - n_2 &= c(\sigma_1 - \sigma_2) \\ n_1 - n_3 &= c\sigma_1 \\ n_2 - n_3 &= c\sigma_2 \end{aligned} \quad (4-3)$$

此時若有一列平面偏振光，其振動位於三個主截面中的任一介面內，則光透過平板時不產生其他變化，而對於法向入射沿著其他方向振動的光波，則被分解為兩個分別在平面 AOC 和 BOC 內(如圖 4-1)振動之分量。若板的應力沿整個厚度是不變的，則這兩個分量的相對滯後可寫成：

$$\Delta = (n_1 - n_2)d = c(\sigma_1 - \sigma_2)d \quad (4-4)$$

其中 Δ ：為光進入模型中所產生的相對滯後值

σ_1, σ_2 ：平面內主應力

c ：為應力-光學係數；單位定義為 Brewsters

$$(1 \text{ Brewsters} = 10^{-12} \text{ m}^2 / N)$$

d ：入射光垂直射入模型的路徑長，即模型厚度。

4-2 受應力平板在圓偏振儀中的效應

圓偏振儀 (Circularpolariscope) 的功能在量測偏振光通過受應力模型時所產生的相對滯後或相位差。其主要構造 (圖 4-2 所示) 為在兩片偏振鏡，及起偏鏡 (Polarizer) 與分析鏡 (Analyser) 之間插入兩塊主軸與偏振鏡成 45 度角的四分之一波片 (Quarter-wave Plate) 所組成。而相同的兩塊偏振鏡與四分之一波片之間的排列可以彼此正交或平行。模型則置於四分之一波片之間的圓偏振光場之中。

由圖 4-3 的光具排列彼此正交的方式來說明，當來自光源的自然光由起偏鏡轉化成平面偏振光波被第一片四分之一波片轉化成為逆時針旋向的圓偏振光波 (Circularpolarizedlight)；第二片四分之一波片又將此圓偏振光波轉化成在垂直平面內振動的平面偏振光波。由於分析鏡是水平，故光線在此處消光；於是，將模型置於圓偏振儀中時會呈現在暗背景中。而排列彼此均平行的方式亦呈現暗背景的狀況時，在圓偏振儀中，若偏振鏡與四分之一波片同為正交或同為平行之排列，則背景為黑暗。若偏振鏡為正交，四分之一波片為平行；或者偏振鏡為平行，四分之一波片為正交或同為平行的排列，則背景為明

亮。

當平板光彈模型在暗場的圓偏極光裝置下 (Dark field Circular Polariscope Set-up) , 通過分析鏡的光強度可表示為下式 :

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta}{2} = I_0 \sin^2 (N\pi) \quad (4-5)$$

式 (4-5) 表示 , 若調整圓偏振儀使其呈現暗視場 , 則當 $\sin^2 \frac{\Delta}{2} = 0$ 時 , 亦即當 $\Delta = 2n\pi$ 時 , 也就是相當於相對滯後等於波長整數倍的情形下 , 透射光強度為零 , 進而消失。因此呈現出的等色條紋線

(Isochromatic Pattern) 之級數也就相當於每條等色線所代表的滯後之全波長數 N , 而 $= 0, 1, 2, 3, \dots$ 等整數值 , 稱為整數條紋階數。

4-3 數位光彈理論

在影像處理系統中 , 對於光強度經數位化處理所得的值稱為灰度 (Gray Level) , 其與實際光強度的關係為

$$Z = BI^\gamma \quad (4-6)$$

其中 Z 為點之灰度 , B 為比例常數 , I 為對該點的光強度 , γ 為所使用 CCD 相機元件的靈敏度曲線斜率。

若光彈儀在暗場裝置時 , 依據傳統光彈理論光強度

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\Delta}{2} = I_0 \sin^2 (N\pi) \quad (4-7)$$

在影像處理系統中 , 其所對應之灰度值

$$Z = B[I_0 \sin^2 (N\pi)]^\gamma \quad (4-8)$$

最大光強度時， $I = I_{\max}$ 所對應之最大灰度值為 Z_{\max} ，則可得

$$\frac{Z}{Z_{\max}} = \left(\frac{I}{I_{\max}} \right)^{\gamma} = \left[\frac{\sin(N\pi)}{\sin(N_{\max}\pi)} \right]^{2\gamma} \quad (4-9)$$

N_{\max} 為 Z_{\max} 所對應的最大條紋級次值。在半級光彈法中， $N_{\max} = 0.5$ ，

則 $\sin(N_{\max}) = 1$ ，可得

$$\frac{Z}{Z_{\max}} = [\sin(N\pi)]^{2\gamma} \quad (4-10)$$

$$N = \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{Z}{Z_{\max}} \right)^{\frac{1}{2\gamma}} \right] \quad (4-11)$$

其中 N 為條紋級次； Z_{\max} 為最大光強度對應的灰度值。CCD 相機元件的靈敏度曲線斜率在每次取得光彈數據前皆須校正，校正方法可使用 Tray 補償法找到多組相互對應的 N 與 Z 值，在轉換成對應的 X 和 Y 值，並應用最小平方法 (Least Squares Method)，求得最佳之 A 值及 γ 值，所以灰度值與對應的條紋值可有下式求得：

$$N = \frac{1}{\pi} \sin^{-1} \left[\left(\frac{Z}{AZ_{\max}} \right)^{\frac{1}{2\gamma}} \right] \quad (4-12)$$

4-4 材料的條紋值

當相對滯後用條紋級數 N 以及波長 λ 來表示可寫成：

$$\Delta = N\lambda \quad (4-13)$$

所以 (4-32) 式可寫成：

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{Nf\sigma}{d} \quad (4-14)$$

其中常數 $f_{\sigma} = \lambda/C$ 稱之為材料條紋值 (Material fringe value)。它取決

於所使用的材料以及光的波長。其單位為牛頓/米*條紋。

而平面內最大剪應力：

$$\sigma_{\max} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (4-15)$$

所以

$$\sigma_{\max} = \frac{Nf_{\sigma}}{2d} \quad (4-16)$$



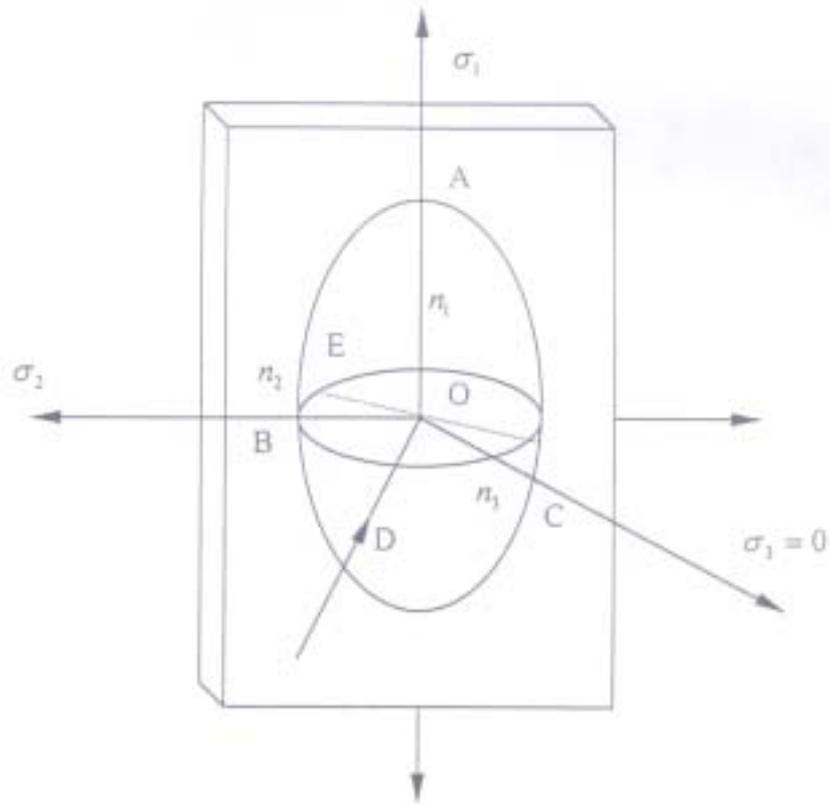


圖 4-1 雙軸應力場中一點的折射率橢球體

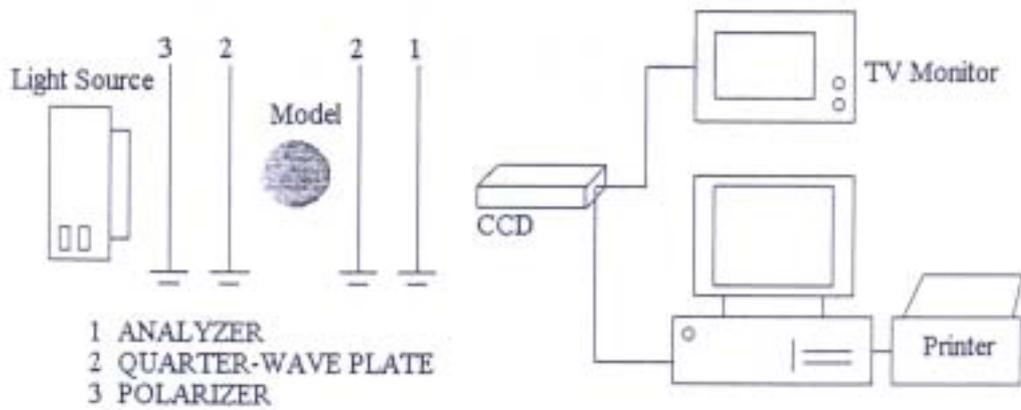


圖 4-2 光彈量測系統示意圖

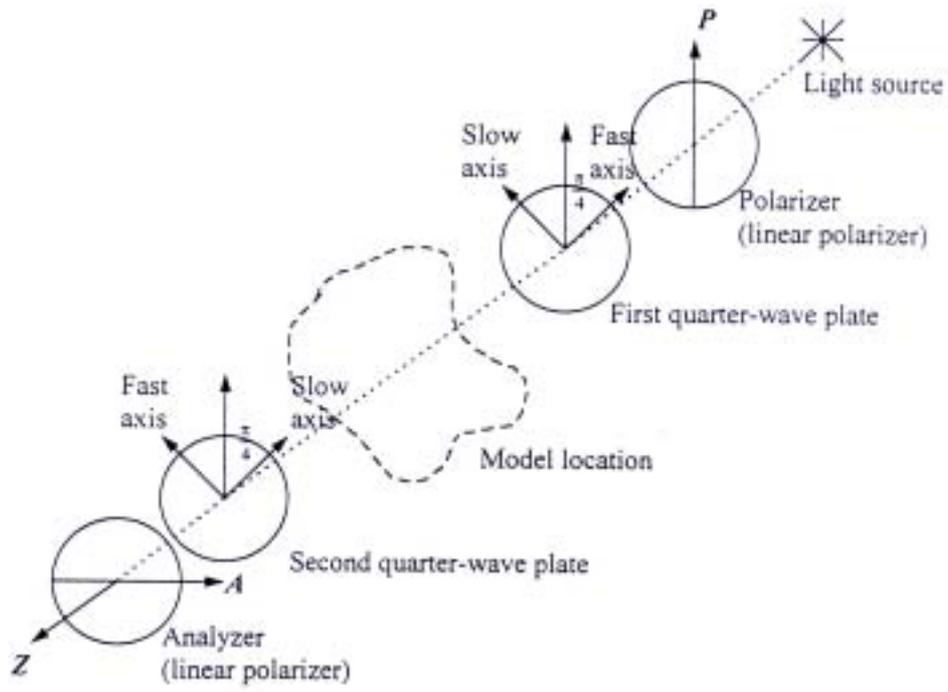
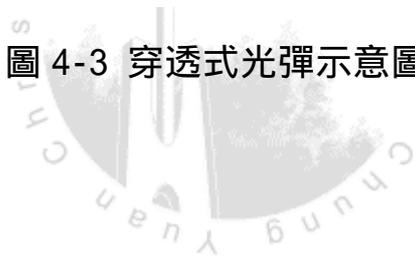


圖 4-3 穿透式光彈示意圖



第五章 結果與討論

5-1 前言

影響塑膠射出成型品之收縮率以及殘留應力大小之重要因素，乃是加工條件的設定，其中包括充填時間或射出時間、射出壓力和保壓壓力大小、溫度、模溫等。並且配合利用 MPI 模擬其流動狀況，並與實驗作驗證，以驗證分析軟體之準確性。本研究實驗主要以探討不同保壓壓力及保壓時間對不同厚度的產品的影響作為設計實驗的重點。

5-2 實驗結果

實驗主要分為兩部分進行，由於材料的特性不同，因此在實驗中選定兩種材料：PC、PMMA，分別對其成型品做不同之量測，一部分為殘留應力之量測，另一部分則為收縮的量測。

5-2-1 收縮率量測方面

在收縮率的觀測方面，主要選用的材料為 PMMA，主要的成型品有 4mm，6mm，8mm 等三種厚度，並對其不同保壓壓力及保壓時間所得到之成型品以電子秤量測其重量，並與各組中未保壓之成型品的重量作一比較，以觀測保壓壓力大小及保壓時間長短對收縮之改善情形。其量測結果如表 5-1。並且由圖 5-1、圖 5-2、圖 5-3 三張不同厚度的趨勢圖中可發現，保壓壓力愈大在厚度愈厚的厚件產品中所能

改善的趨勢愈明顯，也就是說其收縮率比起其他厚度較小的厚件產品來的大。並且可以發現，保壓壓力一定值，且在固定厚度下時，保壓時間愈久，其保壓效果趨於和緩。因此我們將其在各個不同厚度的實際值 & 分析值之收縮率做一比較，如圖 5-4 5-6 所示。

由圖 5-4 圖 5-6 中，可以發現不論實際與分析，收縮率在厚度愈厚的成型品之收縮率愈大。而在數值的差異上，主要的原因應該在於分析軟體中的機台設定與實際機台無法完全相同，並且由於在分析上對於分析模型有所簡略，如圖 5-7 所示，因而造成在成品重量上與收縮率上之數值有所差異。但不論如何，其趨勢仍然是相同。

5-2-2 殘留應力量測方面

在殘留應力量測方面，主要選用的材料為 PC，由於 PC 本身的流動性相當良好，因此其厚件成品所呈現的殘留應力現象會較其他材料來的明顯。

利用相同的模具及與量測收縮率之相同保壓參數，以得到相同厚度之成型品，並對其成型品以光彈量測。其得到的結果如圖 5-8~圖 5-16 所示。其主要的比較為在等一厚度下，對相同保壓壓力不同保壓時間作一殘留應力現象之比較，從圖 5-17~圖 5-26 中可以看出，厚度增加時，相同的保壓條件，在厚度大的成型品更加明顯。

5-3 分析結果

利用已完成的實驗數據 代入分析軟體 MPI 中，將其分析結果與實際機台試驗的成型品及所觀測到的現象作一趨勢的比較。並進而探討其分析之準確性。

5-3-1 收縮率之分析結果

由分析軟體 MPI 所分析得到之結果，也就是成品之重量，與實際所量測之重量值相近並由圖 5-1~圖 5-3 可以得知，分析所得之趨勢圖與實際相近。其中實際值與模擬所得的值有所差異，主要是分析之模型將實際成型品的一部份省略所造成的，如圖 5-7 所示。

5-3-2 殘留應力之分析結果

在分析軟體中不同厚度與不同保壓壓力、保壓時間並無法準確的顯示出其分佈情形，原因在於光彈所得之雙折射率差值之圖，雖說可判定殘留應力的分佈狀況，但仍需經轉換才可得實際殘留應力，而 MPI 所得之殘留應力圖為由公模面一直到母模面之間之殘留應力分佈，因此兩種所得的圖大不相同；但由分析軟體 MPI 所得之分析結果取其中兩組保壓壓力相同保壓時間相同之組別，如圖 5-27、圖 5-28 所示，則由圖中可以得知：在分析中，PMMA 之成型品的殘留應力最大值較 PC 之成型品的殘留應力值小的許多，與實際之比較也可得

相同之結果。



表 5-1 成型品之重量表 & 收縮率 (實際值 & 分析值)

材質	厚度	條件 (保壓壓力、時間)	重量(g)	相差克數 (g)	收縮率 (%)	模擬之重 量(g)	
PMMA	4mm	未保壓	19.702			19.1681	
		50.7 MPa 5sec	20.3	0.598	3.04%	19.6007	
		50.7 MPa 10sec	20.516	0.814	4.13%	19.6256	
			50.7 MPa 15sec	20.57	0.868	4.41%	19.6408
			84.5 MPa 5sec	20.414	0.712	3.61%	19.7837
			84.5 MPa 10sec	20.9	1.198	6.08%	19.8546
			84.5 MPa 15sec	20.972	1.27	6.45%	19.8943
			118.3 MPa 5sec	20.498	0.796	4.04%	19.8042
			118.3 MPa 10sec	20.99	1.288	6.54%	19.914
			118.3 MPa 15sec	21.384	1.682	8.54%	20.0
		6mm	未保壓	26.653			26.2511
			50.7 MPa 5sec	27.318	0.665	2.50%	26.6037
			50.7 MPa 10sec	27.556	0.903	4.58%	26.6635
			50.7 MPa 15sec	27.69	1.037	3.89%	26.6887
			84.5 MPa 5sec	27.448	0.795	2.98%	26.7733
		84.5 MPa 10sec	27.962	1.309	4.91%	26.8591	
		84.5 MPa 15sec	28.154	1.501	5.63%	26.9145	
		118.3 MPa 5sec	27.492	0.839	3.15%	26.7911	
		118.3 MPa 10sec	28.096	1.443	5.41%	26.9193	
		118.3 MPa 15sec	28.52	1.867	7.00%	27.4157	
	8mm	未保壓	33.79			33.2789	
		50.7 MPa 5sec	34.504	0.714	2.11%	33.6166	
		50.7 MPa 10sec	34.9	1.11	3.28%	33.6612	
		50.7 MPa 15sec	34.908	1.118	3.31%	33.6881	
		84.5 MPa 5sec	34.61	0.82	2.43%	33.7771	
		84.5 MPa 10sec	35.22	1.43	4.23%	33.8708	
		84.5 MPa 15sec	35.532	1.742	5.16%	33.9439	
		118.3 MPa 5sec	34.618	0.828	2.45%	33.7934	
		118.3 MPa 10sec	35.278	1.488	4.40%	33.9196	
		118.3 MPa 15sec	36.016	2.226	6.59%	34.2577	

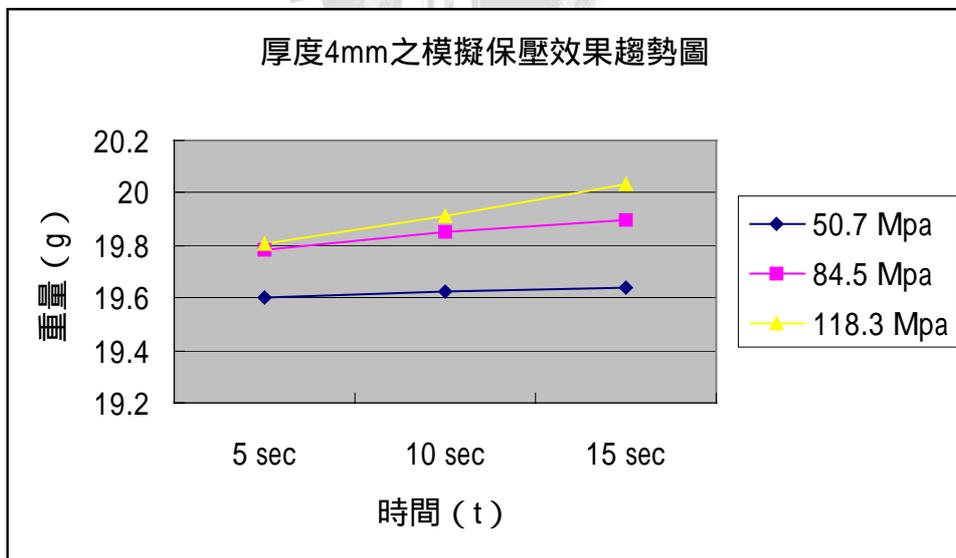
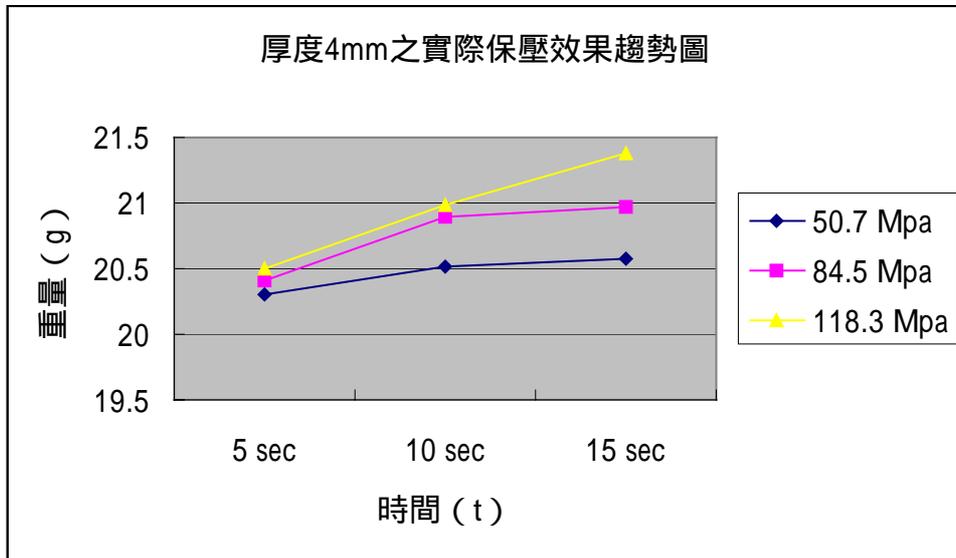


圖 5-1 厚度 4mm 之保壓效果趨勢圖 (實際值 & 分析值)

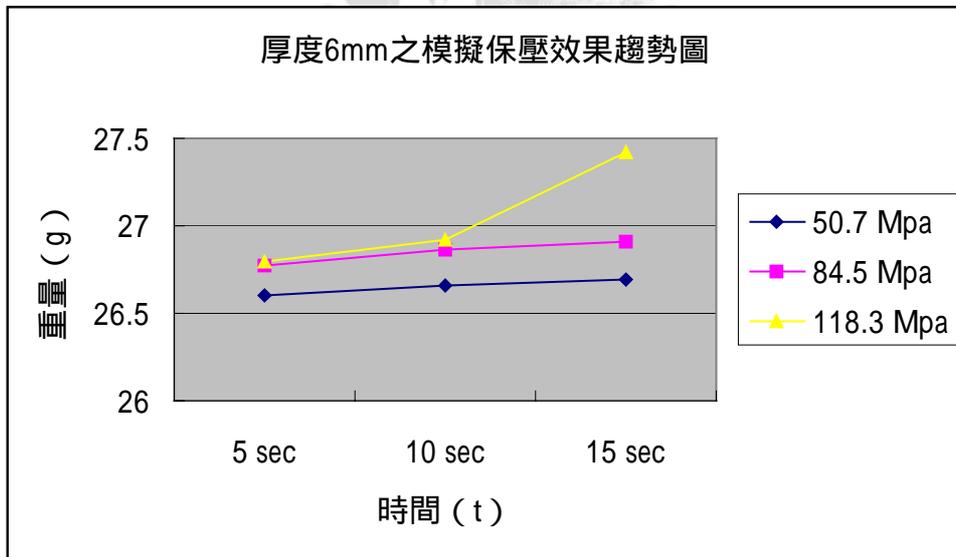
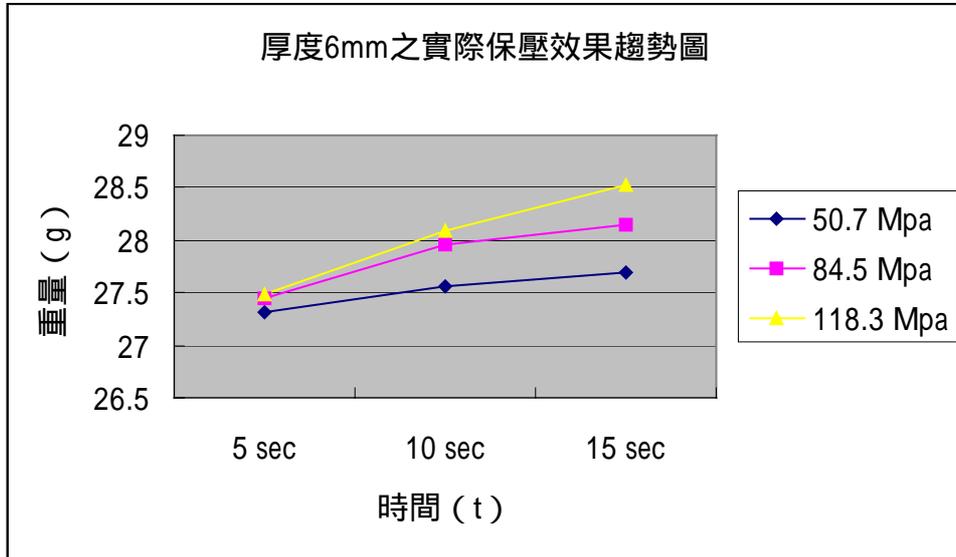


圖 5-2 厚度 6mm 之保壓效果趨勢圖 (實際值 & 分析值)

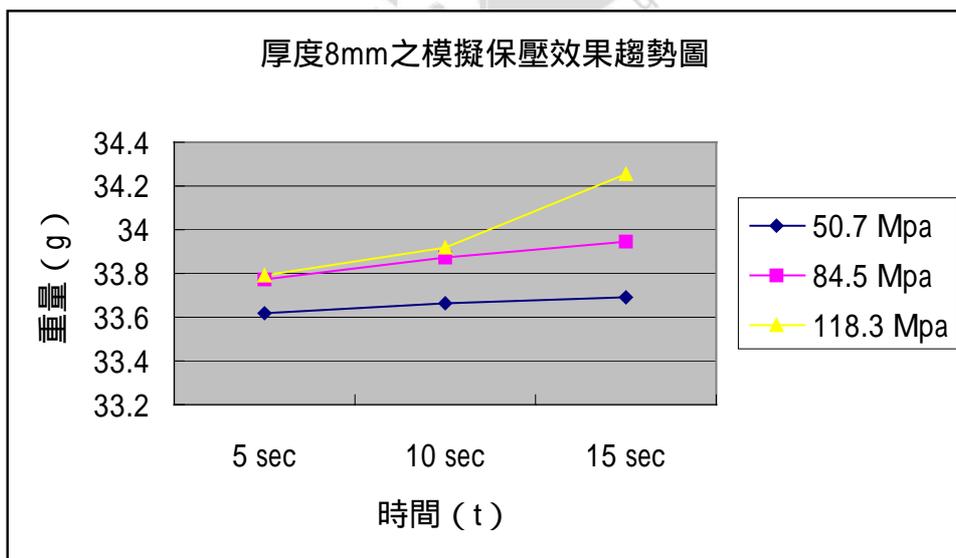
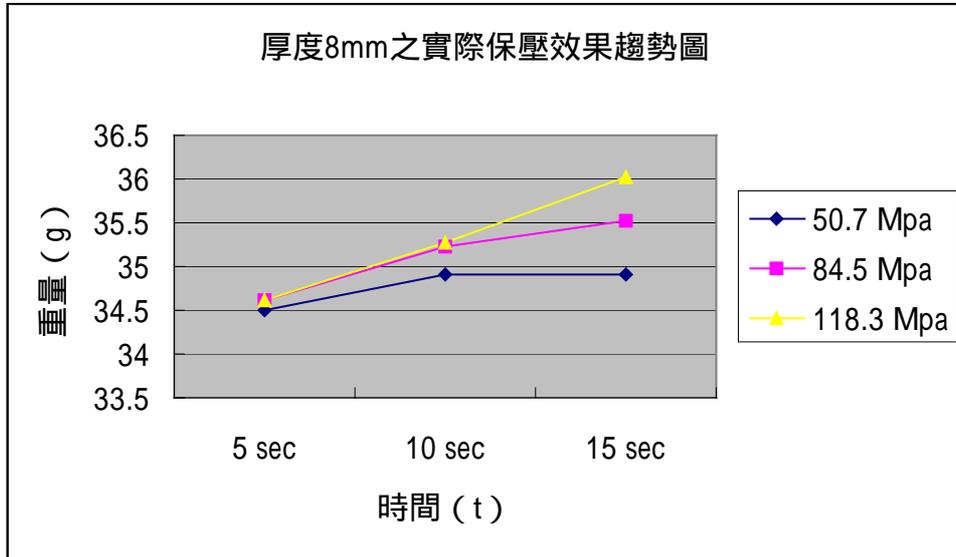


圖 5-3 厚度 8mm 之保壓效果趨勢圖 (實際值 & 分析值)

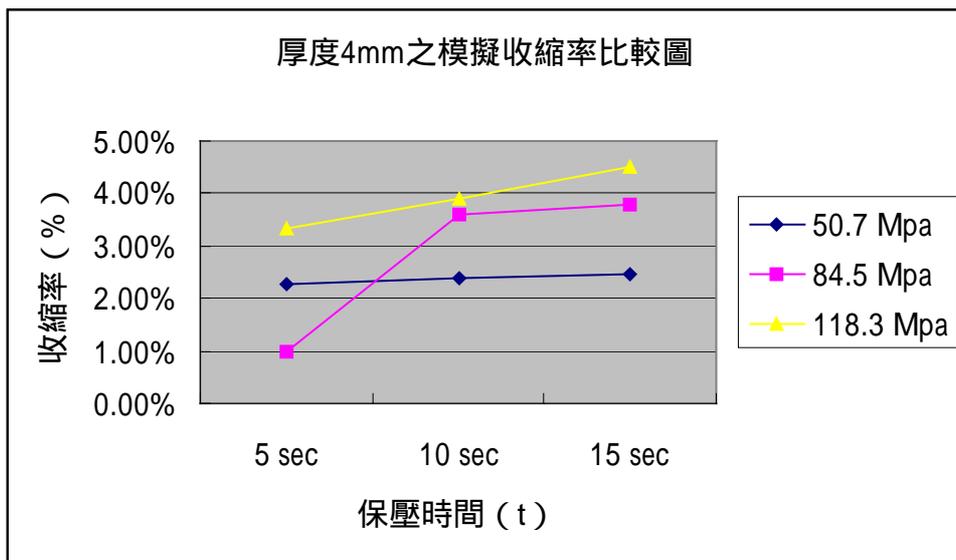
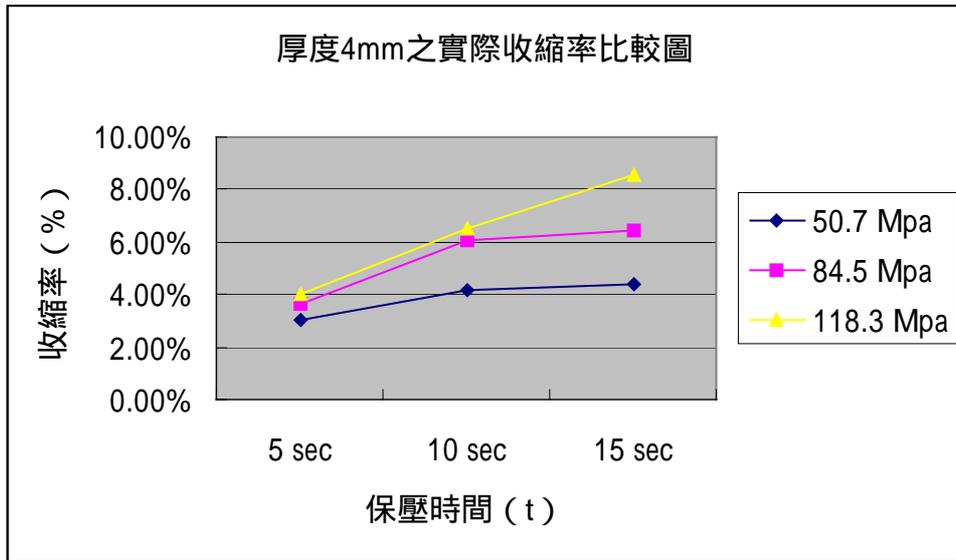


圖 5-4 厚度 4mm 之收縮率比較圖 (實際值 & 分析值)

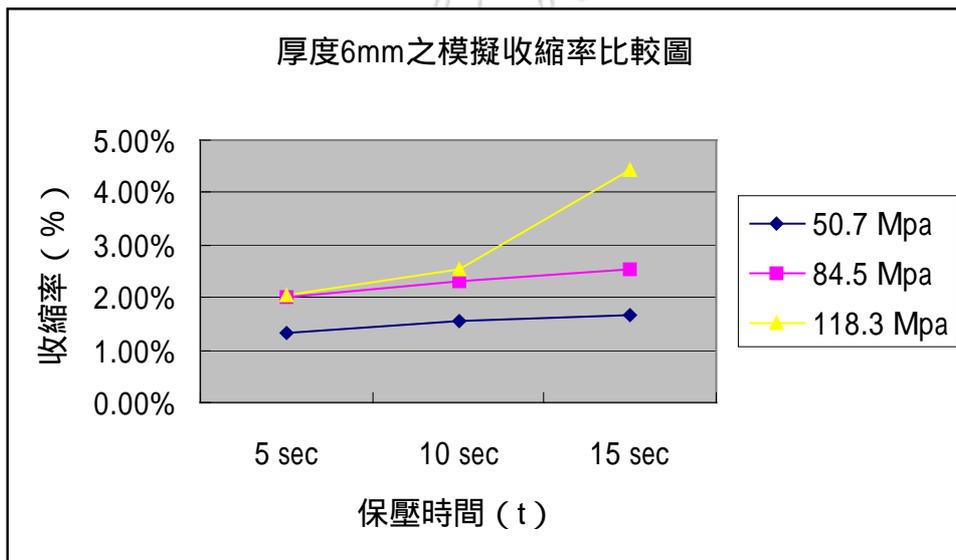
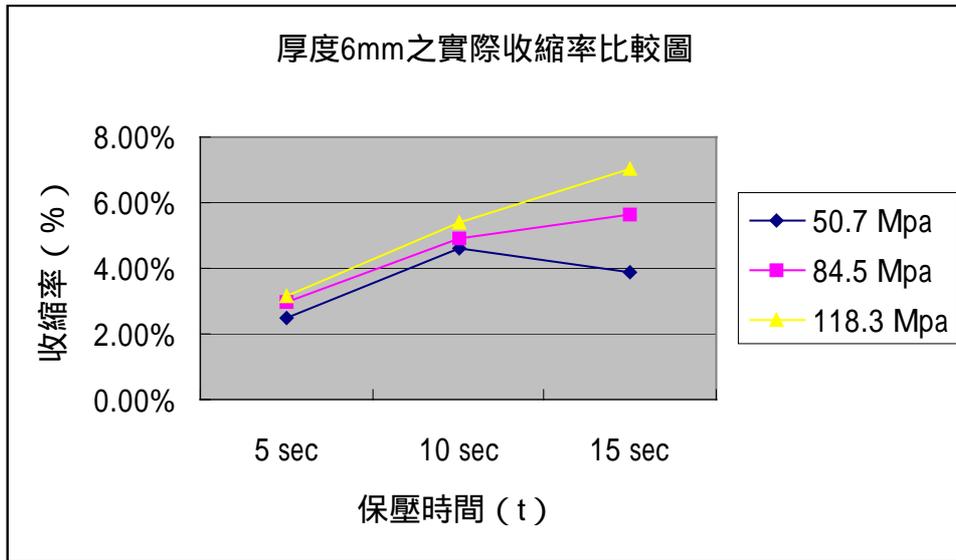


圖 5-5 厚度 6mm 之收縮率比較圖 (實際值 & 分析值)

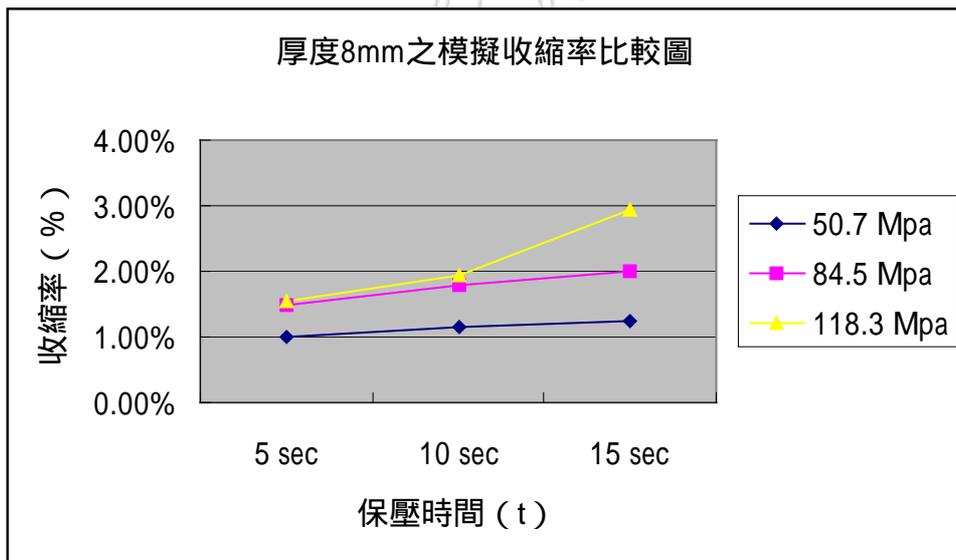
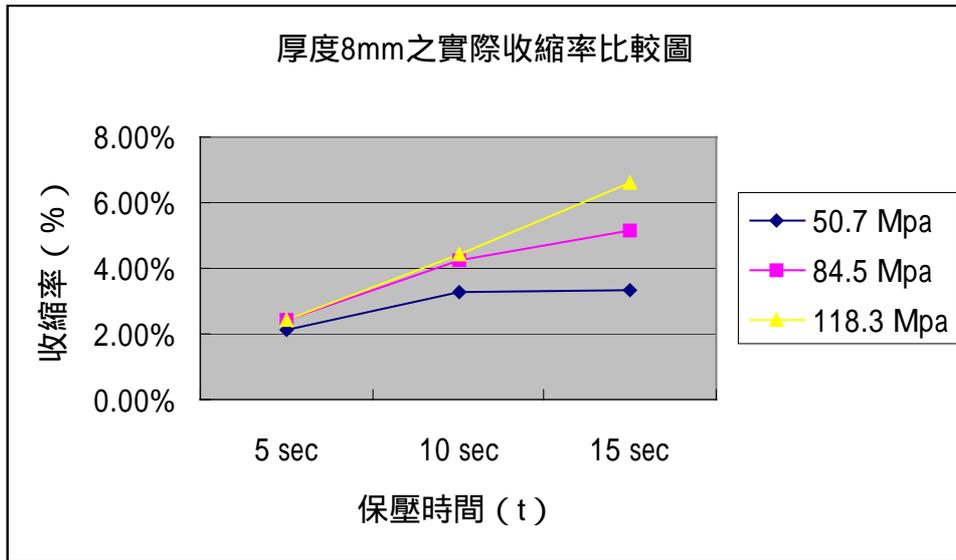
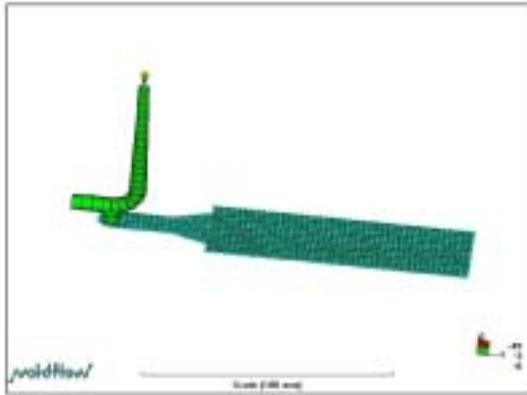


圖 5-6 厚度 8mm 之收縮率比較圖 (實際值 & 分析值)



分析模型



實際模型

圖 5-7 分析模型與實際成型品之比較圖

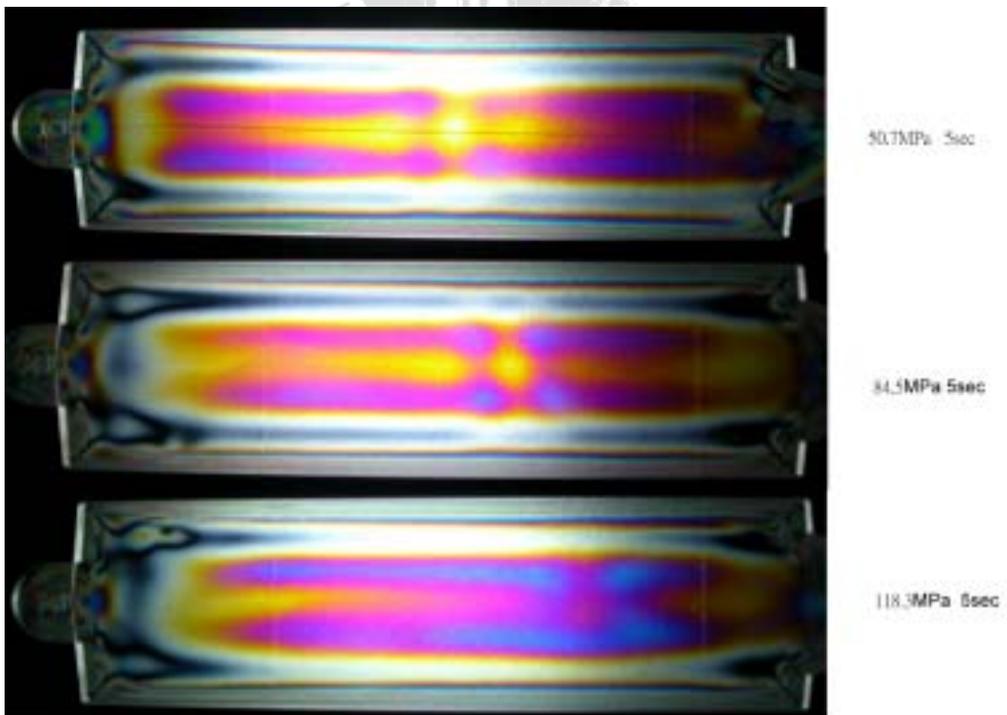


圖 5-8 厚度 4mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(1)

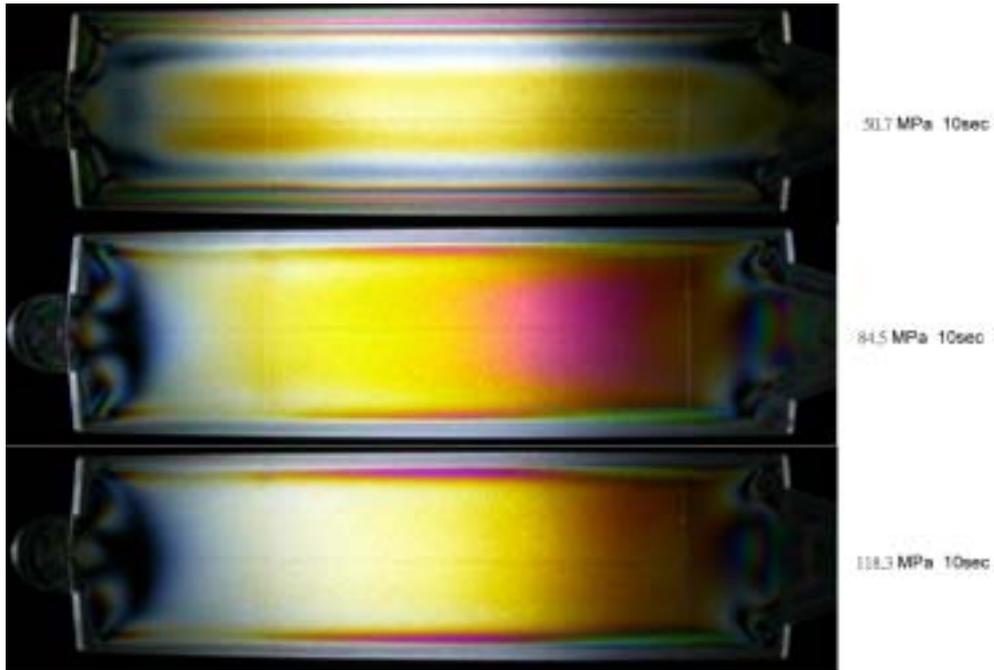


圖 5-9 厚度 4mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(2)

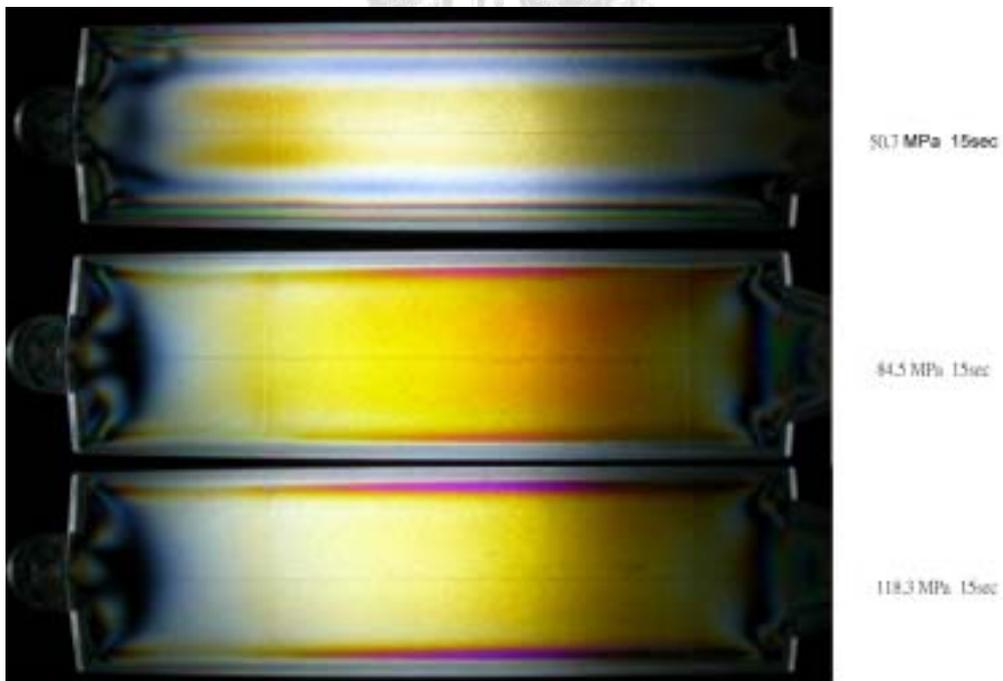


圖 5-10 厚度 4mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(3)

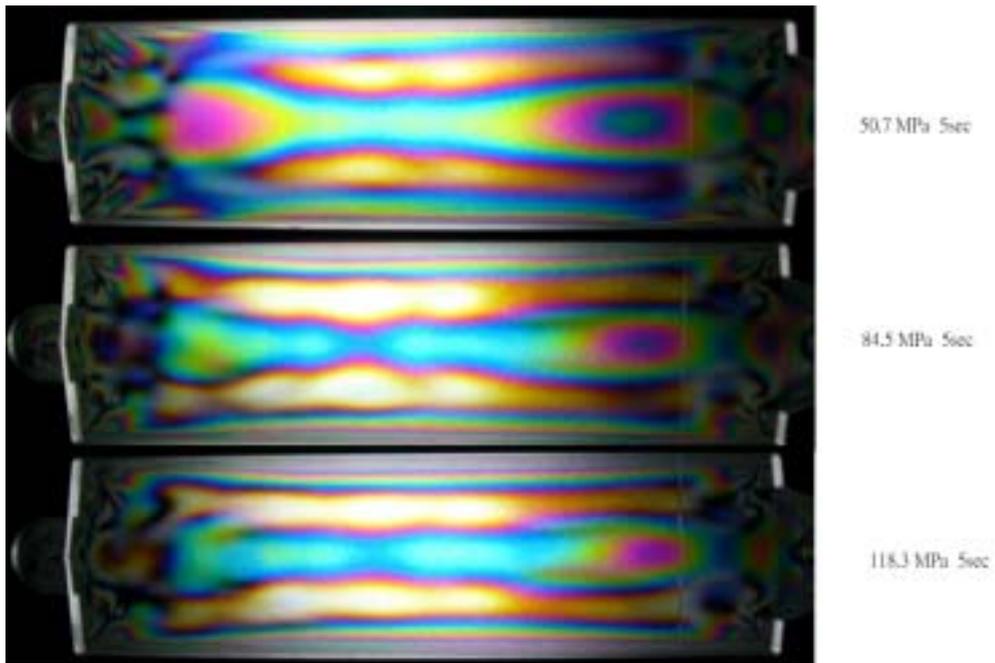


圖 5-11 厚度 6mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(1)

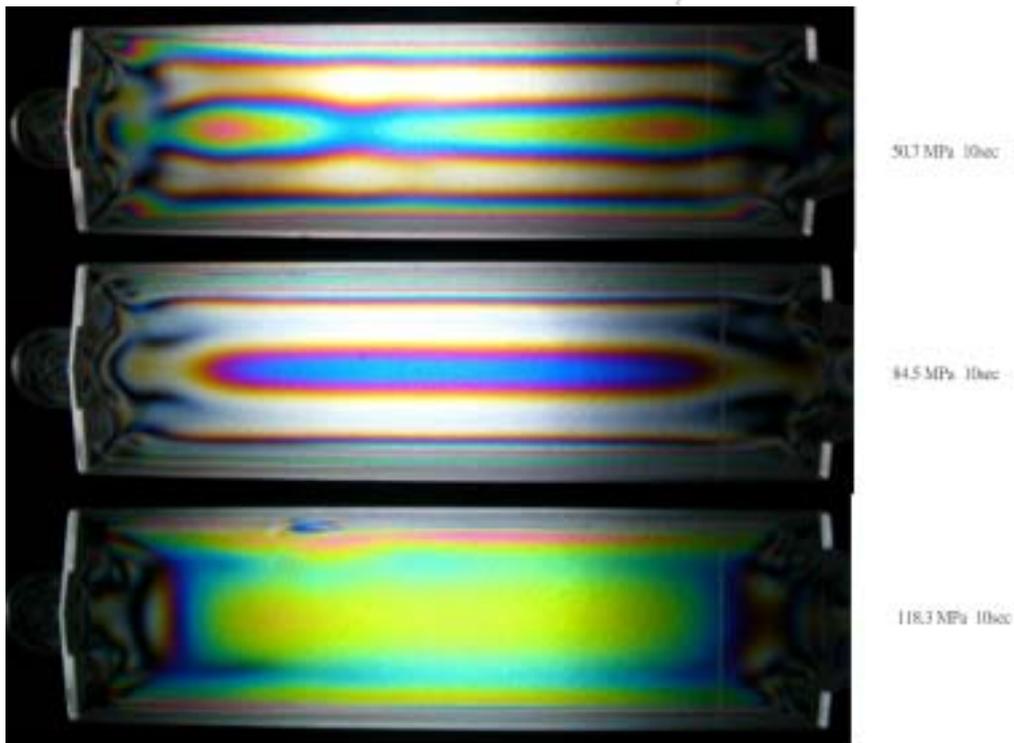


圖 5-12 厚度 6mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(2)

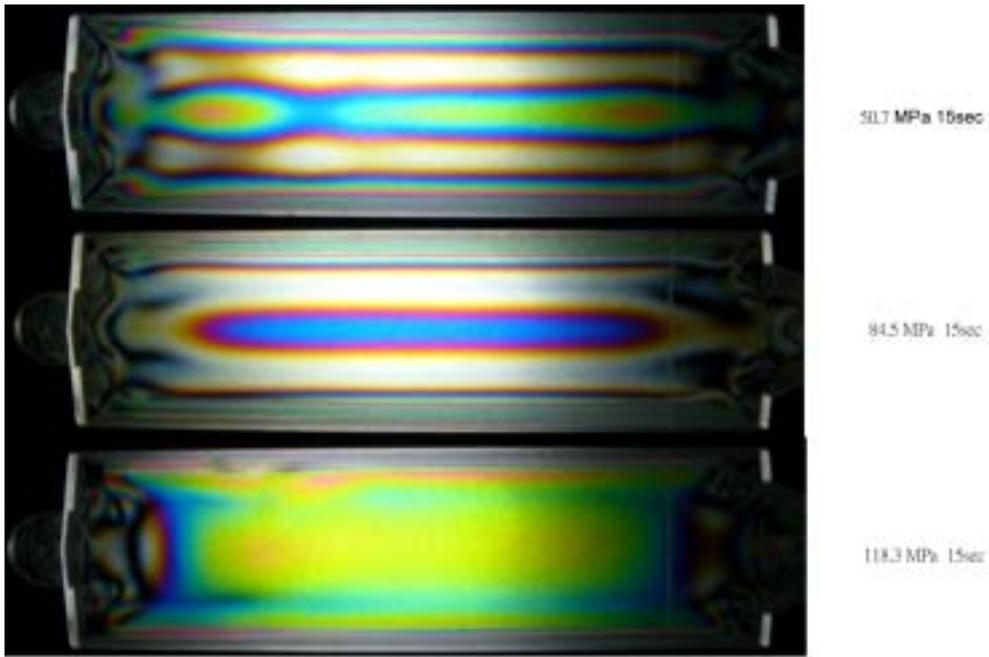


圖 5-13 厚度 6mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(3)

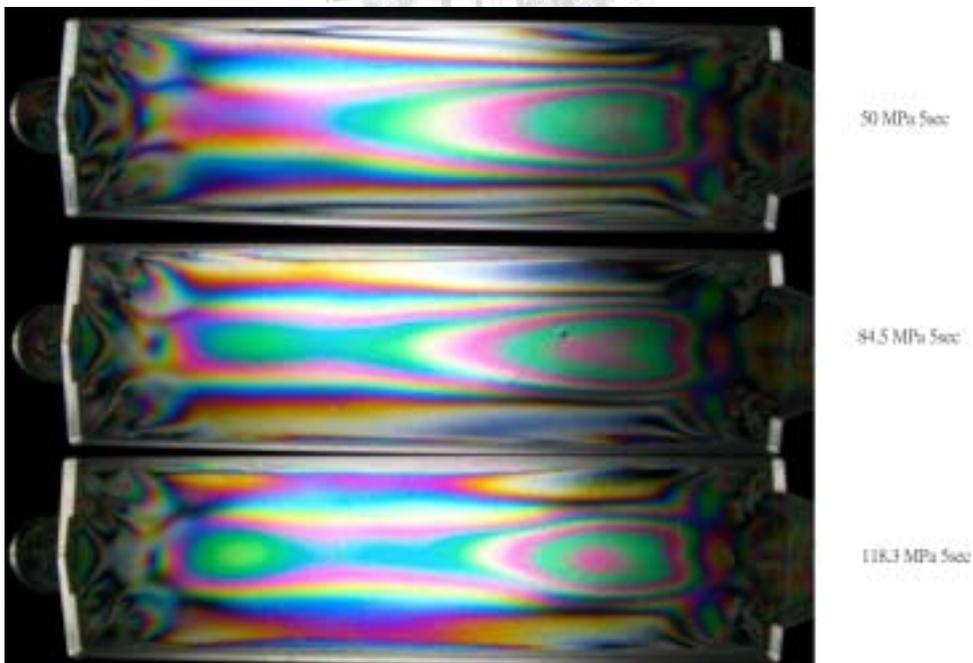


圖 5-14 厚度 8mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(1)

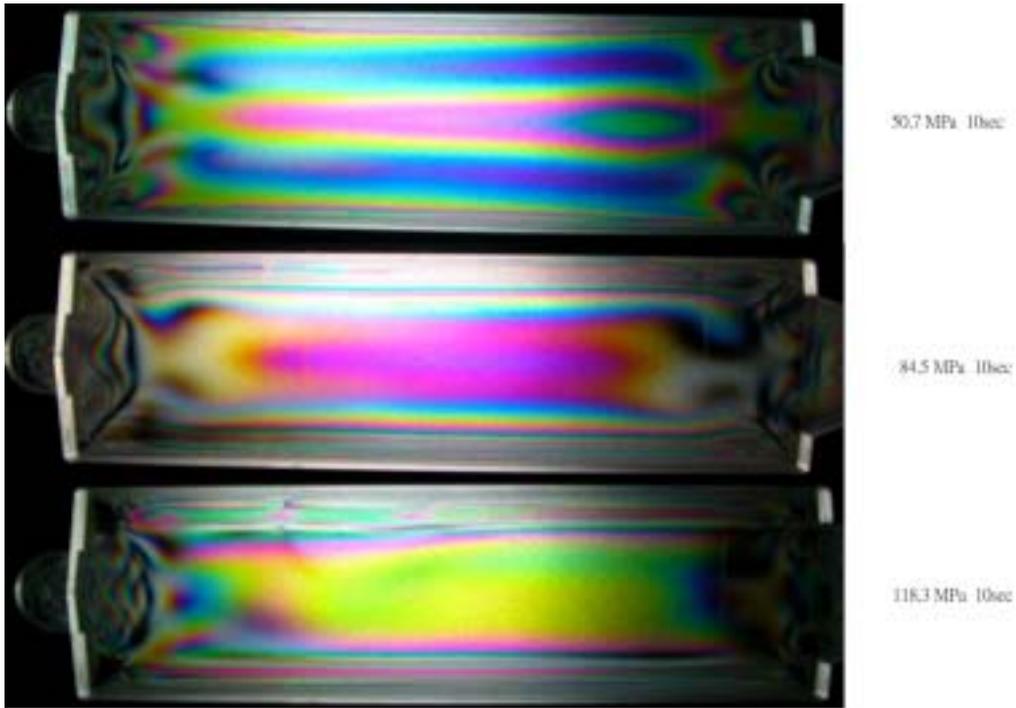


圖 5-15 厚度 8mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(2)

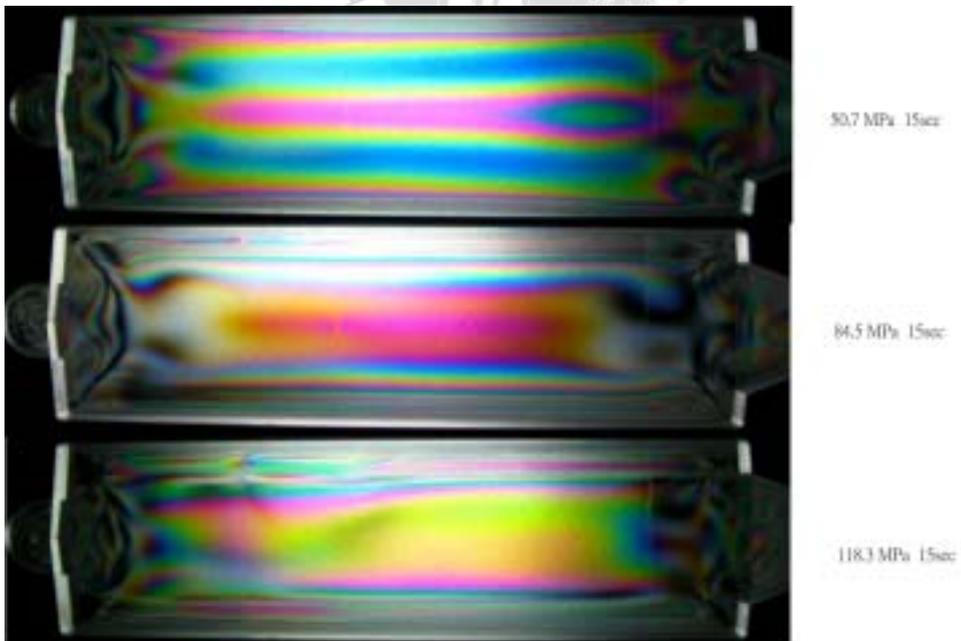


圖 5-16 厚度 8mm 之相同保壓時間不同保壓壓力之光彈比較圖(3)

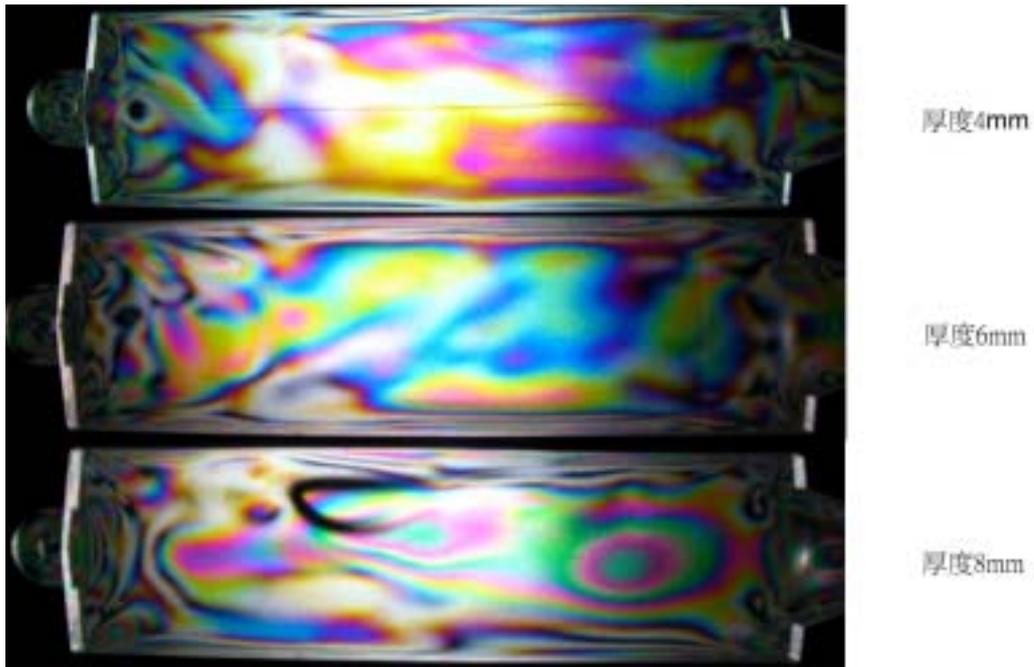


圖 5-17 未保壓之三種厚度殘留應力比較

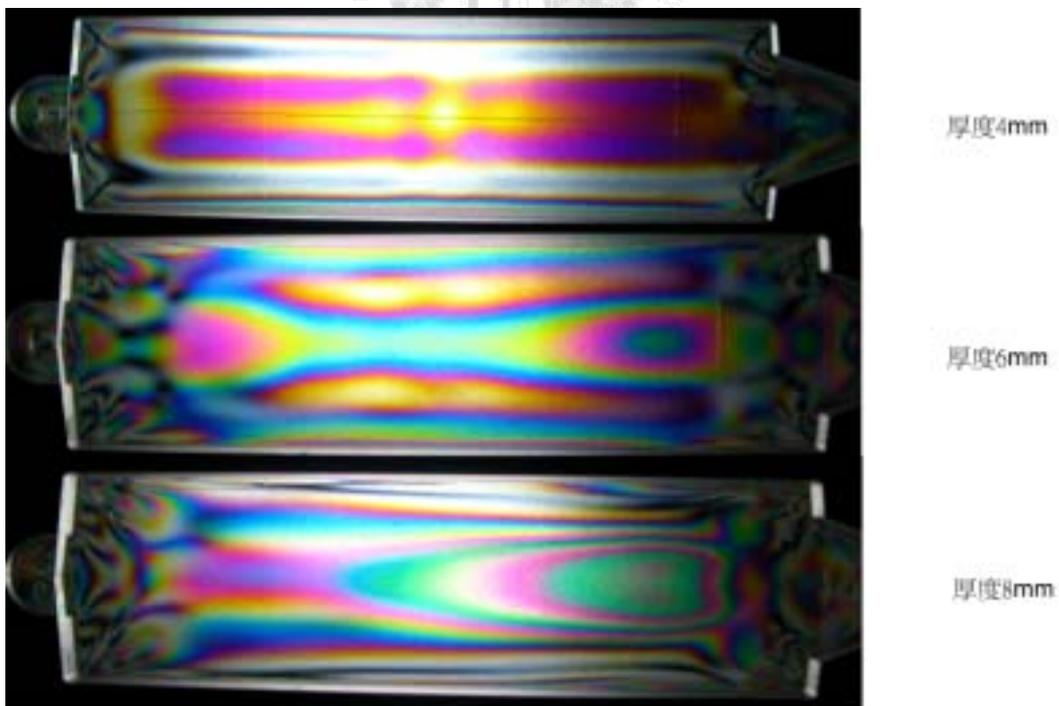


圖 5-18 相同保壓條件 (50.7 MPa 5sec) 之三種厚度殘留應力比較

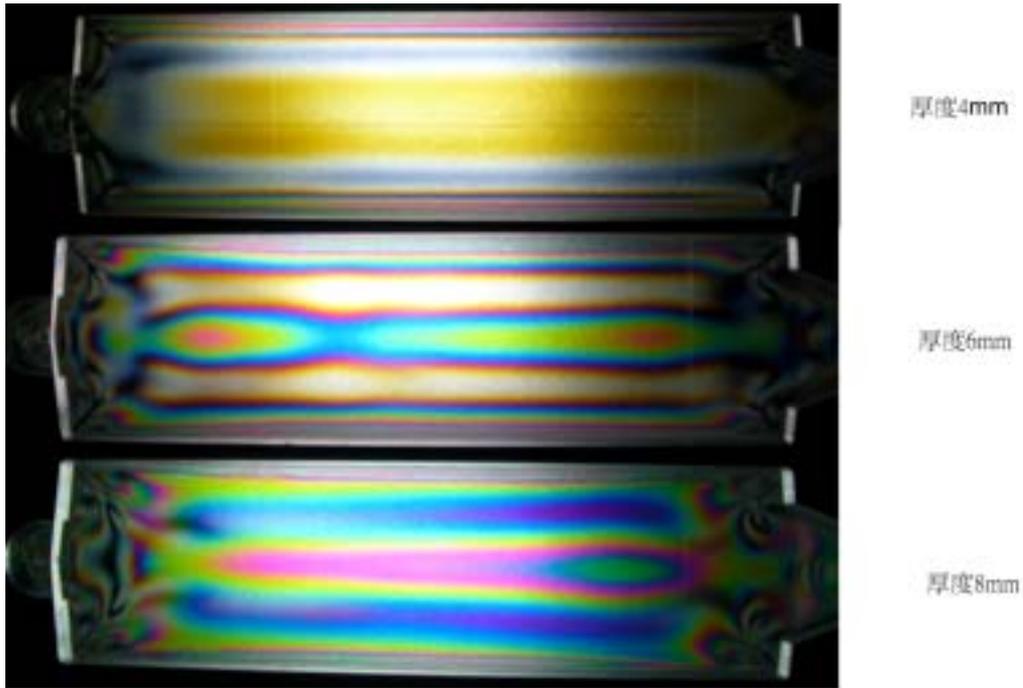


圖 5-19 相同保壓條件 (50.7 MPa 10sec) 之三種厚度殘留應力比較

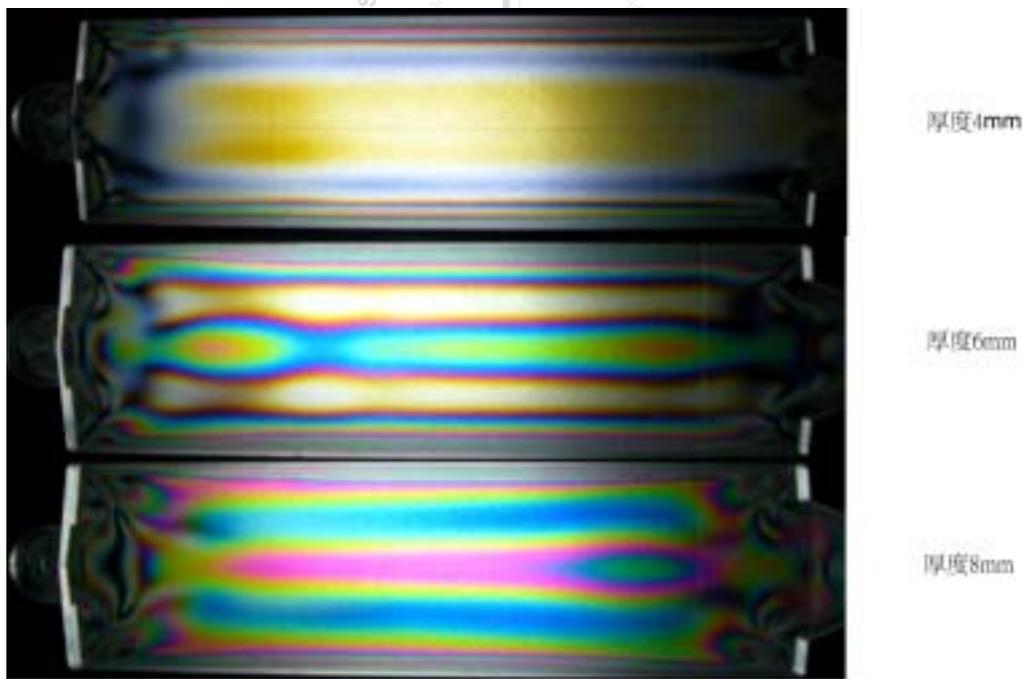


圖 5-20 相同保壓條件 (50.7 MPa 15sec) 之三種厚度殘留應力比較

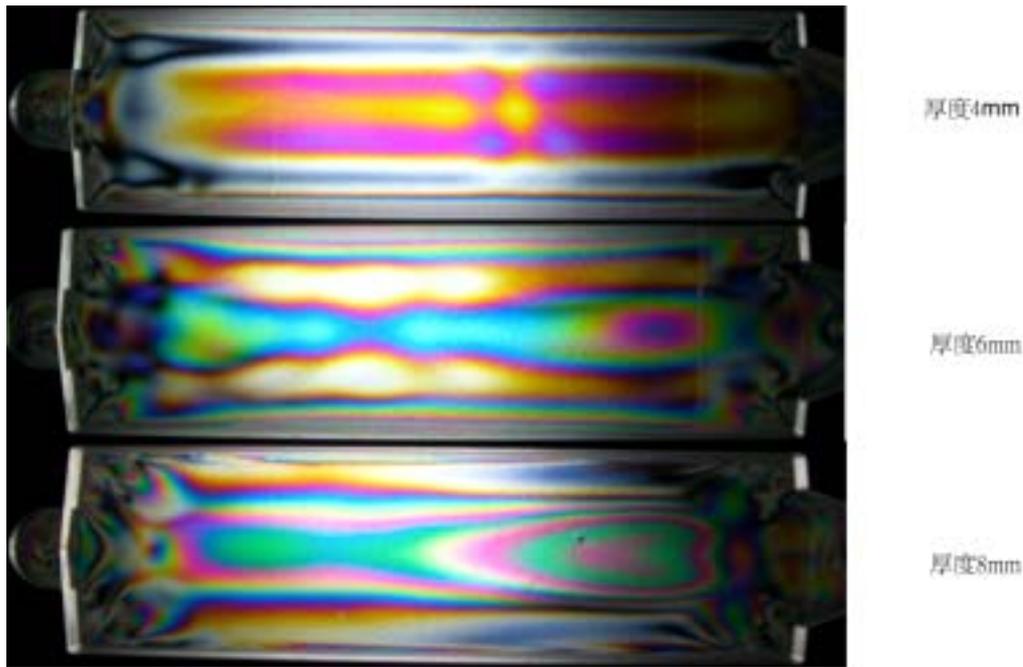


圖 5-21 相同保壓條件 (84.5 MPa 5sec) 之三種厚度殘留應力比較

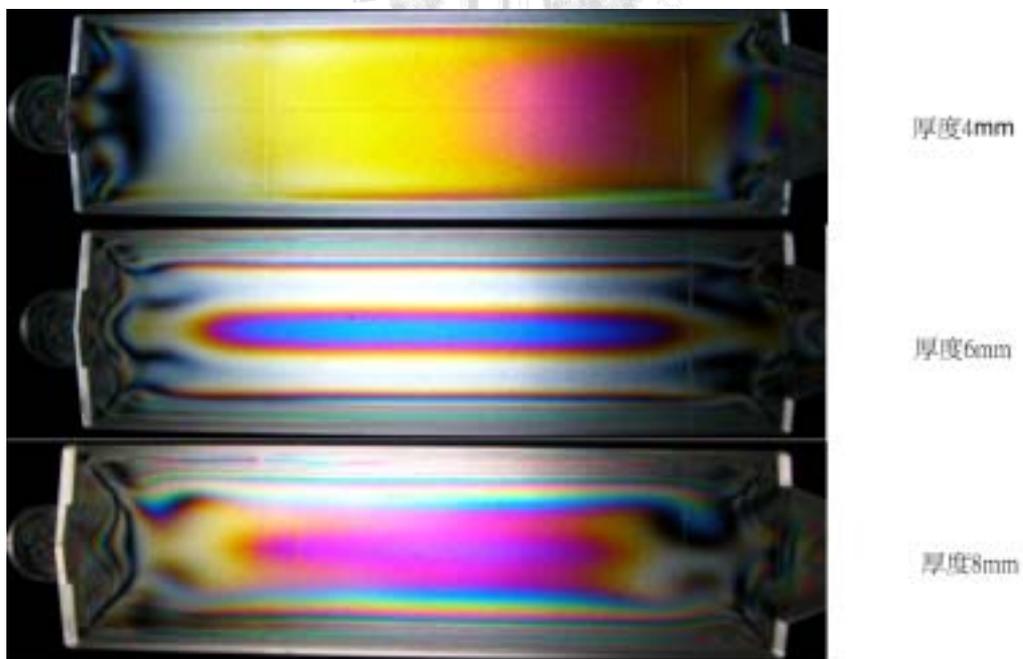


圖 5-22 相同保壓條件 (84.5 MPa 10sec) 之三種厚度殘留應力比較

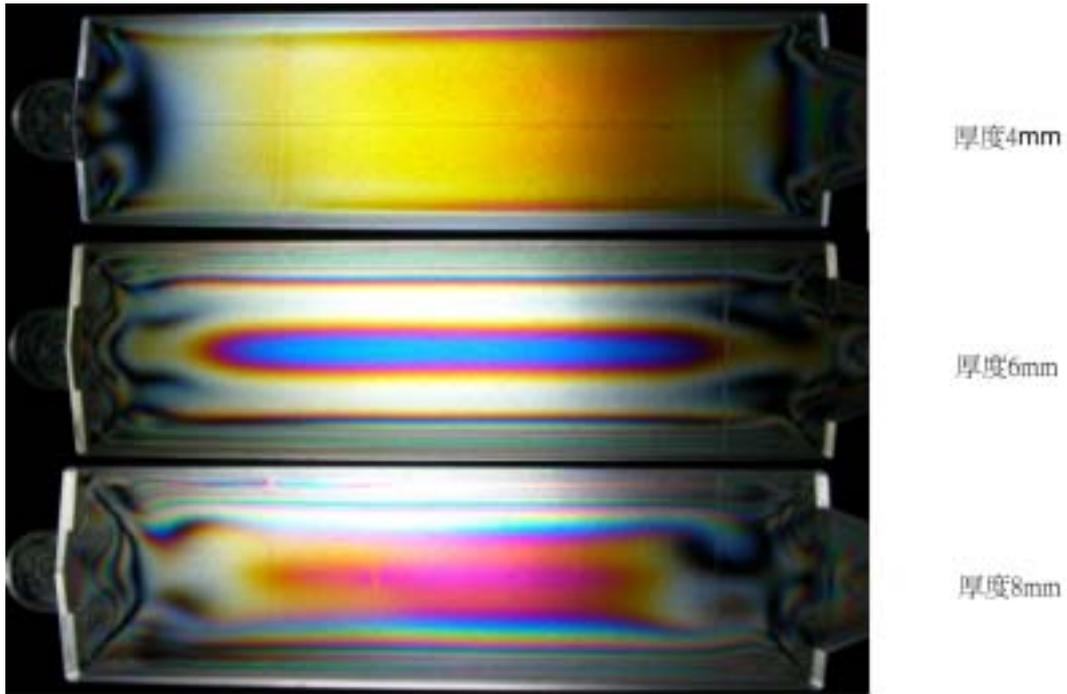


圖 5-23 相同保壓條件 (84.5 MPa 15sec) 之三種厚度殘留應力比較

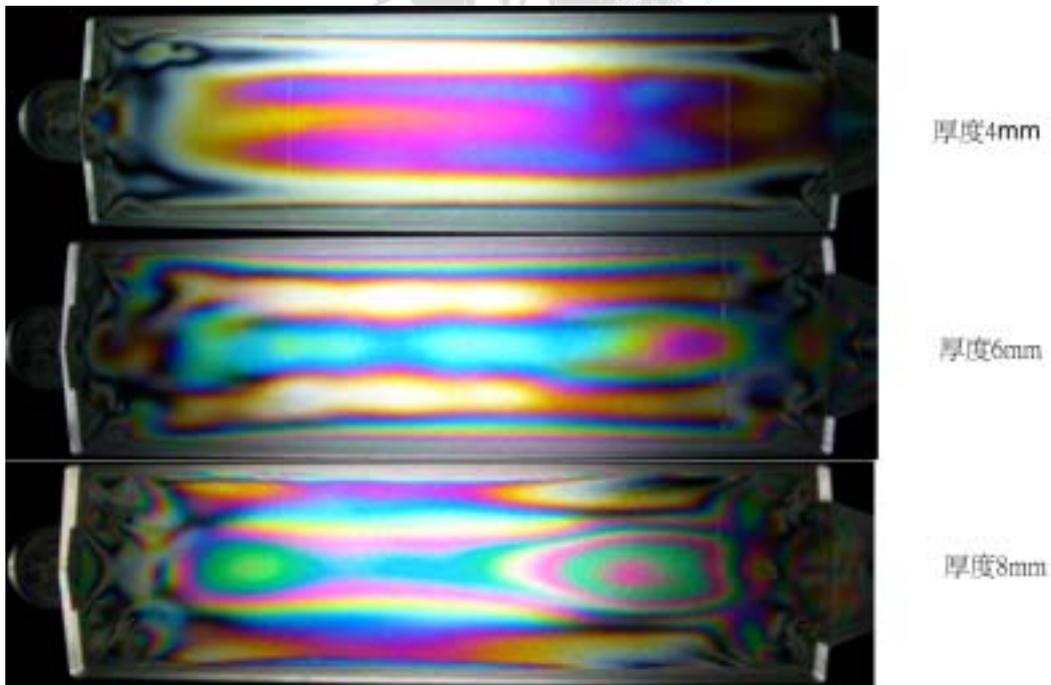


圖 5-24 相同保壓條件 (118.3 MPa 5sec) 之三種厚度殘留應力比較

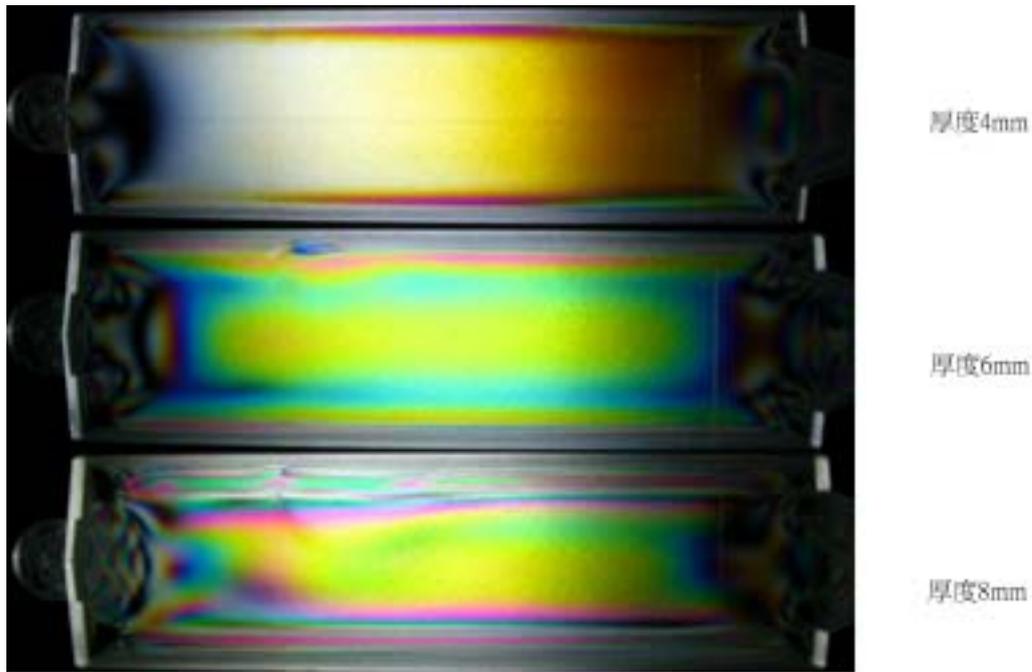


圖 5-25 相同保壓條件 (118.3 MPa 10sec) 之三種厚度殘留應力比較

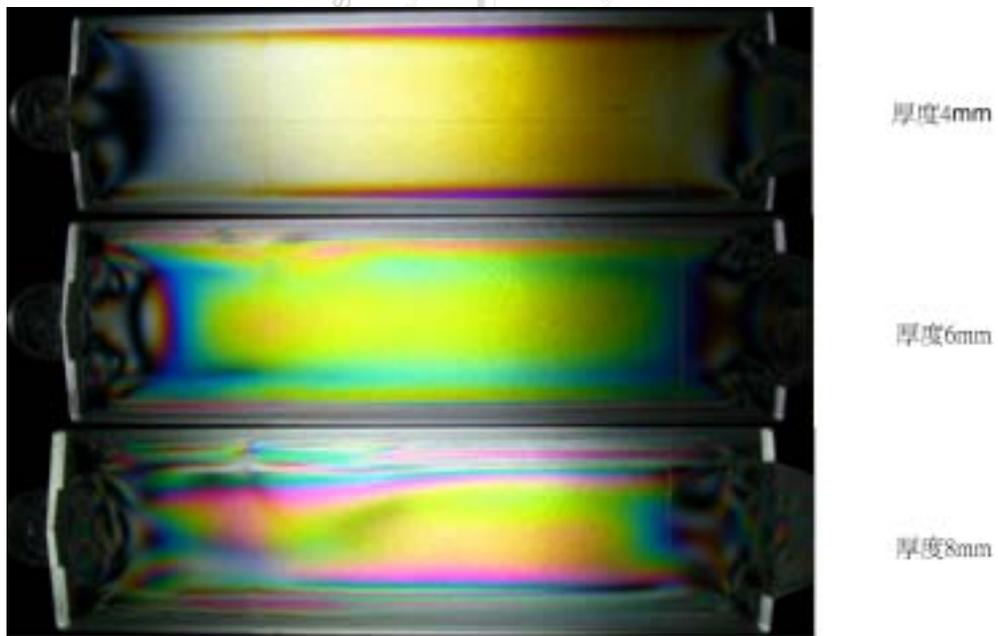


圖 5-26 相同保壓條件 (118.3 MPa 15sec) 之三種厚度殘留應力比較

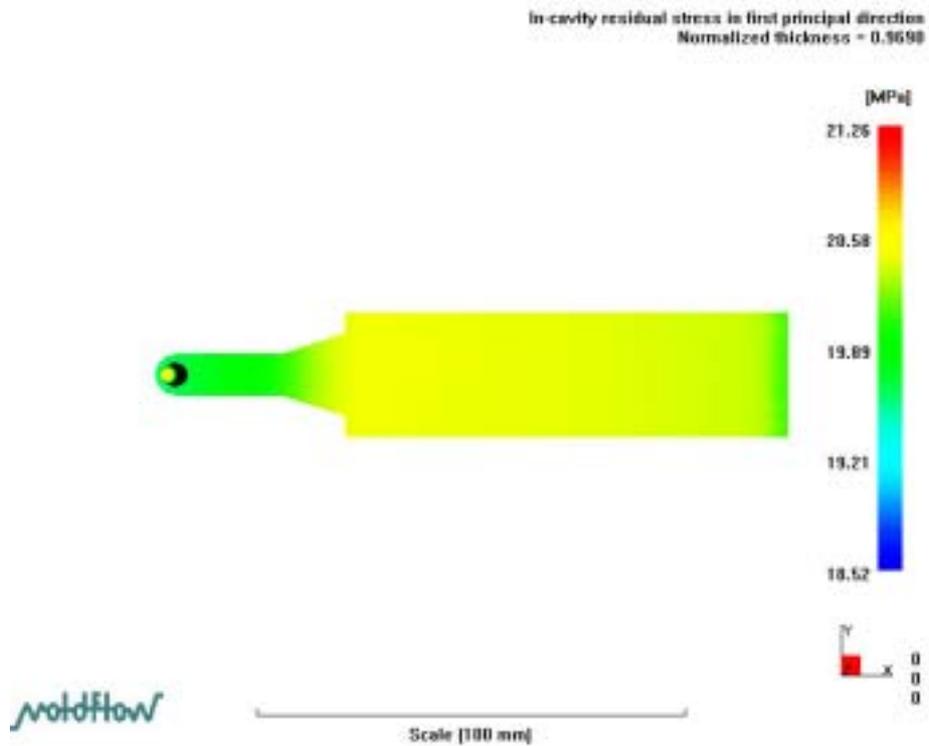


圖 5-27 CAE 所得之殘留應力分佈圖(PMMA,厚度 6mm,50.7 MPa ,5sec)

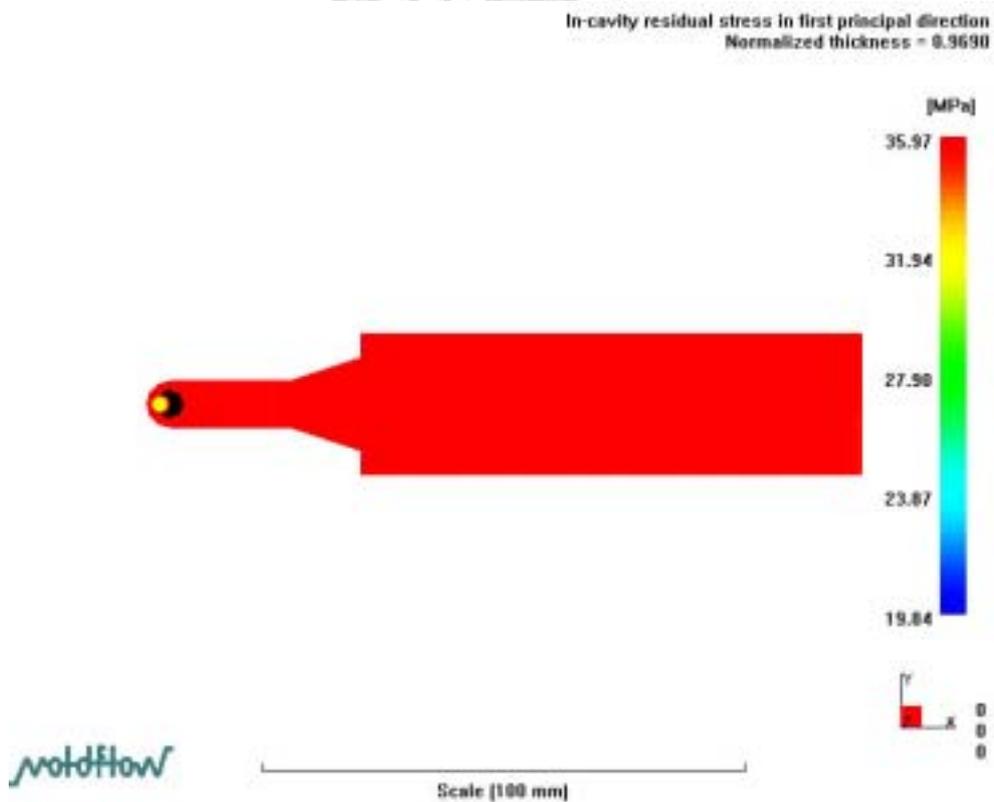


圖 5-28 CAE 所得之殘留應力分佈圖(PC,厚度 6mm, 50.7 MPa,5sec)

第六章 結論及未來發展

6-1 結論

在本研究中，利用一可變換厚度之試驗模具以探討不同的保壓壓力、保壓時間對不同厚度的厚件產品之殘留應力、收縮率之影響。由此研究中可得到以下幾點結論：

1. 透過改變不同的保壓壓力，維持相同保壓時間的前提下，在不同厚度的厚件成型品之殘留應力改善情形上，我們可由光彈圖上明顯的發現原先應力集中的現象，由於保壓壓力的逐漸增加，可得知保壓壓力將厚件內的收縮情形大大的改善，而使得在厚件內部經由光彈所見的雙折射率之現象，以獲得改善。
2. 在相同的保壓壓力下，對於相同厚度的成型品，可以發現當保壓時間由 5 sec 增加 15 sec 到時，成型品的重量與未加保壓的成型品之重量相比，有明顯增加的趨勢。
3. 在同一厚度下，透過將保壓壓力由 50.7 MPa 增加到 118.3 MPa，並且維持相同保壓時間時，光彈圖上我們可以發現，殘留應力的分佈趨勢與分析軟體 MPI 所分析的殘留應力趨勢相差甚遠。
4. 在改善收縮方面，由分析軟體 MPI 分析所得的重量值以及實際成型品所得之實際重量，誤差值約在 3% ~ 5% 左右，因此在改善收縮

方面，分析軟體 MPI 的準確性仍是相當高的。

5. 由分析軟體的分析結果可得，兩種材料—PMMA、PC，所得到之成型品的殘留應力與實際實驗所得之成型品，其殘留應力趨勢相符，也就是 PMMA 成型品的殘留應力較 PC 成型品的殘留應力小的許多（ $21.26 \text{ MPa} < 35.97 \text{ MPa}$ ）。

6-2 未來發展與展望

1. 在本研究中所使用的材料主要為 PMMA 及 PC 兩種，並未對大多數的塑料進行探討，如 PS 等。未來應當對其他塑料更進一步的探討保壓對其之成型性以獲得更完整的數據。
2. 殘留應力之量測目前只進行圖像方面之量測，並未有實際數值，在與分析軟體的比較上，不免有點可惜。而在分析軟體方面，由於所得之分析圖形，與實際成型品之光彈圖不甚相同，因此在軟體的殘留應力理論部分應仍是沿用熱殘留應力遠大於流動殘留應力之理論，因此在 CAE 的殘留應力的理論部分仍有所應加強的地方。

參考文獻

1. Furong Gao, Xi Chen, "Setting of Injection Molding Packing Profile", 2002.
2. Xi Chen, PhD Thesis, Hong Kong University of Science and Technology, 2002.
3. Xi Chen, F. Gao, "Influences of Packing Profiles on Part Quality", Submitted to Polym. Eng & Sci, 2002.
4. A. Kuske and G. Robertson, "Photoelastic Stress Analysis", New York, 1978.
5. Y. T. Koita, "Packing and Discharge in Injection Molding", Polym. Eng. & Sci., Vol. 14, p.840-844, 1974.
6. H. J. Kriegel, "Polymer Melt Rheology and Flow Birefringence", Berlin Heidelberg, New York, 1983.
7. K. Yoon and K. K. Wang, "The Effect of Holding Pressure on Frozen-in Birefringence in Injection Molding Disks", S.P.E. Technical Paper, Vol. 38, p. 2221-2224, 1992.
8. K. Yoon and K. K. Wang, "Birefringence Measurements of Injection Molded Disks", S.P.E. Technical Paper, Vol. 37, p. 333, 1991.
9. K. H. Huebner and E. A. Thornton, The Finite Element Method for Engineers, Chap. 4 & 5, John Wiley & Sons, New York, 1982.
10. V. W. Wang, C. A. Hieber and K. K. Wang, "Dynamic Simulation and Graphics for the Injection Molding of Three-Dimensional Thin Parts", J. Polym. Eng., Vol. 7, p. 21-45, 1986.
11. S. C. Chen, P. Pai and C. Hsu, "A Study of finite Element Mold Filling Analysis in Application", S.P.E. Technical Papers, Vol. 34, p. 250-254, 1988.
12. C. Hsu, K. F., "Numerical Simulations of Multi-Component Injection Molding Process", Master Thesis, Chung Yuan University, Taiwan, 1994.

- 13.L. R. Schmidt, "A Special Mold and Tracer Technique for Studying Shear and Extensional Flows in a Mold Cavity During Injection Molding," *Polym. Eng. Sci.*, 14, 797, 1974.
- 14.D. J. Coyle, J. W. Blake and C. W. Macosko, "The Kinematics of Fountain Flow in Mold-Filling," *AIChE J.*, 33, 1168, 1987.
- 15.E. Vos, E. H. Meijer and G. W. M. Peters, "Multilayer Injection Molding," *Intern. Polym. Proce.*, 6, 42, 1991.
- 16.Y. Yokoi, S. Kamata and T. Kanematsu, "Visual Observation of Three-Dimension Melt Flow Inside a Mold Cavity by Gate-Magnetization Method," *S.P.E., Technical Papers*, 37, 358, 1991.
- 17.Y. Yokoi, Y. Murata and K. Oka, "Visual Analysis of Weld Line Vanishing Process by Glass-Insert Mold," *S.P.E., Technical Papers*, 37, 367, 1991.
- 18.J. White and B. L. Lee, "An Experimental Study of Sandwich Injection Molding of Two Polymer Melts Using Simulations Injection," *Polym. Eng. and Sci.*, 15, 481, 1975.
- 19.R. C. Donovan, K. S. Rabe, W. K Mammel, and H. A. Load, "Recycling Plastics by Two-Shot Molding", *Polym. Eng. Sci.*, 15, 774, 1975.
- 20.S. S. Young, J. L. White, E. S. Clark and Y. Oyanagi, "A Basic Experimental Study of Sandwich Injection with Sequential Injection," *Polym. Eng. and Sci.*, 20, 989, 1980.
- 21.A. I. Isayev, "Injection and Compression Molding Fundamentals," Marcel Dekker Inc., New York, 1989.
- 22.H. H. Chiang, "Simulation and Verification of Filling and Post-filling Stages of the Injection-Molding Process", CIMP Tech. Report, No.62, Cornell Uni., Ithaca, 1989.
- 23.N. T. Cheng, "A Study of the Polymer Melt Compressible Flow and Pressure Development in the Post-filling Stage of Injection

- Molding Process", Master Thesis, Chung Yuan University, Taiwan, June, 1991.
- 24.L. T. Manzione, "Application of Computer Aided Engineering in Injection Molding," Ed. , Hanser Publishers, Munich, 1987 .
 - 25.C. A. Hieber and S. F. Shen, "A Finite-Element/Finite-difference Simulation of the Injection-Molding Filling Process," J. Non-Newtonian Fluid Mech., 7, 1, 1980.
 - 26.C. L. Tucker,(ed.), "Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing," Hanser Publisher, New York, 1989 .
 - 27.L. S. Turng and V. W. Wang , "Simulation of Co-Injection and Gas-Assisted Injection Molding," S.P.E. Tech. paper, 37 , 279, 1991 .
 - 28.L. S. Turng and K. K. Wang, "Numerical Simulation of the Co-Injection Molding Process," ASME J. Eng. Mat. & Tech., 115, 48, 1993.
 - 29.G. W. M. Peter, P. J. L. van der Velden and H. E. H. Meijer, "Multilayer Injection Molding Part 2: Particle tracking in reactive moulding," Intern. Polym. Proc., 9, 258, 1994.
 - 30.E. Escala, "The ICI Sandwich Molding Process, Kunststoffe," 60, 847, 1970.
 - 31.H. Eckardt, "One-step Production of Screened Housing with Good Surface Quality Made Possible by Two-component Injection Molding," Kunststoffe, 75, 145, 1985 .
 - 32.H. Eckardt, "How to Develop a Successful Coinjection Application," 14th Annual Structural Foam Conference, Society of Plastics Industry, April 21-23, Boston, Mass., 22, 1986 .
 - 33.K. R. Kreisher, "Coinjection Molding is Hot Again-with a Lot More Going for it," Modern Plastics International, Mar., 56, 1990.
 - 34.Irvin I Ruibin. Injection Molding theory and Practice, John Wiley & Sons Inc., 1972.

35. G. Titomanlio, S. Piccarolo, and G. Levati, *J. App. Polym. Sci.*, 35, 1483, 1988.
36. D. B. Hunkar, *SPE ANTEC 75*, 161, 1975.
37. T. S. Chung, *Polym. Eng. Sci.*, 25, 772, 1985.
38. K. M. B. Jansen, D. J. Van Dijk, and M. H. Husselman, *Polym. Eng. & Sci.*, 38, 838, 1998.
39. Y. Yang, and F. Gao, *Polym. Eng. & Sci.*, 39, 2042, 1999.
40. Y. Yang, and F. Gao, *Intern. Polym. Proc.*, XIV, 196, 1999.
41. Y. Yang, and F. Gao, *Control Eng. Practices*, 8, 1285, 2000.
42. M. Z. Li, Y. Yang, and F. Gao, *Can. J. Chem. Eng.*, 79, 263, 2001.
43. K. M. B. Jansen, R. Pantani, and G. Titomanlio, *Polym. Eng. & Sci.*, 38, 254, 1998.
44. V. Leo and CH. Cuvelliez, *Polym. Eng. & Sci.*, 36, 1961, 1996.
45. M. Bandreddi, R. Nunn, R. Malloy, *S.P.E. ANTEC 94*, 348, 1994.
46. Y. Yang, and F. Gao, *J. Intel. Material Sys. & Structure*, 9, 1046, 1998.
47. H. P. Tsoi and F. Gao, *Polym. Eng. & Sci.*, 39, 3, 1999.
48. 鄭年添, "雙成分射出成型製程後充填階段之研究", 中原大學博士論文, 1996
49. 陳永徵, "射出壓縮成型製程特性暨成品雙折射率差值模擬計算與量測", 中原大學博士論文, 1997
50. 彭信舒, "光學產品射壓成型製程特性之研究", 中原大學碩士論文, 1999

51. 王振偉，”薄殼射出成型品性質之研究“，中原大學碩士論文，2000

52. 黃德坤，”雙料共射出成型製程特性及成品品質之研究“，中原大學博士論文，2000

