

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

光學玻璃透鏡之熱壓成形研究

Hot Embossing Forming of Optical Glass Lens



研究生：王嘉偉

指導教授：洪景華 教授

中華民國九十五年六月

光學玻璃透鏡之熱壓成形研究

Hot Embossing Forming of Optical Glass Lens

研究生：王嘉偉

Student : Jia-Wei Wang

指導教授：洪景華 教授

Advisor : Ching-Hua Hung

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 2006

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十五年六月

光學玻璃透鏡之熱壓成形研究

學生：王嘉偉

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

光學玻璃透鏡已成為現今光電產品中不可或缺的元件，全球模造玻璃的缺貨情況愈趨嚴重，已造成供不應求的情形。而熱壓成形技術相對於傳統研磨技術擁有許多優勢，成為目前光學玻璃透鏡最主要的生產技術。

本研究依玻璃預型體的取得分為兩階段實驗，研究初期以研磨、拋光技術自行製作兩種預型體平平與凸凸；研究後期採用商用預型體（玻璃球），並利用相同技術製作表面品質符合精度要求之碳化鎢模仁進行光學透鏡熱壓成形實驗，且以不同硬膜層、模仁來決定出理想的脫模條件。本研究也針對熱壓成形後透鏡之表面品質進行檢測，判斷產品是否符合光學鏡頭之需求。

經由實驗結果量測得知，壓印成品之表面品質符合精度之要求。

Hot Embossing Forming of Optical Glass Lens

Student : Jia-Wei Wang

Advisor : Dr. Ching-hua Hung

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

The optical glass lens has been a key component in electronic-optical products. In contrast to traditional grinding technology, hot embossing forming technology of glass lens has shorten the manufacturing time and become one of the most important process to meet the demand of optical glass lens in mass-production market.

This research had been divided into two steps on the research of hot embossing forming of optical glass lens. In the first step, two kinds of preforms prepared by lapping and polishing process were tested to obtain preliminary hot embossing parameters. In the second step, commercially available glass beads (optical grade) were used and optimal hot embossing parameters were sought to obtain glass lens. Two different materials for mold inserts and several coatings for the die surface were tested during hot embossing process. The geometrical accuracy and surface roughness of final products were examined and glass lens with optical grade requirement was met.

誌 謝

在這兩年的研究生涯中，首先特別感謝我的指導教授洪景華老師，不管是在學業上或者是待人處事上，皆給予許多指導與幫助，讓學生獲益良多，也感謝口試委員陳復國、徐瑞坤以及陳申岳老師對於論文的指正與建議。

另外，感謝國家實驗研究院儀器科技研究中心儀器工程組副組長黃國政博士、余宗儒學長、光學工廠張玉銓女士及諸位大姐，熱心教導模仁與玻璃預型體的製作及干涉儀檢測技術，以及真空技術組李昭德博士與巨擘科技公司黃一生先生提供硬膜層技術，使得本研究可以順利完成。

此外，在這兩年的研究過程中，感謝洪榮崇學長在實驗中給予寶貴意見，以及實驗室各位學長、同學及學弟們在這段時間的陪伴，讓我在交大的日子裡更多采多姿。

最後，感謝我的父母以及家人，在我求學過程中給予最大的支持與鼓勵，讓我可以全心全力專注其中，還有女友雁迪在旁默默地付出。在此謝謝這兩年來陪伴我的所有人。

目錄

| | |
|---------------------|-----|
| 中文摘要..... | I |
| 英文摘要..... | II |
| 誌謝..... | III |
| 目錄..... | IV |
| 圖目錄..... | VII |
| 表目錄..... | XI |
| 第一章 緒論..... | 1 |
| 1.1 前言..... | 1 |
| 1.2 研究動機與目的..... | 1 |
| 1.3 研究方法..... | 2 |
| 1.4 文獻回顧..... | 3 |
| 1.5 論文內容介紹..... | 4 |
| 第二章 光學玻璃..... | 5 |
| 2.1 光學玻璃成分..... | 5 |
| 2.2 光學玻璃種類..... | 5 |
| 2.3 光學性質..... | 7 |
| 2.3.1 折射率..... | 7 |
| 2.3.2 色散..... | 7 |
| 2.3.3 透光率..... | 8 |
| 2.4 物理性質..... | 8 |
| 2.4.1 玻璃之硬度..... | 9 |
| 2.4.2 玻璃之應力..... | 9 |
| 2.5 化學性質..... | 9 |
| 2.6 本實驗採用之光學玻璃..... | 10 |

| | | |
|-------|------------------------|----|
| 第三章 | 模仁的製作與硬膜技術 | 11 |
| 3.1 | 模仁的製作 | 11 |
| 3.1.1 | 放電加工 | 13 |
| 3.1.2 | 成形 | 14 |
| 3.1.3 | 研磨 (Lapping) | 16 |
| 3.1.4 | 拋光 (Polishing) | 20 |
| 3.1.5 | 定心 | 22 |
| 3.2 | 硬膜技術 | 23 |
| 第四章 | 光學玻璃預型體 | 26 |
| 4.1 | 自行製作預型體 | 26 |
| 4.1.1 | 選料 | 28 |
| 4.1.2 | 切割 | 28 |
| 4.1.3 | 成形 | 29 |
| 4.1.4 | 研磨 | 29 |
| 4.1.5 | 拋光 | 30 |
| 4.1.6 | 清潔 | 31 |
| 4.2 | 商用預型體 | 32 |
| 第五章 | 光學玻璃透鏡熱壓成形實驗 | 33 |
| 5.1 | 實驗設備 | 33 |
| 5.2 | 實驗流程 | 34 |
| 5.3 | 玻璃熱壓成形實驗 | 35 |
| 5.3.1 | 開放式模具實驗 | 36 |
| 5.3.2 | 開放式模具實驗結果與討論 | 42 |
| 5.3.3 | 密閉式模具實驗 | 43 |
| 5.3.4 | 密閉式模具實驗結果與討論 | 45 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 5.3.5 無硬膜層碳化鎢合金模仁密閉式模具實驗 | 46 |
| 5.4 表面品質檢測 | 51 |
| 5.4.1 表面品質檢測原理 | 51 |
| 5.4.2 表面品質名詞定義 | 54 |
| 5.4.3 壓印成品精度要求 | 55 |
| 5.4.4 表面品質檢測結果 | 55 |
| 5.4.5 表面品質檢測結果與討論 | 67 |
| 第六章 結論與未來展望 | 68 |
| 6.1 結論..... | 68 |
| 6.2 未來展望 | 69 |
| 參考文獻..... | 71 |



圖目錄

| | |
|---------------------------------|----|
| 圖 2- 1 小原光學公司光學玻璃毛胚品種圖[8] | 6 |
| 圖 3- 1 模仁尺寸圖 | 13 |
| 圖 3- 2 模仁與夾具組合圖 | 13 |
| 圖 3- 3 模仁放電加工成品圖 | 14 |
| 圖 3- 4 模仁成形作業圖 | 15 |
| 圖 3- 5 模仁成形成品圖 | 15 |
| 圖 3- 6 砂輪直徑與工件的幾何關係 | 16 |
| 圖 3- 7 公模外觀圖 | 17 |
| 圖 3- 8 研磨作業圖 | 17 |
| 圖 3- 9 磨砂過程造成工件凹面之示意圖 | 18 |
| 圖 3- 10 磨砂過程造成工件凸面之示意圖 | 19 |
| 圖 3- 11 瀝青拋光模外觀圖 | 21 |
| 圖 3- 12 拋光作業圖 | 21 |
| 圖 3- 13 模仁拋光成品圖 | 22 |
| 圖 3- 14 模仁定心成品圖 | 23 |
| 圖 4- 1 平平及凸凸預型體 | 26 |
| 圖 4- 2 商用預型體（玻璃球） | 26 |

| | |
|--|----|
| 圖 4- 3 玻璃滾圓材 | 27 |
| 圖 4- 4 玻璃毛胚切割後外觀圖 | 29 |
| 圖 4- 5 凸凸預型體成形成品圖 | 29 |
| 圖 4- 6 凸凸預型體拋光成品圖 | 31 |
| | |
| 圖 5- 1 熱壓成形機外觀圖 | 33 |
| 圖 5- 2 球面透鏡亮度不一致現象 | 38 |
| 圖 5- 3 上模仁玻璃沾黏現象 | 38 |
| 圖 5- 4 第一次壓印力 196N (20Kgw) 之成品圖 (Lens1) | 39 |
| 圖 5- 5 第二次壓印力 343N (35Kgw) 之成品圖 (Lens2) | 40 |
| 圖 5- 6 模仁壓印後玻璃沾黏現象 | 40 |
| 圖 5- 7 第一次壓印力 343N (35Kgw) 之成品圖 (Lens3) | 41 |
| 圖 5- 8 第二次壓印力 588N (60Kgw) 之成品圖 (Lens4) | 42 |
| 圖 5- 9 壓印成品不均勻桶狀外形 | 43 |
| 圖 5- 10 壓印力 2940N (300Kgw) 之成品圖 (Lens5) | 44 |
| 圖 5- 11 硬膜層鉑銱 (Pt-Ir) 脫落現象..... | 45 |
| 圖 5- 12 壓印力 2940N (300Kgw) 之成品圖 (Lens6) | 47 |

| | |
|---|----|
| 圖 5- 13 第一次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間) | 48 |
| 圖 5- 14 第二次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間) | 48 |
| 圖 5- 15 第三次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間) | 49 |
| 圖 5- 16 第四次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間) | 49 |
| 圖 5- 17 第一次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (充入氮氣) | 50 |
| 圖 5- 18 第二次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (充入氮氣) | 50 |
| 圖 5- 19 干涉儀外觀圖 | 52 |
| 圖 5- 20 干涉條紋 | 52 |
| 圖 5- 21 三維的表面輪廓結構 | 53 |
| 圖 5- 22 二維色差圖 | 53 |
| 圖 5- 23 高度差截面圖 | 54 |
| 圖 5- 24 形狀精度示意圖 | 54 |
| 圖 5- 25 表面粗糙度示意圖 | 55 |
| 圖 5- 26 Lens1 之三維表面輪廓結構圖 | 58 |
| 圖 5- 27 Lens3 之三維表面輪廓結構圖 | 60 |

| | |
|--------------------------------|----|
| 圖 5- 28 Lens5 之上表面品質檢測結果 | 62 |
| 圖 5- 29 Lens5 之下表面品質檢測結果 | 63 |
| 圖 5- 30 Lens6 之上表面品質檢測結果 | 65 |
| 圖 5- 31 Lens6 之下表面品質檢測結果 | 66 |



表目錄

| | |
|--|----|
| 表 2- 1 玻璃之用途與 Fe_2O_3 容許限度 [7] | 5 |
| 表 2- 2 德國玻璃工業會之玻璃抗酸分級 | 10 |
| 表 3- 1 模仁材料性質 | 12 |
| 表 3- 2 GC 磨料號數與粒度 | 18 |
| 表 3- 3 CVD 與 PVD 製程比較 | 25 |
| 表 3- 4 TiAlN、TiN、CrN 及 TiCrN 性質 | 25 |
| 表 4- 1 自行製作預型體 S-FPL53 之材料性質 | 27 |
| 表 4- 2 FO 磨料號數與粒度 | 30 |
| 表 4- 3 商用預型體 L-BAL42 之材料性質 | 32 |
| 表 5- 1 熱壓設備重要性能 | 34 |
| 表 5- 2 現有文獻實驗參數 | 37 |
| 表 5- 3 初步實驗參數 | 38 |
| 表 5- 4 壓印成品 Lens1 之實驗參數 | 39 |
| 表 5- 5 壓印成品 Lens2 之實驗參數 | 40 |
| 表 5- 6 壓印成品 Lens3 之實驗參數 | 41 |
| 表 5- 7 壓印成品 Lens4 之實驗參數 | 42 |

| | |
|---|----|
| 表 5- 8 壓印成品 Lens5 之實驗參數 | 44 |
| 表 5- 9 硬膜層鉑銱 (Pt-Ir) 之實驗參數..... | 45 |
| 表 5- 10 壓印成品 Lens6 之實驗參數 | 47 |
| 表 5- 11 縮短壓印時間之實驗參數 | 48 |
| 表 5- 12 干涉儀重要性質 | 51 |
| 表 5- 13 檢測成品 | 55 |
| 表 5- 14 上 (TiN) 下 (CrN) 模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質比較 | 57 |
| 表 5- 15 Lens1、 Lens2 表面品質檢測結果 | 58 |
| 表 5- 16 上 (TiCrN) 下 (TiN) 模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質比較 | 59 |
| 表 5- 17 Lens3、 Lens4 表面品質檢測結果 | 59 |
| 表 5- 18 上、下 (TiCrN) 模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質比較 | 61 |
| 表 5- 19 Lens5 表面品質檢測結果 | 61 |
| 表 5- 20 上、下模仁 (碳化鎢合金) 拋光後表面品質檢測結果 | 64 |
| 表 5- 21 Lens6 表面品質檢測結果 | 64 |

第一章 緒論

1.1 前言

光學材料（玻璃、塑膠）、光學元件（透鏡、反射鏡、稜鏡、濾光片），及光學器材（傳統相機、數位相機、投影機、光碟機）都是光電產業的基礎。其中光學玻璃透鏡更成為任何光電或影像產品中不可缺少的零組件。

光學玻璃透鏡的應用，主要是配合產品廠商的需求，依組合鏡片數、最終產品外觀與成像品質等條件，選定所需各種不同折射率、尺寸的鏡片而設計、製造。精密光學玻璃透鏡的運用，最早都是傳統光學產品，但隨著電子科技的進步與生活素質的提升，AV 產品（投影機、CD Player、DVD Player）、OA 產品（雷射印表機、傳真機、影印機）及光資訊產品（掃描器、CD-R Driver），皆大量使用到光學玻璃透鏡。

光學玻璃透鏡的使用十分廣泛，包含國防用途上的雷射測距儀、雷射光束武器、太空攝影機和潛望鏡等；工業用途上的光學量測儀器、雷射、自動化設備、資訊系統和光纖通信等；以及民生用途上的各類攝影器材、影印事務設備、閉路監視系統、各式眼鏡、醫療用胃鏡和雷射刀等，可見光學玻璃透鏡已成為尖端科技的靈魂之窗。我國現今已將「光電科技」列為策略性工業之一，光學玻璃透鏡的製造技術便成為其中重要的一環。

1.2 研究動機與目的

對於光學材料而言，應用最廣的是光學玻璃透鏡，光學玻璃透鏡較光學塑膠透鏡有良好的光學解析度、可見光穿透率、熱穩定性、耐

磨損、耐潮溼、加工精度、機械強度等優良特性，但傳統光學玻璃透鏡製造技術以研磨法為主，對於量產性而言，不僅加工時程長，且生產成本高，不合乎經濟效益。而較新的玻璃熱壓成形技術因擁有大量生產，且加工時程較佳的優點，亦能控制精度與成本的考量，因此已成為目前光學玻璃透鏡最主要的生產技術。

雖然目前國內有許多廠已投入熱壓光學玻璃透鏡的生產，但因玻璃預型體需仰賴國外進口，且模仁的開發困難度高，使用壽命不易控制，因此熱壓光學玻璃透鏡生產良率難以提昇。

因此，本研究之目的在於利用研磨、拋光技術製作出符合一定精度要求之模仁，再利用此模仁進行熱壓成形實驗，達成以一模仁可大量轉印之目的，且亦能控制產品之精度與加工時程。

1.3 研究方法

由本實驗室先前之研究[5]已取得熱壓成形製程參數，包括成形時間、成形溫度、壓印力等，但其研究並無對產品有精度之要求。因此本研究將參考先前之相似製程參數，採用不同硬膜層與模仁，進行熱壓成形實驗，同時要求產品之精度。

本研究方法將分成兩大步驟，第一步驟將進行熱壓成形實驗前置作業，包括模仁的製作與玻璃預型體的取得。模仁將採用碳化鎢 - 鈷合金（含鈷 5.5%）與碳化鎢合金（無鈷成份）兩種材料，其中碳化鎢 - 鈷合金模仁利用研磨及拋光技術製作，且對於模仁拋光後鍍硬膜前的表面品質，包括形狀精度與表面粗糙度，有其精度要求；而碳化鎢合金模仁亦利用前述實驗製作，但採用無硬膜層的方式進行熱壓成形實驗。玻璃預型體的取得分為兩個時期，一般玻璃預型體在取得時無需研磨加工程序便有一定的亮面，可直接進行熱壓成形實驗，但在

研究初期取得不易，因此自行購買玻璃滾圓材，亦延用研磨、拋光技術，製作平平及凸凸二種預型體。在研究後期，得知國內廠商自行製作，因此取得可直接熱壓成形之商用預型體（玻璃球），對於玻璃預型體的取得而言，將有效節省時間與人力的成本。

第二步驟將進行熱壓成形實驗，以現有熱壓成形文獻之實驗參數做為初步參考，依據玻璃預型體的取得分為兩實驗，採用自行製作預型體，以開放式模具方式進行熱壓成形實驗；採用商用預型體，以密閉式模具方式進行熱壓成形實驗。而熱壓成形後將進行透鏡的表面品質檢測。

1.4 文獻回顧

Heckele [1]等人認為熱壓成形可製造出高精度與高品質兼具產品的技術，但因為成形週期（Cycle Time）太長，故一般只用來成形一些要求較高精度與品質的光學元件。由於熱壓具有材料流動距離短與低剪切速率的優點，可避免成品產生內應力，且加大成形的面積與自動化的製程也可提高產量與降低生產成本。

Shishido [2]等人針對玻璃熱壓時玻璃與模仁間之貼合程度進行研究，發現貼合程度將隨著玻璃表面張力的變化而改變，而貼合度的變化也會影響成形後的複製精度。

游[3]等人以電鑄鎳金屬模仁，熱壓成形於 PSK-100 玻璃材料上，成功地驗證了熱壓成形於玻璃材料之可行性。

王[4]以陣列式 V 形槽結構，寬 $50\mu\text{m}$ ，深 $25\mu\text{m}$ ，分別對 FCD1 和 SF2 光學玻璃材料進行微熱壓成形實驗，並探討製程中的各種參數對玻璃微熱壓成形特性的影響，且對成形中產生的缺陷進行原因及改

進方法的探討。

黃[5]以 FCD1 光學玻璃做為熱壓實驗的材料,採用平面玻璃來成形球面透鏡,依照實驗中所設定的壓印力與持壓時間等參數,對巨觀的幾何外形需求而言,以經過加工後之平面玻璃壓印球面透鏡確實可行,且在沒有施加保壓力的條件之下,其回彈狀況並不明顯,實驗所得到的玻璃球面透鏡成品,經由量測得知均符合 JIS B7433 曲率半徑容差的規範。

Yi [6]等人使用有限元素模擬預估光學玻璃透鏡在熱壓成形製造中的變形行為,證實高精度非球面透鏡可利用模造方式來取得,且模仁的表面品質可以被轉印至透鏡上。

1.5 論文內容介紹

本論文所使用的設備包含研磨機、切割機、成形機、定心機、干涉儀、光彈儀等設備,均為財團法人國家實驗研究院儀器科技研究中心所提供(以下簡稱儀科中心),論文中將以光學玻璃的基本性質(第二章)模仁的製作與硬膜技術(第三章)光學玻璃預型體(第四章)光學玻璃透鏡熱壓成形實驗(第五章)及結論與未來展望(第六章)等六章節進行完整介紹。

第二章 光學玻璃

2.1 光學玻璃成分

光學玻璃主要成分是二氧化矽 (SiO_2)，另外包含了三氧化鋁 (AlO_3)、三氧化二鐵 (Fe_2O_3)、氧化鐵 (FeO)、氧化銅 (CuO)、氧化鎂 (MgO)、氧化鈦 (TiO) 等有機物，上述成分大多對玻璃的性質無大損害；然而玻璃中含有氧化鐵成分會使玻璃著色，直接影響到玻璃的光學性質，因此在選擇玻璃時，其氧化鐵含量亦是一重要考量因素，玻璃中所含氧化鐵之容許量，依其用途可區分如表 2-1 所示。

表 2- 1 玻璃之用途與 Fe_2O_3 容許限度 [7]

| 玻璃之用途 | Fe_2O_3 容許限度 (%) | 玻璃之用途 | Fe_2O_3 容許限度 (%) |
|--------|-------------------------------------|---------|-------------------------------------|
| 光學玻璃 | 0.01 | 理化學用玻璃 | 0.1 |
| 良質結晶玻璃 | 0.015 | 鏡用玻璃 | 0.1 |
| 普通結晶玻璃 | 0.02 | 普通窗用玻璃 | 0.2 |
| 結晶鏡 | 0.03 | 半透明厚玻璃 | 0.3 |
| 一般玻璃 | 0.03 | 半透明薄玻璃 | 0.5 |
| 電器用玻璃 | 0.05 | 綠色、褐色玻璃 | 0.5 以上 |

2.2 光學玻璃種類

目前國際上較具知名的光學玻璃毛胚供應廠有日本小原光學 (OHARA) 公司、日本保谷光學 (HOYA) 公司、日本住田光學 (SUMITA) 公司、美國康寧 (CORNING) 公司、中國大陸北方工

業 (NORINCO) 公司、德國首德 (SCHOTT) 公司等，其中歷史最悠久之生產廠為德國首德公司，國內亦有許多家公司自行生產光學玻璃毛胚，如聯一光學公司、一品光學公司等。光學玻璃毛胚生產的種類約有三百多種，依折射率 (n_d) 與色散 (v_d) 來分，大致可分為冕冕玻璃 (Crown Glass, $n_d < 1.60$, $v_d > 55$) 和火石玻璃 (Flint Glass, $n_d > 1.60$, $v_d < 55$) 兩大類，冕冕玻璃成分中含有氧化鋇 (BaO)，屬折射率較低，色散較高之光學玻璃；火石玻璃成分中含有氧化鉛 (PbO)，屬於折射率較高，色散較低之光學玻璃。

一般光學玻璃類型命名是依照它在 n_d/v_d 圖上的位置而定， n_d/v_d 圖是由組成群和各玻璃材所構成，每個玻璃的命名是由群組名和一個編號所組成，例如 S-FPL53，其編號為 439950，其中前三位數代表 $n_d=1.439$ ，後三位數則是 $v_d=95.0$ 。圖 2-1 為日本小原光學公司的光學玻璃品種圖，圖中縱座標為折射率 n_d ，橫座標為 Abbe 數 v_d 。

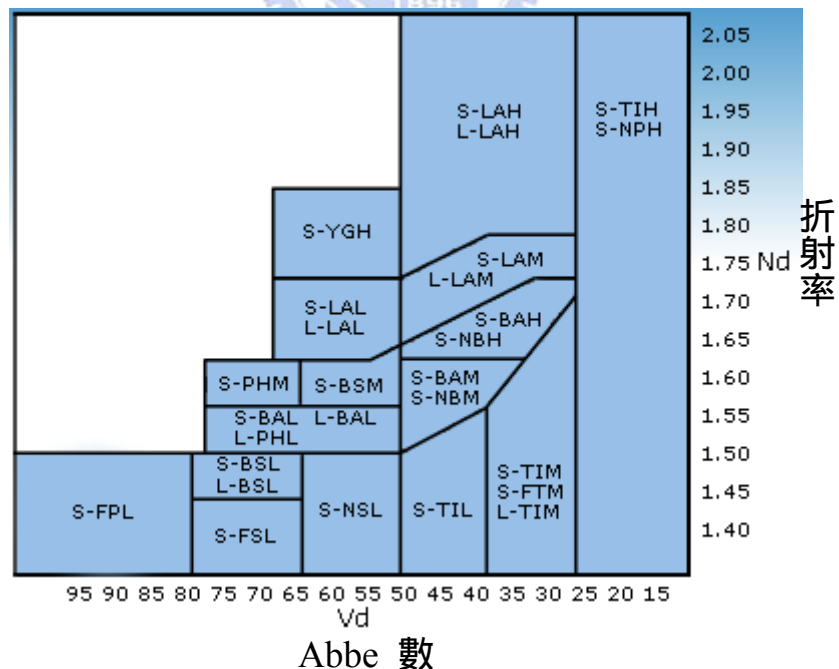


圖 2- 1 小原光學公司光學玻璃毛胚品種圖[8]

2.3 光學性質

光學玻璃各性質中以光學性質最為重要。不同品種之光學玻璃具有不同之折射率、色散與透光率。這三項為光學玻璃最常見之光學性質，以下將分別介紹其定義。

2.3.1 折射率

光在不同介質中會有不同的速度，所以光由一介質進入另一介質時，其行進方向會有所改變。折射率一般可分為絕對折射率與相對折射率；絕對折射率 n 為光在真空中的速度 c ($c=2.99\times 10^8\text{m/sec}$) 與光在介質中的速度 v 之比，即

$$n = \frac{c}{v} \quad (2-1)$$

然而工程上慣用的折射率為相對折射率，相對折射率 n_{rel} 為玻璃折射率 n_{glass} 與空氣折射率 n_{air} 之比，即

$$n_{rel} = \frac{n_{glass}}{n_{air}} \quad (2-2)$$

空氣在溫度 0、氣壓 760mm 汞柱時可見光區之折射率約為 1.000292，水折射率約為 1.33，玻璃折射率為 1.4~2.1，而鑽石折射率高達 2.42。

2.3.2 色散

各光學玻璃對不同波長光線的折射率之差稱為色散。其大小以 Abbe 數來表示，公式為

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2-3)$$

其中 v_d 為以氫燈 d 線為參考點之 Abbe 數， n_d 為該光學玻璃對氫燈 d 線之折射率， n_F 、 n_C 分別為對氫燈 F 線、C 線之折射率。此外，也有以汞燈 e 線為參考點之 Abbe 數，公式為

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C} \quad (2-4)$$

其中 n_e 為該光學玻璃對汞燈 e 線之折射率， n_F 、 n_C 分別為對鎘燈 F、C 線之折射率。

2.3.3 透光率

光學玻璃的透光率因玻璃種類、光線波長而變化，通常是冕冕玻璃較好，火石玻璃較差。而通常採用分光光譜儀與光譜分析儀兩種光學儀器測量透光率。若光照射由介質 n_1 垂直入射至折射率 n_2 的玻璃表面而反射時，反射率與透光率表示為下式

$$\text{反射率} = [(n_2 - n_1) / (n_1 + n_2)]^2 \quad (2-5)$$

$$\text{透光率} = 4n_1n_2 / (n_1 + n_2)^2 \quad (2-6)$$

2.4 物理性質

光學玻璃不只有光學性質而已，物理和化學性質也因種類而有差異。其中機械性質與玻璃組成有關之外，亦與微觀和宏觀缺陷、表面狀態及熱處理有密切關係，故可製作出各種玻璃以應各種不同之需要。

2.4.1 玻璃之硬度

光學玻璃之硬度通常以其表面對於壓痕抵抗(對於一種永久變形之抵抗)之大小表示之。由於 Knoop 和 Vickers 硬度試驗機的壓痕器之幾何形狀特殊且壓痕淺，因此可用於測試如玻璃等硬脆性材料。即以一定形狀與大小之壓痕器垂直壓入於水平已拋光之玻璃面上，由此壓力與玻璃表面所產生的壓痕之表面積或深度來計算玻璃之硬度值。

此外，另一種玻璃硬度表示法為莫式 Mohs 硬度試驗法，係選定十種礦物質，將硬度分為十等級，以材料抗劃痕之能力作為硬度之測量值。

2.4.2 玻璃之應力

光學玻璃在實際應用上有時會產生機械應力。例如光學元件快速的升溫，應力因熱膨脹而產生，或者當兩玻璃接合在一起，當溫度改變時，因不同熱膨脹係數或接合劑的收縮改變，應力就會產生。

2.5 化學性質

玻璃的化學性質係指玻璃對水、酸、鹼、鹽類等溶液與空氣中的水份和二氧化碳的抵抗能力，其中以抵抗酸性為化學性質主要的指標。目前對抵抗酸性的定義與實驗各有不同，在此列舉德國玻璃工會的定義法，將水裝滿於玻璃容器，再將水溫升至 100 後持溫三小時後，以甲基紅 (Methyl Red) 為指示劑，使用 1dm^2 的劑量滴入溶液中後，檢測玻璃容器所溶出的鹼量來進行分類，其分類如表 2-2 所示。

表 2- 2 德國玻璃工業會之玻璃抗酸分級

| 等級 | 類別名稱 | Mg/1000 Na ₂ O/dm ² |
|----|--------|--|
| 1 | 最安定之玻璃 | 0-50 |
| 2 | 耐久性玻璃 | 50-150 |
| 3 | 硬質玻璃 | 150-400 |
| 4 | 軟質玻璃 | 400-1600 |
| 5 | 有缺陷之玻璃 | 1600 以上 |

2.6 本實驗採用之光學玻璃

本實驗所選用的玻璃材料，配合實際應用，將以光路設計中的折射率與色散為優先考量，接著考量玻璃轉移溫度，以便適用於熱壓成形機之工作溫度範圍。基於上述的考量，選用 OHARA 公司所提供之 S-FPL53 與 L-BAL42 光學玻璃，關於其性質與製作方式，將在第四章有完整敘述。

第三章 模仁的製作與硬膜技術

光學玻璃透鏡熱壓成形實驗之前置作業主要分為二個部份，一為模仁的製作與硬膜技術，另一為光學玻璃預型體 (Preform) 的取得，將在下章節有完整的介紹。在熱壓成形實驗中，模仁優劣與硬膜品質是決定壓印成品品質的關鍵技術。而近年來精密模造技術的發展，與模仁製作技術的進步有絕對的關係。與其它成形用模仁不同，對於光學玻璃熱壓成形實驗有以下幾點要求：

1. 模仁材料需容易加工成高形狀精度。
2. 模仁需在重複急速升溫與降溫過程中，表面不易產生變形、裂痕與氧化作用。
3. 模仁在高溫度工作範圍內，具有高剛性、耐衝壓強度與高硬度。

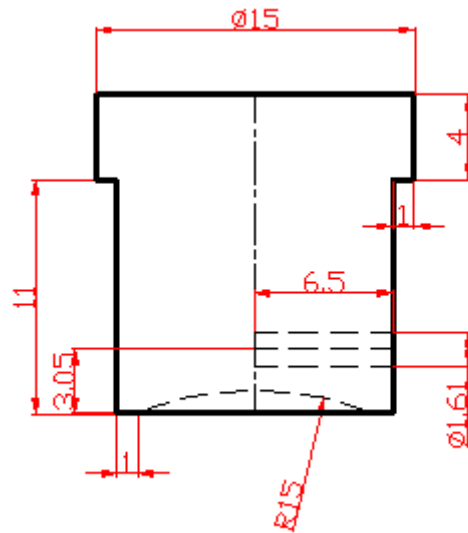
3.1 模仁的製作

基於上述幾點模仁的要求，因此本實驗模仁選用的材料為超硬合金碳化鎢 - 鈷合金 (含鈷 5.5%) 及碳化鎢合金 (無鈷成份)，其材料性質如表 3-1 所示，兩種模仁製作過程相同，唯碳化鎢合金模仁以無硬膜層方式進行熱壓成形實驗。接下來就是進行模仁的設計工作。在設計模仁時，除了需考慮壓印成品的尺寸外，模仁與夾具的裝置上，也是一項重要的考量。由於碳化鎢 - 鈷合金為高硬度脆性材料，因此在模仁的設計上，無法藉由鑽螺絲孔方式來與夾具固定，需利用定心機研磨出 T 字型的模仁，才能固定於夾具上。另外由於在熱壓成形實驗中必須量測模仁的工作溫度，因此在靠近模仁工作面的地方需利用放電加工的方式鑽一小孔足以放入熱電偶 (Thermocouple)。

表 3- 1 模仁材料性質

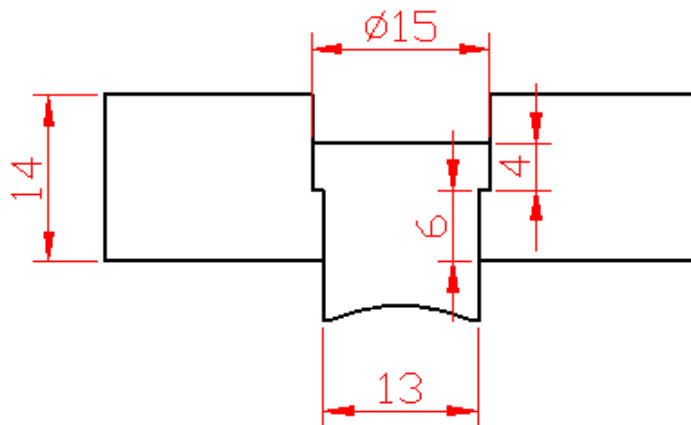
| 材料名稱 性質 | 碳化鎢 - 鈷合金 (UM) | 碳化鎢合金 (M78) |
|--------------------------------|---------------------|------------------|
| 比重 (g/cm ³) | 13.9 | 15.4 |
| 硬度 (HV) | 1600 | 2600 |
| 抗折力 (GPa) | 2.5 | 1.47 |
| 壓縮強度 (GPa) | 5.9 | 4.8 |
| 熱膨脹係數 (×10 ⁻⁶ /K) | 6 (20~150) | 3.6 (20~400) |
| 熱傳導率 (W/m K) | 67 | 42 |
| 含鈷成份 | 5.5% | 無 |

模仁設計完成圖，如圖 3-1 所示，圖 3-2 為模仁與夾具組合圖。接下來就是進行模仁的製作，依序流程為放電加工、成形、研磨、拋光、定心與鍍硬膜等。本實驗將以研磨、拋光技術運用在模仁的製作上，使用的研磨與拋光設備皆為儀科中心所提供，上述流程將在本章有完整的介紹。



單位：mm

圖 3- 1 模仁尺寸圖



單位：mm

圖 3- 2 模仁與夾具組合圖

3.1.1 放電加工

由於碳化鎢 - 鈷合金屬高硬度脆性材質，因此一般鑽頭無法製作出一小孔，唯有使用放電加工方法來完成，如圖 3-3 所示。放電加工原理即電極與工件之間通以直流電源，當電極與加工物在絕緣性的加

工液中,以伺服機構控制,使其逐漸接近至某一間隙(數 μm ~數十 μm)時,因絕緣被破壞而發生放電的現象。一發生放電,放電點附近便快速受到高溫加熱(約 8000 ~12000),顯現熔融、氣化的同時,會迫使熔融部位遭到此時所產生的高壓力而飛散,緊接著,放電在所定之短時間內即停止,受到加熱的部位隨即急速冷卻,而這種現在於短時間內重覆進行(1秒鐘約達 $10^3\sim 10^6$ 次)而可達到加工的要求。



圖 3-3 模仁放電加工成品圖

3.1.2 成形

本實驗設計模仁需成形一曲率半徑 15mm 的凹面,因此需利用成形機來加工,此處的「成形」(Curvature Generation, CG)是指將加工物件經由成形機磨製成預定之曲率半徑外形。成形的方式也有多種,其中包括鑽石車削、鑽石研磨和杯狀鑽石砂輪研磨等方式,而本實驗將以杯狀鑽石砂輪研磨成形,但因碳化鎢 - 鈷合金材質堅硬,因此在進行輪磨(Grinding)時,需給予最小切削力,否則將造成鑽石砂輪刀具的震動與高損耗量。成形作業如圖 3-4 所示,成形成品圖如 3-5 所示。



圖 3- 4 模仁成形作業圖



圖 3- 5 模仁成形成品圖

成形時杯狀鑽石砂輪刀具的選擇需配合欲成型工件的外型而定，其中砂輪直徑的選擇，如圖 3-6 所示，砂輪的直徑必須能涵蓋工件有效曲面角度（Effective Block Angle， θ ）的一半以上，其計算的方式為砂輪的直徑 d 必須大於 2 倍的工件曲率半徑 R 加或減（凸面為正，凹面為負）杯狀砂輪的刀鼻半徑 r ，再乘上有效曲面角度的正弦值[9]。即：

$$(R+r)\sin \quad d/2, \text{凸面成形} \quad (3-1)$$

$$(R-r)\sin \quad d/2, \text{凹面成形} \quad (3-2)$$

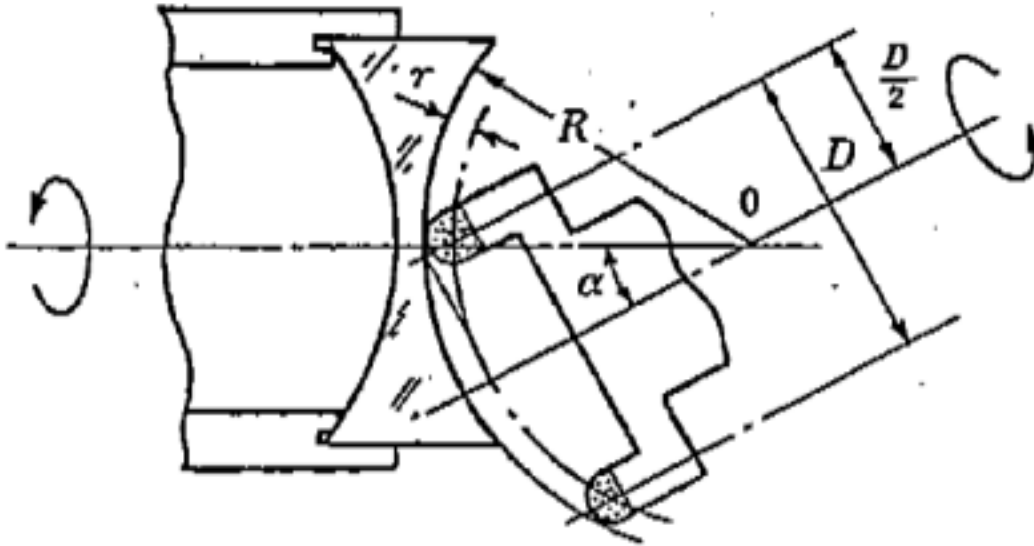


圖 3-6 砂輪直徑與工件的幾何關係

砂輪的直徑必須能涵蓋工件有效曲面角度，但也不宜過大，直徑太大的砂輪在成形時刀具的傾斜角度過大，有可能造成刀具與工件的干涉。另外，因刀具傾角過大而造成刀具直線進給時切削力不足，造成刀具震動，會影響成形後工件的表面精度。

3.1.3 研磨 (Lapping)

模仁成形完成後，可清楚看見表面有明顯鑽石砂輪研磨過的刀紋，因此必須經過研磨作業將刀紋消除，在進行研磨作業之前，需製作一公模，公模使用與模仁相同材料，目的在於與模仁形成對磨，其外觀圖如圖 3-7 所示。研磨作業如圖 3-8 所示，使用的研磨液為日本 FUJIMI 公司所生產型號 GC 碳化矽磨砂，其粒度大小如表 3-2 所示。模仁的研磨作業先以 #280 進行粗磨，使用 #280 粗砂的主要目的在於消除成形後的刀紋，當刀紋消除後，再分別以 #500 #800 #1200、

#2000、#3000、#6000 進行中、細磨，當磨砂號數愈高時，則可減低拋光時間，因此一般對於較硬材質，都會研磨至#3000 以上。

在粗、中、細磨過程中，需每隔10至15分鐘檢查鏡片的曲率半徑，且磨盤的擺動方式與磨盤的大小，均會形成模仁過凸或過凹，造成凹面的主因可歸納為擺動幅度過小、磨盤太小，如圖3-9所示；造成凸面的主因可歸納為擺動幅度過大、磨盤拉出擺動、磨盤偏心擺動、磨盤太大，如圖3-10所示。



圖 3-7 公模外觀圖



圖 3-8 研磨作業圖

表 3- 2 GC 磨料號數與粒度

| 號數 | 平均粒徑 (μm) | 號數 | 平均粒徑 (μm) |
|-------|------------------------|--------|------------------------|
| #240 | 57.0 | #1200 | 9.5 |
| #280 | 48.0 | #1500 | 8.0 |
| #320 | 40.0 | #2000 | 6.7 |
| #360 | 35 | #2500 | 5.5 |
| #400 | 30 | #3000 | 4.0 |
| #500 | 25 | #4000 | 3.0 |
| #600 | 20 | #6000 | 2.0 |
| #700 | 17 | #8000 | 1.2 |
| #800 | 14 | #9000 | 0.7 |
| #1000 | 11.5 | #10000 | 0.6 |

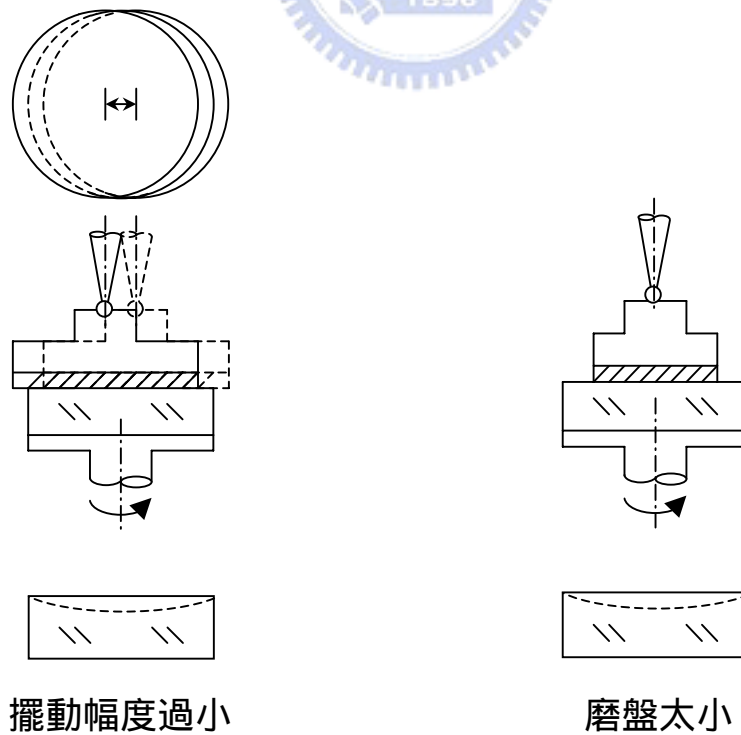
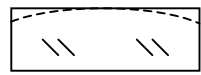
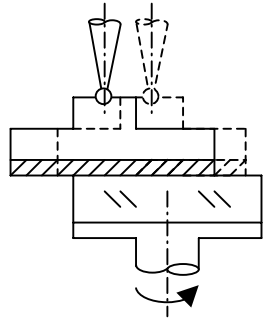
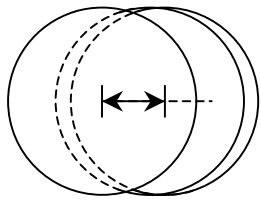
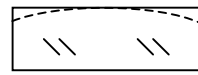
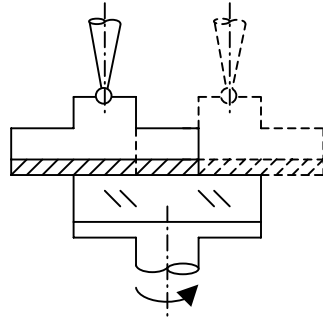
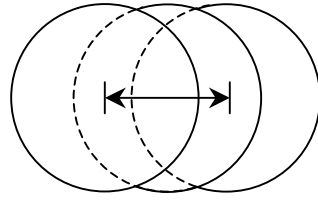


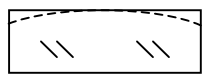
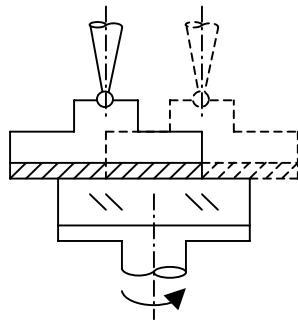
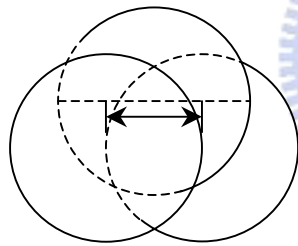
圖 3- 9 磨砂過程造成工件凹面之示意圖



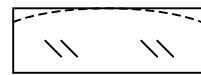
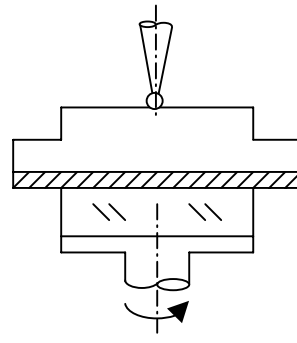
磨盤偏心擺動



磨盤擺動幅度過大



磨盤拉出擺動



磨盤太大

圖 3- 10 磨砂過程造成工件凸面之示意圖

3.1.4 拋光 (Polishing)

研磨作業完成後，接下來就是拋光的作業，經由研磨過程中的粗、中、細磨作業，可將模仁表面刺孔 (Dig) 刮痕 (Scratch) 消除，且得到平整、光滑的表面，而模仁經過成形和研磨作業後，其表面尚有 2~3 μm 厚的裂紋層，要消除這一層裂紋層的方法即為拋光。拋光使用的材料有絨布、羊毛氈、拋光皮 (Polyurethane) 和拋光瀝青，通常要達到高精度的拋光面，最常使用的材料為拋光瀝青，因為使用瀝青來拋光時，可藉由瀝青細密的表面，帶動拋光液研磨工件生熱使工件熔化流動，熔去粗糙的頂點並填平裂痕的谷底，逐漸把裂紋層除去，且常在瀝青表層覆以網目或刻出方格溝槽，以助排屑並可增加拋光效果。拋光時使用的工作液體和研磨不同，若工件硬度高，則選用的拋光液硬度也應提高，一般來說，對於工件硬度高的使用鑽石漿，玻璃鏡片選用的拋光液為氧化鈾 (CeO_2)。

在製作瀝青拋光模方面，先取一曲率半徑為 15mm 的凸磨碗加熱，使之溫度達到足以溶化拋光瀝青，然後將拋光瀝青貼付於凸磨碗上，並使用加熱後的刀片進行邊緣修整，接著將拋光瀝青加熱並以上模仁 (曲率半徑為 15mm) 進行壓印，使拋光瀝青的外形可與上模仁貼合，完成壓印後再重複邊緣修整，即完成瀝青拋光模，如圖 3-11 所示，而拋光作業如圖 3-12 所示，模仁的拋光成品圖如圖 3-13 所示。



圖 3- 11 瀝青拋光模外觀圖



圖 3- 12 拋光作業圖



圖 3- 13 模仁拋光成品圖

拋光作業完成後，即進行模仁表面品質檢測的工作，使用的設備為干涉儀，由儀科中心所提供。其檢測原理及結果將在 5.5 節有詳細敘述。

3.1.5 定心

使工件的幾何中心軸與光軸一致的工作過程稱為「定心」，一般所謂定心是指工件的對心（Centering）與磨邊（Edging）兩過程，工件經拋光後，其光軸（兩曲率中心之連線）往往偏離其幾何中心軸，此一現象稱為偏心（Decentration），理論上工件的偏心可分為兩種誤差型式，一種是光軸與幾何中心軸平行，另一種則是光軸與幾何中心軸交叉，而實際上工件的偏心是這兩種誤差的綜合。工件對心與磨邊的方式依其形狀與要求精度的不同而異，常見的有下列幾種：

1. 對心：
 - （1）光學式：反射式、穿透式、自準直儀式
 - （2）機械式：鐘夾式
2. 磨邊：
 - （1）平行磨削方式
 - （2）傾斜磨削方式
 - （3）端面磨削方式

本實驗模仁定心的目的，一方面是因模仁在成形機研磨凹球面時，會有偏心的問題，另一方面則是在模仁與夾具固定上的問題，可藉由定心機磨邊的功能來完成設計要求。而模仁對心方式採用機械式，磨邊方式採用端面磨削方式，定心成品圖如圖 3-14 所示。



圖 3- 14 模仁定心成品圖

3.2 硬膜技術

硬膜的應用範圍廣，包括 3C 產業、光學、光電產業和國防工業，未來潛在市場廣大。而在模具（仁）效用上更為顯著，可增加表面硬度，藉由表面超硬薄膜被覆處理，工具鋼、模具鋼或超硬合金工具，可提升表面硬度 3~5 倍，減少工具的磨耗量，其次，可減少磨擦係數，藉由超硬薄膜被覆處理，金屬氮化物（TiN、CrN）或潤滑式薄膜（DLC、MoS₂），可避免衝、剪以及模具表面溶著、刮傷等問題，提高產品精度，降低模具耗損與延長模具壽命。此外，還能提高產品品質，藉由超硬薄膜被覆處理，耐磨和耐熱特性的金屬氮化物（CrN、TiAlN），可提升加工速率，大幅提升產能。

硬膜技術於光學玻璃透鏡熱壓成形中扮演相當重要的地位，其中硬膜的適用性，必須考慮到以下幾點：

1. 離形性，以避免在熱壓成形時與玻璃產生反應、黏沾現象。

2. 足夠的硬度與機械強度，以便熱壓成形玻璃避免表面刮傷。
3. 高溫穩定性，以避免在模造氣氛中發生分解現象與氣氛反應。
4. 耐熱衝擊性，以忍受模造過程中的熱循環。
5. 可加工性，以加工成所需光學面品質並考慮加工時間與成本。
6. 硬膜壽命，延長硬膜壽命可降低成本。

依其成長方式，主要區分為 PVD 與 CVD 硬膜技術。PVD (Physical Vapor Deposition 物理氣相沉積) 與 CVD (Chemical Vapor Deposition 化學氣相沉積) 是硬膜技術的廣泛稱呼，隨著激發方式不同，又可細分為許多種方式，包括蒸鍍、濺鍍、離子鍍、熱 CVD、電漿輔助 CVD (即 PECVD)、光誘發 CVD 等。簡言之，PVD 採物理方式，而 CVD 採用化學方式進行鍍硬膜。

一般而言，PVD 溫度低，沒有毒氣問題；CVD 溫度高，需達到 1000 以上將氣體解離，來產生化學作用。兩種不同的技術特性，應用的範圍也不同，PVD 沉積到材料表面的附著力較 CVD 差一些，PVD 適合應用在光電產業，半導體製程中的金屬導電膜大多使用 PVD 來沉積，而絕緣膜大多數採用較為要求較嚴謹的 CVD 技術。表 3-3 為 CVD 與 PVD 的製程比較。

表 3- 3 CVD 與 PVD 製程比較

| 條件 成長方式 | 鍍硬膜溫度 | 鍍硬膜時間 | 硬膜厚度 | 硬膜形成速度 |
|------------|---------|-------|--------------|--------------------|
| CVD | 1000 附近 | 2~8hr | 5~10 μ m | 1~1500 μ m/hr |
| PVD | 400~600 | 1~3hr | 1~10 μ m | 0.5~250 μ m/hr |

本實驗將採用的硬膜材料包括有：陶瓷硬膜氮化鋁鈦 (TiAlN)、氮化鈦 (TiN)、氮化鉻 (CrN)、氮化鉻鈦 (TiCrN) 及貴金屬膜鉑鈱 (Pt-Ir)，其性質如表 3-4 所示，分別由巨擘科技公司及儀科中心所提供。

當硬膜製作完成後，接下來必須檢測模仁鍍硬膜後表面品質，探討模仁在鍍硬膜前與鍍硬膜後是否受到硬膜的影響，而檢測結果將在 5.5 節有完整敘述。

表 3- 4 TiAlN、TiN、CrN 及 TiCrN 性質

| 性質 硬膜 | 顏色 | 硬度(Hv) | 庫倫摩 擦係數 | 耐氧化溫度 | 處理溫度 | 處理 單位 |
|----------|-----|----------|------------|--------|---------|----------|
| TiAlN | 暗紫色 | 3000±400 | 0.40 | 925 | 400~450 | 巨擘 |
| TiN | 金黃色 | 2200 | 0.40 | 600 | 450 | 巨擘 |
| CrN | 銀白色 | 1700 | 0.50 | 800 | 300~450 | 巨擘 |
| TiCrN | 暗紫色 | 2000 以上 | 0.20 | 600 以上 | 300~400 | 儀科 |

第四章 光學玻璃預型體

本研究玻璃預型體的取得分為兩個時期，研究初期亦使用研磨、拋光技術自行製作外形為平平及凸凸兩種玻璃預型體，如圖 4-1 所示；研究後期使用商用預型體（玻璃球），如圖 4-2 所示。

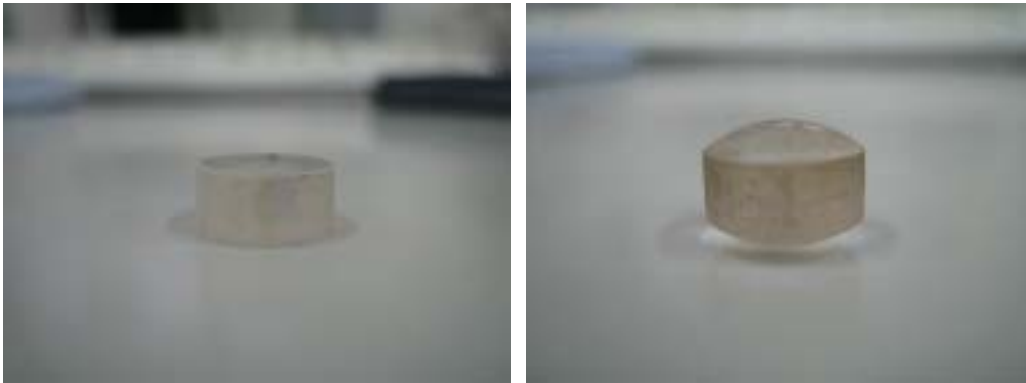


圖 4-1 平平及凸凸預型體



圖 4-2 商用預型體（玻璃球）

4.1 自行製作預型體

研究初期所使用的玻璃材料為 OHARA 公司所提供的 S-FPL53 玻璃滾圓材，外形尺寸為 $10\text{mm}\times 16\text{mm}$ ，外觀如圖 4-3 所示，其材料性質如表 4-1 所示，預型體將製作成平平及凸凸二種，在此將簡略介紹凸凸預型體的製作。前處理作業依序包括選料、切割、成形、研

磨、拋光及清潔。



圖 4- 3 玻璃滾圓材

表 4- 1 自行製作預型體 S-FPL53 之材料性質

| 玻璃編號 | | S-FPL53 |
|------------------------------|-----------|---------|
| 材料性質 | | |
| 折射率 n_d | | 1.43875 |
| Abbe 數 v_d | | 95.0 |
| 玻璃轉移點 T_g () | | 426 |
| 降伏點 A_t () | | 456 |
| 線膨脹係數 $\alpha(10^{-7}/)$ | -30~+70 | 145 |
| | +100~+300 | 169 |
| 熱傳導率 k (W/m K) | | 0.857 |
| Knoop 硬度 (Hk) | | 320 |

4.1.1 選料

選擇玻璃毛胚時，必須將厚度之損耗量、外徑、修邊量和材質等納入加工考量，一般而言，材料的損耗量愈少愈好。當選定使用指定的玻璃毛胚後，仍需從此批胚料中篩選出無缺陷的胚料，玻璃內部或外表有缺陷時不僅會影響其光學性質，也會在成形時造成其裂痕，所以在選料過程中必須謹慎將缺陷的胚料淘汰，一般常見的玻璃胚料缺陷有：

1. 結石：玻璃內部結石因為原料之未融物或原料中混入雜物所造成。
2. 節疤：係因玻璃化的速度不同，使玻璃內部組成不同所造成。
3. 起筋：係因為熔融玻璃中之原料，未充分均勻混合所造成的細紋脈。
4. 氣泡：係因熔融過程不慎引入空氣或回火不當或化學作用等因素造成的氣孔。

4.1.2 切割

玻璃胚料通常都是整塊的胚體，可先以油性或鉛筆劃出所需之形狀，依照過去的經驗保留一定的預留量，作為後續加工過程中可能的損耗，例如透鏡的規格為直徑=25mm，厚度=10mm 時，則切割出來的玻璃方塊尺寸大約是 30mm×30mm×12mm 左右最為合適。但因本實驗所使用玻璃胚料即為滾圓材，因此在切割 10mm×16mm 之原胚料時只需考慮到切割時砂輪片的損耗量 2mm，所以切割完成後玻璃毛胚的外形尺寸為 10mm×7mm，如圖 4-4 所示。



圖 4- 4 玻璃毛胚切割後外觀圖

4.1.3 成形

此處的成形和前章節模仁的成形相同，皆為將加工物件經由成形機磨製成預定之曲率半徑外形，在製作凸凸預型體時，兩凸面將成形為曲率半徑為 7mm，如圖 4-5 所示。



圖 4- 5 凸凸預型體成形成品圖

4.1.4 研磨

鏡片成形後，其表面會留下些許鑽石砂輪研磨過的刀紋（Tool Mark），可藉由研磨作業將玻璃鏡片表面的刀紋磨平，且得到平整、光滑的表面，降低表面粗糙度，亦可節省拋光的時間。

凸凸預型體由於凸面曲率半徑較小（ $R=7\text{mm}$ ），且厚度較高

($t=5.8\text{mm}$), 因此無法整模進行研磨作業, 必須單一個鏡片一一來完成研磨作業, 此為較不方便的地方。而本實驗所使用的研磨液粒度從 #500、#800 與 #1200 對玻璃鏡片進行粗、中、細磨作業, 研磨液為日本 FUJIMI 公司所生產型號 FO 氧化鋁磨砂, 其粒度大小如表 4-2 所示; 每個號數必須研磨至整個鏡片的表面粗細均勻, 才可換更高號數。

表 4- 2 FO 磨料號數與粒度

| 號數 | 平均粒徑 (μm) | 號數 | 平均粒徑 (μm) |
|------|------------------------|-------|------------------------|
| #240 | 40 | #800 | 11.3 |
| #280 | 34 | #1000 | 9.4 |
| #320 | 28 | #1200 | 7.1 |
| #400 | 23 | #1500 | 5.5 |
| #500 | 19 | #2000 | 4.5 |
| #600 | 16 | #3000 | 3.6 |
| #700 | 13.5 | #4000 | 2.7 |

4.1.5 拋光

當凸凸預型體研磨完成後, 接下來進行的工作即為拋光作業。凸面的拋光如同研磨一致, 無法整模拋光, 需單一鏡片一一拋光。當凸面的拋光完成後, 使用放大鏡檢測兩面表面均無刺孔且呈現亮面即完成凸凸預型體的拋光作業, 也達成光學玻璃透鏡熱壓成形時玻璃預型體的要求, 如圖 4-6 所示。



圖 4- 6 凸凸預型體拋光成品圖

拋光與研磨所使用的運動機構相同，除了程序與使用的工作液體不一樣外，拋光時所需的環境條件亦較研磨時嚴格。一般拋光時要注意的事情如下：

1. 拋光瀝青的表面不可有雜質，不然會造成鏡片的刮傷。
2. 拋光劑內不可有雜質或硬塊。
3. 拋光模表面和鏡片表面需吻合，否則會產生咬持拋光劑而刮傷鏡片（牛毛狀）。
4. 拋光前，需確定鏡片表面是否可消去在研磨後仍留下刀痕較深所留下的刺孔。
5. 拋光模的大小與材質是否適當。
6. 瀝青的軟硬度與厚度是否適當。

4.1.6 清潔

當鏡片拋光完畢後，先進行冷凍脫模的動作，先將鏡片貼付模置入冰箱中冷凍，溫度約在零下 30 ，冷凍脫模的原理係利用玻璃與瀝青的膨脹係數不同，在低溫下而使鏡片與瀝青脫開，但須小心地將

鏡片從貼付模上取下。

鏡片取下之後，則進行最後清潔的工作。清洗鏡片的方式，視產量的大小而可採用超音波洗淨機或人工來清洗，本實驗採用人工清洗的方式，先用清水或肥皂沖洗鏡片，然後再用氣槍噴除鏡片表面上的水份與殘留的雜質。

4.2 商用預型體

研究後期所使用的玻璃材料同為 OHARA 公司所提供之 L-BAL42 玻璃球，外形尺寸為 5.8mm，外觀如圖 4-2 所示，其材料性質如表 4-3 所示，研究後期使用的玻璃材料無需經過初期製作流程即可進行熱壓成形實驗，因此可有效節省時間及人力上的成本。

表 4-3 商用預型體 L-BAL42 之材料性質

| 玻璃編號 | | L-BAL42 |
|------------------------------|-----------|---------|
| 材料性質 | | |
| 折射率 n_d | | 1.583 |
| Abbe 數 v_d | | 59.4 |
| 玻璃轉移點 T_g () | | 506 |
| 線膨脹係數 $\alpha(10^{-7}/)$ | -30~+70 | 72 |
| | +100~+300 | 88 |
| 熱傳導率 k (W/m K) | | 1.028 |
| Knoop 硬度 (Hk) | | 590 |

第五章 光學玻璃透鏡熱壓成形實驗

5.1 實驗設備

本實驗所使用之熱壓成形機設備，由本實驗室自行設計再委外製作的實驗專用機，為四柱式實驗專用機，如圖 5-1 所示。此設備由材料壓縮試驗機、加熱板、隔熱板、溫度控制器等所組成。位移控制是由伺服馬達驅動滾珠螺桿搭配減速機，驅使下壓板往上移動達到壓印的效果，再搭配旋轉編碼器（Rotary Encoder）來控制位移量；壓力控制部分使用壓力感測器（Load Cell）測出壓力值，將數值傳回電腦經由計算再進行補償，溫度控制則使用熱電偶配合溫控表進行檢測與補償；熱壓設備主要性能如表 5-1 所示。



圖 5-1 熱壓成形機外觀圖

表 5- 1 熱壓設備重要性能

| | | | |
|--------------------|---------------|------------------|-----------|
| 最高荷重 (N) | 19600 | 最小位移精度 (mm) | 0.005 |
| 動力系統 | 伺服馬達 搭配減速機 | 溫度控制 () | 500± 1 |
| 控制精度 (mm/min) | 0.5~500 | 控制迴路 | 閉迴路 控制 |

5.2 實驗流程

光學玻璃透鏡熱壓成形實驗步驟如下：

1. 準備動作：將模仁與夾具裝置完畢，再將熱電偶固定於上、下模仁內，利用丙酮將上、下模仁表面擦拭乾淨，在放置玻璃預型體前，也先將其擦拭乾淨，然後放置在下模仁上。
2. 升溫：先將工作溫度設定完成，然後進行升溫動作。
3. 持溫、預壓與壓印：當溫度到達工作溫度後予以持溫，持溫之目的在於使玻璃預型體內外均實際達到工作溫度，然後先進行預壓動作，再給定荷重進行壓印。
4. 保壓、降溫：壓印完成後進行保壓以防止玻璃預型體在降溫過程中變形。

5. 脫模：當溫度降至脫模溫度後，予以脫模。
6. 取出成品：當溫度降至常溫後，則可用夾子取出。

透過文獻回顧整理得知，熱壓成形過程中對成品的影響參數與模仁損耗的主要因素如下：

1. 成形溫度：溫度過低不但會使成形過程的充填性不足，亦會造成玻璃預型體的損壞，但溫度過高，不但影響成品品質，還會使模仁壽命降低，亦可能造成脫膜困難。
2. 壓印力：在密閉式模具熱壓成形時，壓印力愈大，充填效果愈好，但會縮短模仁的壽命；在開放式模具熱壓成形時，過大的壓印力，則會使玻璃預型體變形過度，反而無法達到所需的形狀精度。
3. 模仁的表面品質：模仁的表面品質決定了成品的表面品質；此外，模仁過於粗糙會使充填效果差且在脫模時產生過大的磨擦力，會影響成品精度與其光學性質。
4. 脫模劑：脫模劑的添加有助於脫模時避免玻璃預型體與模仁的黏沾，但不當的脫模劑則會造成脫模劑在成品表面的殘留，會影響其表面品質。
5. 殘留應力 (Residual Stress)：在熱壓成形與降溫的過程中，常使成品內部產生應力，若在成品內部有過高的殘留應力，在稍受外力接觸時，成品表面或內部會形成龜裂，造成日後的損壞。

5.3 玻璃熱壓成形實驗

由本實驗室先前之研究[5]已探討熱壓成形實驗中各製程參數對壓印成品的影響，包括成形時間、成形溫度、壓印力等，但其研究並

無對產品有精度要求，因此本研究將參考現有製程參數，採用不同硬膜層與模仁，進行熱壓成形實驗，並對熱壓產品有一定精度要求。本實驗將依據玻璃預型體的取得分為開放式模具與密閉式模具實驗，開放式模具實驗使用自行製作預型體，以現有熱壓成形文獻[5]之實驗參數做為初步參考，研究後期取得商用預型體，進行密閉式模具實驗。

5.3.1 開放式模具實驗

參考現有熱壓成形文獻，以硬膜層氮化鋁鈦 (TiAlN) 之碳化鎢-鈷合金模仁進行熱壓成形實驗，而文獻實驗參數如表 5-2 所示，進而修改決定出本實驗初步實驗參數，如表 5-3 所示。

玻璃材料以 S-FPL53 平平預型體進行壓印，壓印成品如圖 5-2 所示，由圖中可發現在鏡片成形後，因側邊材料的向上擠出（此側邊材料無法經由研磨、拋光技術加工），因此形成亮度不一致的現象，影響其成像品質，且以平平預型體進行熱壓成形時，因鏡片平面邊角直接接觸上模仁，因此在壓印後造成上模仁有玻璃沾黏現象發生，且破壞模仁表面品質，如圖 5-3 所示，經由以上結果，得知平平預型體並不適用於熱壓成形實驗之預型體。

所以在接下來實驗中，將以凸凸預型體進行實驗，而硬膜層嘗試使用氮化鈦 (TiN)、氮化鉻 (CrN) 及氮化鈦 (TiN)、氮化鉻鈦 (TiCrN) 兩組分別進行實驗，決定出適用硬膜層。

1. 上模硬膜層氮化鈦 (TiN) 與下模硬膜層氮化鉻 (CrN)

以 S-FPL53 凸凸預型體進行第一次壓印，實驗參數如表 5-4 所示，壓印成品（編號 Lens1）如圖 5-4 所示。由圖中可發現在壓印完成後成形面亮度一致，已克服平平預型體所造成的問題，接著進行第

二次壓印，實驗參數如表 5-5 所示，壓印成品（編號 Lens2）如圖 5-5 所示，壓印完成後造成上、下模玻璃些許沾黏現象，如圖 5-6 所示。

2. 上模硬膜層氮化鉻鈦（TiCrN）與下模硬膜層氮化鈦（TiN）

同樣以 S-FPL53 凸凸預型體進行第一次壓印，實驗參數如表 5-6 所示，壓印成品（編號 Lens3）如圖 5-7 所示，由圖中可發現在壓印完成後造成下模硬膜層（TiN）脫膜於透鏡上（金黃色部分），而上模並無沾黏現象發生。接著進行第二次壓印，實驗參數如表 5-7 所示，壓印成品（編號 Lens4）如圖 5-8 所示，壓印完成後上模仍無沾黏現象發生。

另外，在實驗過程中，可發現玻璃預型體在急速升溫階段並無破裂情形，因此不必考慮升溫過程中的持溫時間，也大幅降低整體升溫時間。經過計算，可發現模仁升溫時間平均約 5 分鐘可達成形溫度 456℃，而模仁從脫模溫度降溫至 100℃ 約 30 分鐘，所以目前整體所需升溫與降溫時間大約 35 分鐘的時間。

表 5-2 現有文獻實驗參數

| 預壓力 (N) | 上模溫度 () | 下模溫度 () | 保壓力 (N) | 壓印壓力 (N) |
|------------------|---------------|---------------|--------------------|-------------|
| 19.6 | 500 | 490 | 0 | 196 |
| 壓印力速度 (N/min) | 持溫時間 (Sec) | 持壓時間 (Sec) | 每 50 升溫、持溫時間 (min) | |
| 19.6 | 1200 | 400 | 20 | |

表 5-3 初步實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：456 | 196 |
| | 下模：456 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 588 | 0 | 380 |



圖 5-2 球面透鏡亮度不一致現象



圖 5-3 上模仁玻璃沾黏現象

表 5- 4 壓印成品 Lens1 之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：456 | 196 |
| | 下模：456 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 588 | 0 | 380 |

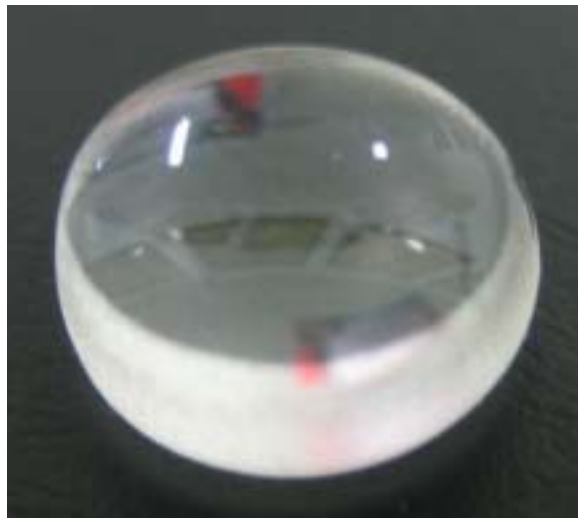


圖 5- 4 第一次壓印力 196N (20Kgw) 之成品圖 (Lens1)

表 5- 5 壓印成品 Lens2 之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：456 | 343 |
| | 下模：456 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 588 | 0 | 380 |



圖 5- 5 第二次壓印力 343N (35Kgw) 之成品圖 (Lens2)



圖 5- 6 模仁壓印後玻璃沾黏現象

表 5- 6 壓印成品 Lens3 之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：456 | 343 |
| | 下模：456 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 588 | 0 | 380 |

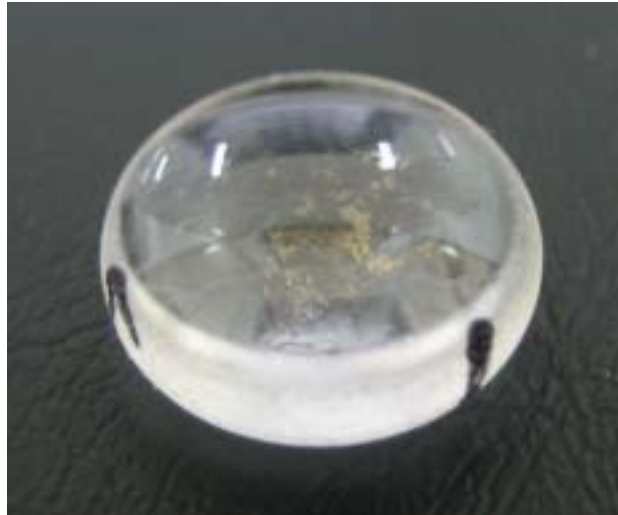


圖 5- 7 第一次壓印力 343N (35Kgw) 之成品圖 (Lens3)

表 5- 7 壓印成品 Lens4 之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：456 | 588 |
| | 下模：456 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 588 | 0 | 380 |

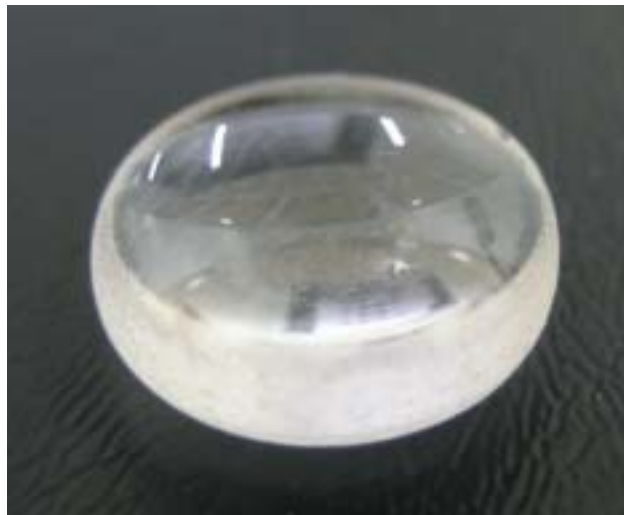


圖 5- 8 第二次壓印力 588N (60Kgw) 之成品圖 (Lens4)

5.3.2 開放式模具實驗結果與討論

經由上述實驗後，可得到以下幾點結論：

1. 平平預型體由於成形面亮度不一致現象，因此不適用於熱壓成形實驗。
2. 硬膜層氮化鉻鈦 (TiCrN) 進行兩次熱壓成形實驗後皆不會造成模仁沾黏玻璃現象發生，因此將在接下來密閉式模具實驗中繼續

進行研究。

3. 硬膜層氮化鈦 (TiN) 於熱壓成形實驗後造成脫膜現象，影響透鏡表面品質。
4. 開放式模具實驗在熱壓成形後會造成壓印成品外形不均勻桶狀 (barrel) 情形發生，如圖 5-9 所示，且容易有偏心問題發生，需另外進行定心作業解決。且在研究初期無法取得商用預型體進行密閉式模具實驗，因此難以克服。



圖 5-9 壓印成品不均勻桶狀外形

5.3.3 密閉式模具實驗

在研究後期，取得商用預型體，因此將以密閉式模具方式進行熱壓成形實驗，從開放式模具實驗中得知硬膜層氮化鉻鈦 (TiCrN) 在進行熱壓成形時，不會造成模仁沾黏玻璃現象，因此將以此硬膜層進行密閉式模具實驗，實驗參數如表 5-8 所示，壓印成品 (編號 Lens5) 如圖 5-10 所示，由圖中可看出壓印成品已解決開放式模具實驗所造成的不均勻桶狀外形，且無偏心問題。

從文獻參考得知[10]，對於熱壓成形實驗而言，貴金屬膜鉑鈱

(Pt-Ir) 佔有相當大的優點，包括脫模性、高溫氧化、高溫與玻璃反應及硬膜品質穩定性皆優於陶瓷硬膜，但由於貴金屬材料昂貴，取得不易，因此少有願意購入，在研究後期得知儀科中心進行採購，因此將可在本實驗中進行研究與探討。

以硬膜層鉑銱 (Pt-Ir) 進行熱壓成形實驗，實驗參數如同表 5-9 所示，壓印成品如圖 5-11 所示，由圖中可發現壓印完成後造成透鏡破裂，且透鏡上有硬膜層的脫落。

表 5- 8 壓印成品 Lens5 之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：536 | 1960 |
| | 下模：536 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 588 | 0 | 450 |



圖 5- 10 壓印力 2940N (300Kgw) 之成品圖 (Lens5)

表 5- 9 硬膜層鉑鈦 (Pt-Ir) 之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|-----------------|-----------|-----------|
| 49 | 上模 : 586 | 1960 |
| | 下模 : 586 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 5880 | 0 | 450 |



圖 5- 11 硬膜層鉑鈦 (Pt-Ir) 脫落現象

5.3.4 密閉式模具實驗結果與討論

經由上述實驗後，可得到以下幾點結論：

1. 以商用預型體進行密閉式模具熱壓成形實驗將可解決壓印成品外形呈現不均勻桶狀 (barrel) 情形，且無偏心問題。
2. 使用硬膜層氮化鉻鈦 (TiCrN) 進行熱壓實驗後，仍造成模仁沾黏現象，影響壓印成品表面品質。

3. 硬膜層鉑銱 (Pt-Ir) 在熱壓成形實驗後造成硬膜層脫落現象，歸咎其原因，為膜厚度太厚造成，約為 $1.5\mu\text{m}$ ，且鍍層中未使用中介(間)層。從文獻參考得知，一般鉑銱(Pt-Ir)膜厚度約為 $0.5\mu\text{m}$ ，且需使用中介(間)層，但由於研究後期才取得此硬膜層，受到時間的限制，因此無法完整進行熱壓成形實驗與探討。

5.3.5 無硬膜層碳化鎢合金模仁密閉式模具實驗

在熱壓成形實驗中，硬膜層技術扮演相當重要的地位，但由於鍍硬膜需時間及成本的考量，且有一定的壽命，加上鍍硬膜技術優劣為重要關鍵，因此若能以無硬膜層的模仁進行熱壓成形實驗，而不會造成模仁沾黏玻璃現象，則將可省去製作硬膜層的成本與時間上的浪費。

因此本實驗將以無硬膜層碳化鎢合金模仁進行密閉式模具實驗，實驗參數如表 5-10 所示，壓印成品(編號 Lens6)分別如圖 5-12 所示，由圖中可發現以無硬膜層碳化鎢合金模仁壓印之透鏡已有黃色析出物形成。

為了了解此黃色析出物如何產生，可能為壓印時間過長造成(約為 25 分鐘)，因此將提升壓印力速度至 $5880\text{N}/\text{min}$ ，成形溫度至 586°C ，實驗參數如表 5-11 所示，則壓印時間縮至 1 分鐘[11-12]，分別進行四次壓印，壓印成品如圖 5-13~圖 5-16 所示，由圖中可發現在進行第一次壓印時，透鏡並無黃色析出物形成，但隨著壓印次數的增加，透鏡仍有些許的黃色析出物形成。由於本實驗工作環境並非屬於真空狀態，因此此黃色析出物可能為高溫時氧化所造成，所以在接下來實驗中，將在工作環境中充入氮氣，觀察是否為高溫氧化所造成，實驗參數如同表 5-11 所示，壓印成品如圖 5-17、5-18 所示，由圖中

可看出在進行第二次壓印後，仍造成黃色析出物的形成，因此可得知此黃色析出物為玻璃與碳化鎢合金模仁反應所形成。

經由上述實驗可得知無硬膜層碳化鎢合金模仁雖然在熱壓成形實驗中不會造成模仁沾黏玻璃現象，但由於透鏡上有析出物形成，因此將影響其表面品質。

表 5- 10 壓印成品 Lens6 之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：536 | 1960 |
| | 下模：536 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 588 | 0 | 450 |



圖 5- 12 壓印力 2940N (300Kgw) 之成品圖 (Lens6)

表 5- 11 縮短壓印時間之實驗參數

| 預印力 (N) | 成形溫度() | 壓印力 (N) |
|---------------|---------|----------|
| 49 | 上模：586 | 1960 |
| | 下模：586 | |
| 壓印力速度 (N/min) | 保壓力 (N) | 脫模溫度 () |
| 5880 | 0 | 450 |



圖 5- 13 第一次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間)



圖 5- 14 第二次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間)



圖 5- 15 第三次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間)



圖 5- 16 第四次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (縮短壓印時間)

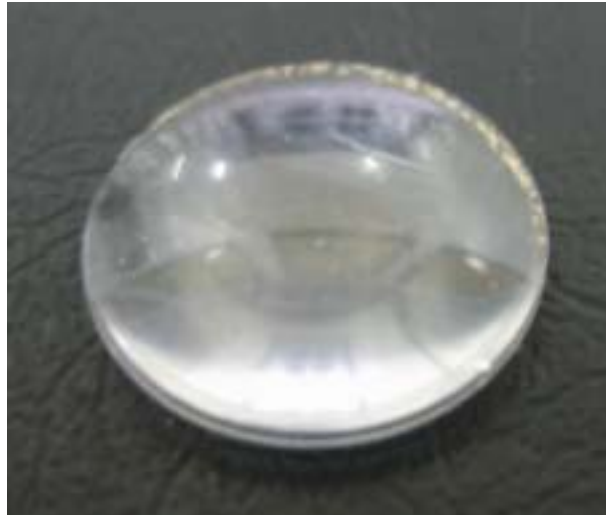


圖 5- 17 第一次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (充入氮氣)

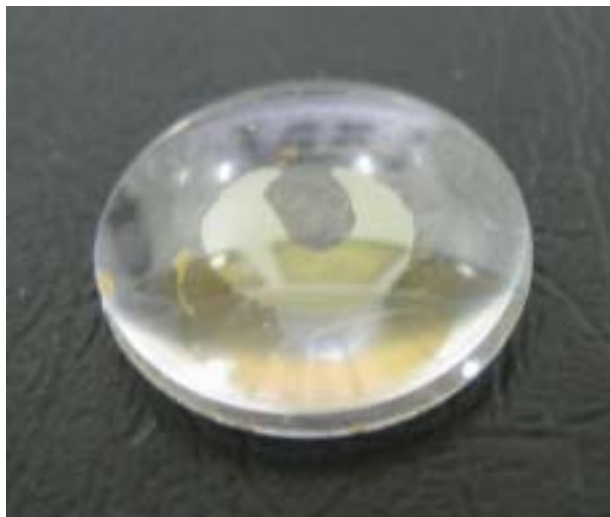


圖 5- 18 第二次壓印力 1960N (200Kgw) 之成品圖 (充入氮氣)

5.4 表面品質檢測

表面品質的優劣將絕對影響透鏡成像品質，因此完成熱壓成形實驗後，將進行透鏡表面品質檢測的工作，檢測原理與結果將在本章節有完整的敘述，而使用的設備為雷射干涉儀，由儀科中心所提供，其重要性質如表 5-12 所示。

表 5- 12 干涉儀重要性質

| | | | |
|------|-------|-----|-----------|
| 設備廠牌 | Zygo | 型號 | OMP-0351J |
| 光源 | He-Ne | 標準鏡 | F/15 4” |

5.4.1 表面品質檢測原理

干涉儀是利用雷射干涉理論為基礎來進行表面輪廓量測，其設備外觀如圖 5-19 所示，運用干涉儀可以量測待測波前 (Test Wavefront) 與參考波前 (Reference Wavefront) 之間的相位差。

干涉儀中的參考波前是由標準鏡 (Transmission Spheres) 反射所產生的，而待測波前則是由具有高低起伏的待測面反射所產生的。待測波前與參考波前間的相位差可以反映此待測物的表面輪廓，形成干涉條紋，如圖 5-20 所示 (表面品質愈佳，其干涉條紋愈直)。

由於系統的光路中含有相移技術 (Phase-Shifting Technique)，可以求得上述的相位差，再利用相位重建技術 (Phase Unwrapping Technique) 來恢復重建後連續分佈的相位，進而推算出三維的表面輪廓結構，如圖 5-21 所示，藉由軟體的運算可以將三維的表面輪廓結

構轉換成二維的色差圖，並予以量化，如圖 5-22 所示，同時可以在二維的色差圖選取任一截面，觀察該截面的輪廓圖，如圖 5-23 所示。



圖 5-19 干涉儀外觀圖



圖 5-20 干涉條紋

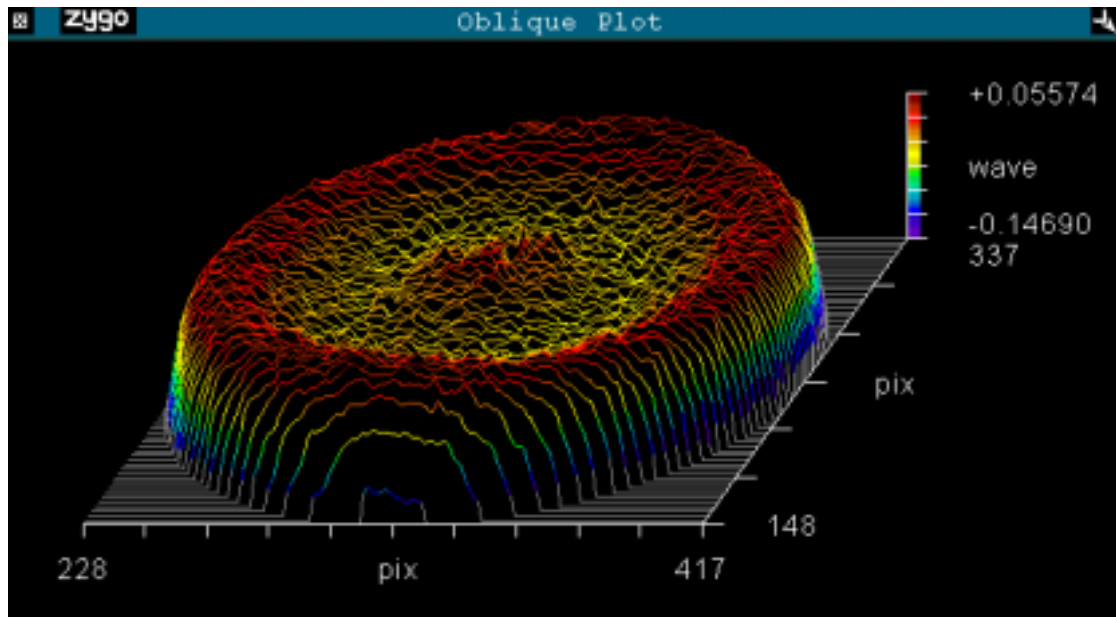


圖 5- 21 三維的表面輪廓結構

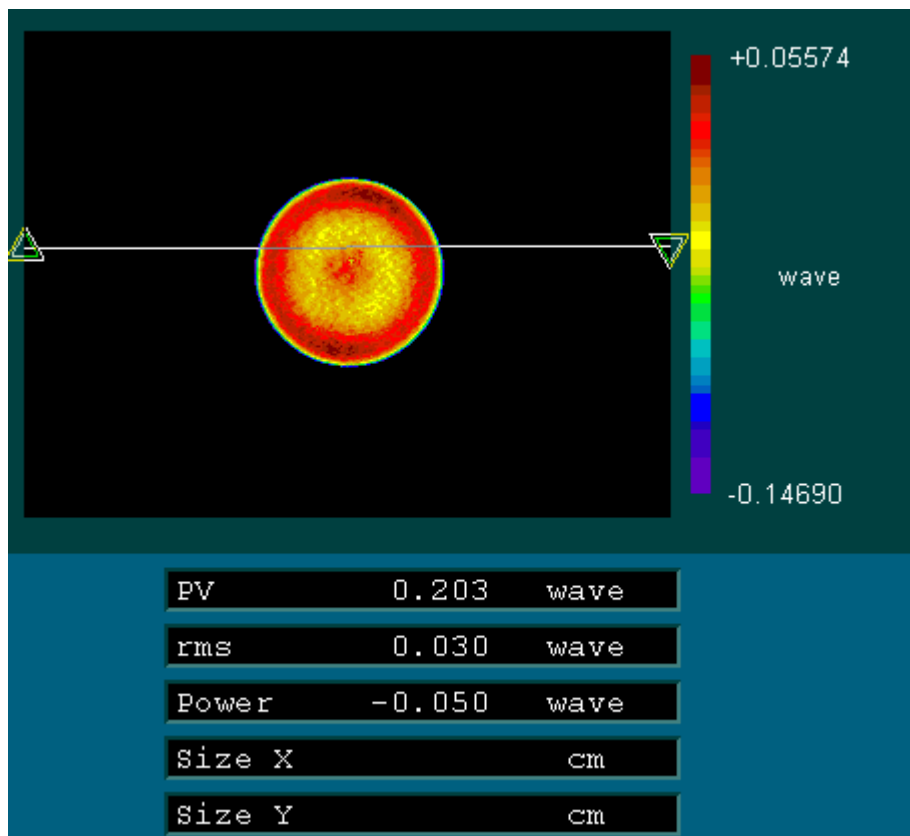


圖 5- 22 二維色差圖

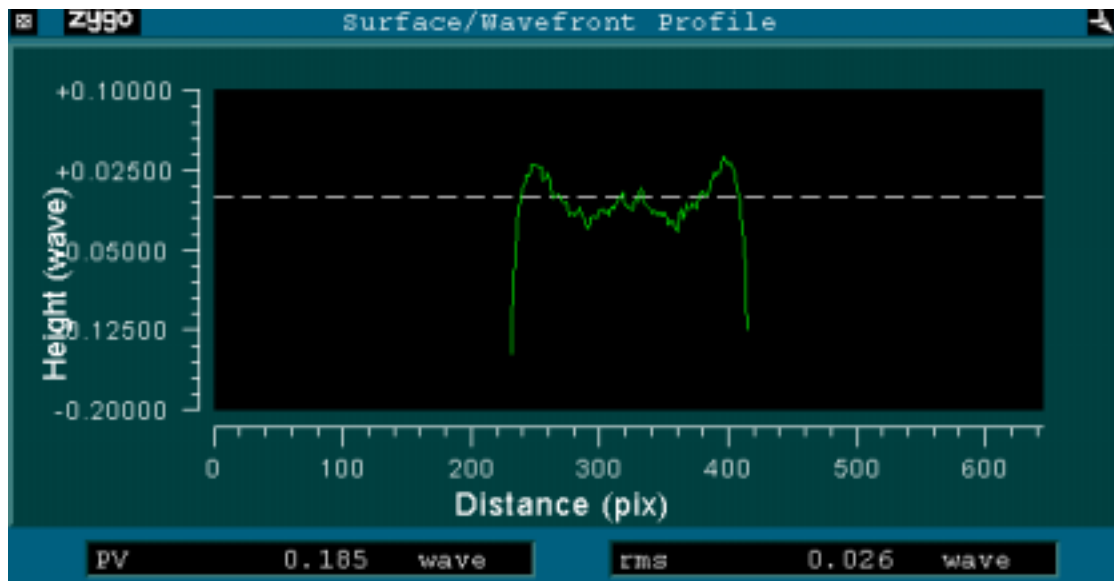


圖 5-23 高度差截面圖

5.4.2 表面品質名詞定義

1. 形狀精度 (Form Error): 一般以 PV (peak-to-valley) 表示, 指在物體表面偏離設計曲面 (一般為球面) 之高低落差值[13], 如圖 5-24 所示。



圖 5-24 形狀精度示意圖

2. 表面粗糙度 (Surface Roughness): 一般以 RMS (root-mean square, R_q) 或 R_a 表示, 公式如下所示, 示意圖如圖 5-25 所示。本實驗後續採用 RMS (R_q) 來表示及討論表面粗糙度。

$$R_q = \sqrt{\frac{a^2 + b^2 + c^2 + d^2 + \dots}{n}} \quad (5-1)$$

$$R_a = \frac{a + b + c + d + \dots}{n} \quad (5-2)$$

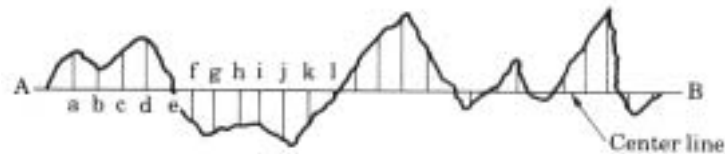


圖 5-25 表面粗糙度示意圖

3. wave：干涉儀檢測光源氦氖雷射波長，表示為 $\lambda=0.632\mu\text{m}$ 。

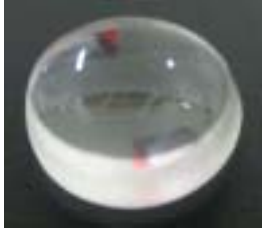





5.4.3 壓印成品精度要求

1. 形狀精度 (PV)：影響成像品質。若低於檢測光源波長的 1/4 倍，則屬於高形狀精度；若介於檢測光源波長的 1/4 倍~1 倍，則屬中形狀精度；若高於檢測光源波長的 1 倍，則屬低形狀精度。
2. 表面粗糙度 (rms)：影響光的散射與穿透率。對照形狀精度，以其值 1/5 倍規範。

5.4.4 表面品質檢測結果

完成熱壓成形實驗後，將進行壓印成品的表面品質檢測工作，依據開放式模具與密閉式模具實驗之壓印成品，分別進行檢測，檢測成品整理如表 5-13 所示。

表 5-13 檢測成品

| 條件 編號 | 外觀圖 | 壓印力 (N) | 成形溫 度 () | 硬膜層 | 預型體 |
|----------|---|------------|--------------------|------------------------|---------|
| Lens1 |  | 196 | 上 : 456 下 : 456 | 上 : TiN 下 : CrN | S-FPL53 |
| Lens2 |  | 343 | 上 : 456 下 : 456 | 上 : TiN 下 : CrN | S-FPL53 |
| Lens3 |  | 343 | 上 : 456 下 : 456 | 上 : TiCrN 下 : TiN | S-FPL53 |
| Lens4 |  | 588 | 上 : 456 下 : 456 | 上 : TiCrN 下 : TiN | S-FPL53 |
| Lens5 |  | 1960 | 上 : 536 下 : 536 | 上 : TiCrN 下 : TiCrN | L-BAL42 |
| Lens6 |  | 1960 | 上 : 536 下 : 536 | 無硬膜層 | L-BAL42 |

在開放式模具實驗中，分別以兩組硬膜層材料進行熱壓成形實驗，首先先進行第一組硬膜層碳化鎢 - 鈷合金模仁拋光後鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質檢測結果比較，如表 5-14 所示，由表中可得知模仁在鍍硬膜前與鍍硬膜後其表面品質並無受到很大影響，表示此硬膜層與模仁的附著力良好，而壓印成品表面品質檢測結果如表 5-15 所示，由表中可得知壓印成品其表面品質符合中形狀精度要求，但由三維的表面輪廓結構圖可發現其實預型體與模仁在壓印過程中，充填性並非良好，呈現出凹凸不平的表面，如圖 5-26 所示。另外從模仁鍍硬膜後與壓印成品表面品質結果比較，可得知在熱壓成形過程中，模仁轉印性（Replication or Transferability）良好。

接著進行第二組硬膜層碳化鎢 - 鈷合金模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質檢測結果比較，如表 5-16 所示，而壓印成品表面品質檢測結果如表 5-17 所示，由表中可發現因壓印成品受到硬膜層些許脫膜的影響，因此造成其表面品質的破壞，可見其三維的表面輪廓結構圖呈現小塊凹陷面積，如圖 5-27 所示。

表 5- 14 上 (TiN) 下 (CrN) 模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質比較

| 表面品質 | | 過程 | |
|--------------|-------|-------------------|-------------------|
| | | 拋光後鍍硬膜前 | 鍍硬膜後 |
| 上模仁 (TiN) | 形狀精度 | 0.286λ (0.18μm) | 0.338λ (0.21μm) |
| | 表面粗糙度 | 0.034λ (21nm) | 0.052λ (33nm) |
| 下模仁 (CrN) | 形狀精度 | 0.351λ (0.22μm) | 0.325λ (0.20μm) |
| | 表面粗糙度 | 0.047λ (30nm) | 0.056λ (35nm) |

表 5- 15 Lens1、 Lens2 表面品質檢測結果

| 透鏡編號 | | Lens1 (圖 5-4) | Lens2 (圖 5-5) |
|-------------|-------|-------------------|-------------------|
| | | 表面品質 | |
| 上面 (TiN) | 形狀精度 | 0.357λ (0.22μm) | 0.281λ (0.17μm) |
| | 表面粗糙度 | 0.062λ (39nm) | 0.052λ (33nm) |
| 下面 (CrN) | 形狀精度 | 0.485λ (0.30μm) | 0.632λ (0.40μm) |
| | 表面粗糙度 | 0.075λ (47nm) | 0.114λ (72nm) |

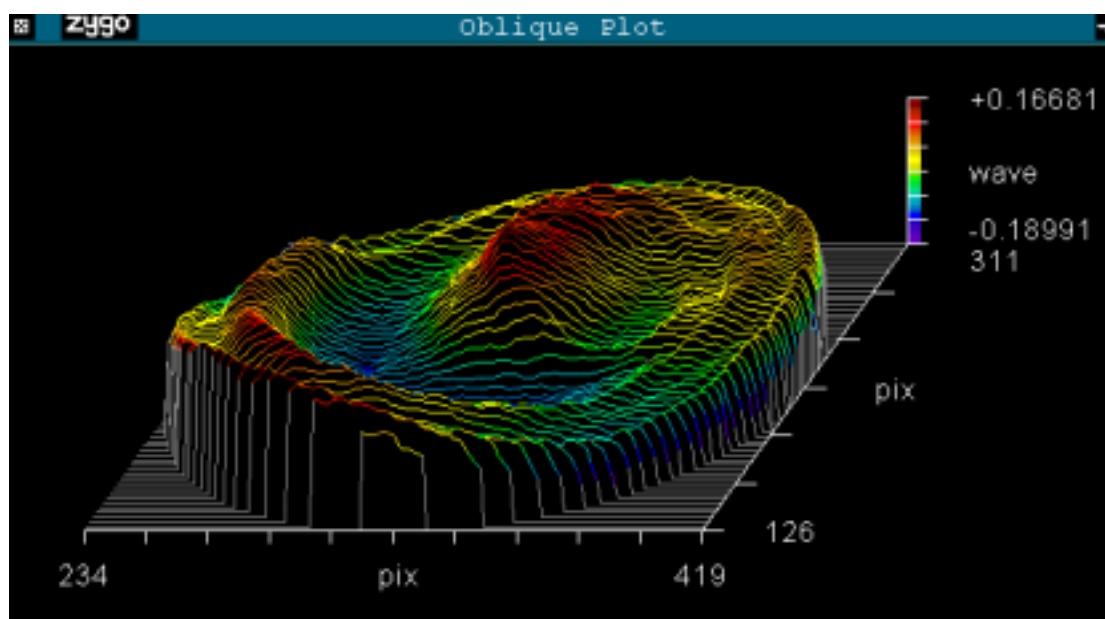


圖 5- 26 Lens1 之三維表面輪廓結構圖

表 5- 16 上 (TiCrN) 下 (TiN) 模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質比較

| 表面品質 | | 過程 | 拋光後鍍硬膜前 | 鍍硬膜後 |
|----------------|-------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | 上模仁 (TiCrN) | 形狀精度 | |
| 表面粗糙度 | | | 0.078λ (49nm) | 0.078λ (49nm) |
| 下模仁 (TiN) | 形狀精度 | | 0.229λ (0.14μm) | 0.219λ (0.13μm) |
| | 表面粗糙度 | | 0.033λ (20nm) | 0.032λ (20nm) |

表 5- 17 Lens3、Lens4 表面品質檢測結果

| 表面品質 | | 透鏡編號 | Lens3 (圖 5-7) | Lens4 (圖 5-8) |
|---------------|-------|-----------------|-------------------|-------------------|
| | | 上面 (TiCrN) | 形狀精度 | |
| 表面粗糙度 | | | 0.134λ (84nm) | 0.118λ (74nm) |
| 下面 (TiN) | 形狀精度 | | 0.956λ (0.60μm) | 0.590λ (0.37μm) |
| | 表面粗糙度 | | 0.073λ (46nm) | 0.068λ (42nm) |

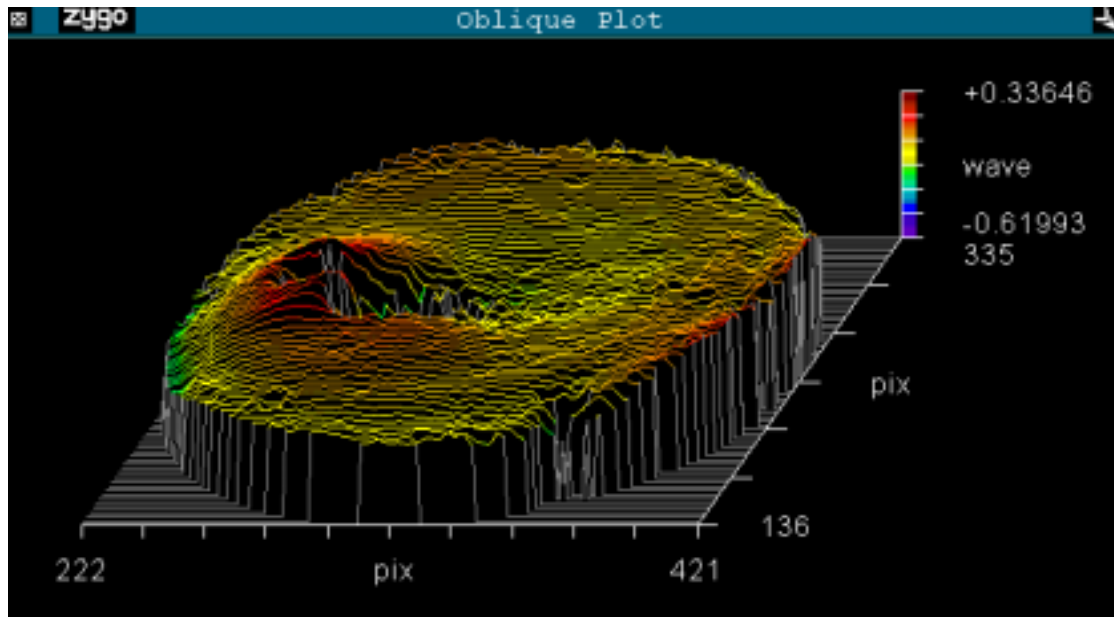


圖 5- 27 Lens3 之三維表面輪廓結構圖

在密閉式模具實驗中，進行硬膜層氮化鉻鈦（TiCrN）碳化鎢 - 鈷合金模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質檢測結果比較，如表 5-18 所示，而壓印成品表面品質檢測結果如表 5-19 所示，從表中可發現壓印成品其表面品質並非理想，但從干涉條紋及三維的表面輪廓結構圖中可看出其表面品質受到模仁沾黏玻璃所影響，若扣除玻璃沾黏所影響範圍，則可發現干涉條紋接近直線，且三維的表面輪廓相當平整，符合高形狀精度之要求，表示模仁與預型體在壓印過程中充填性佳，如圖 5-28、圖 5-29 所示。

表 5- 18 上、下 (TiCrN) 模仁鍍硬膜前與鍍硬膜後表面品質比較

| 表面品質 | | 過程 | 拋光後鍍硬膜前 | 鍍硬膜後 |
|------------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | | 上模仁 (TiCrN) | 形狀精度 | 0.203λ (0.12μm) |
| 表面粗糙度 | 0.030λ (18nm) | | 0.043λ (27nm) | |
| 下模仁 (TiCrN) | 形狀精度 | 0.209λ (0.13μm) | 0.285λ (0.18μm) | |
| | 表面粗糙度 | 0.027λ (17nm) | 0.040λ (25nm) | |

表 5- 19 Lens5 表面品質檢測結果

| 表面品質 | | 透鏡編號 | Lens5 (圖 5-10) |
|-------|-----------------|-------------------|------------------|
| | | 上面 | 形狀精度 |
| 表面粗糙度 | 0.091λ (57nm) | | |
| 下面 | 形狀精度 | 0.751λ (0.47μm) | |
| | 表面粗糙度 | 0.067λ (42nm) | |

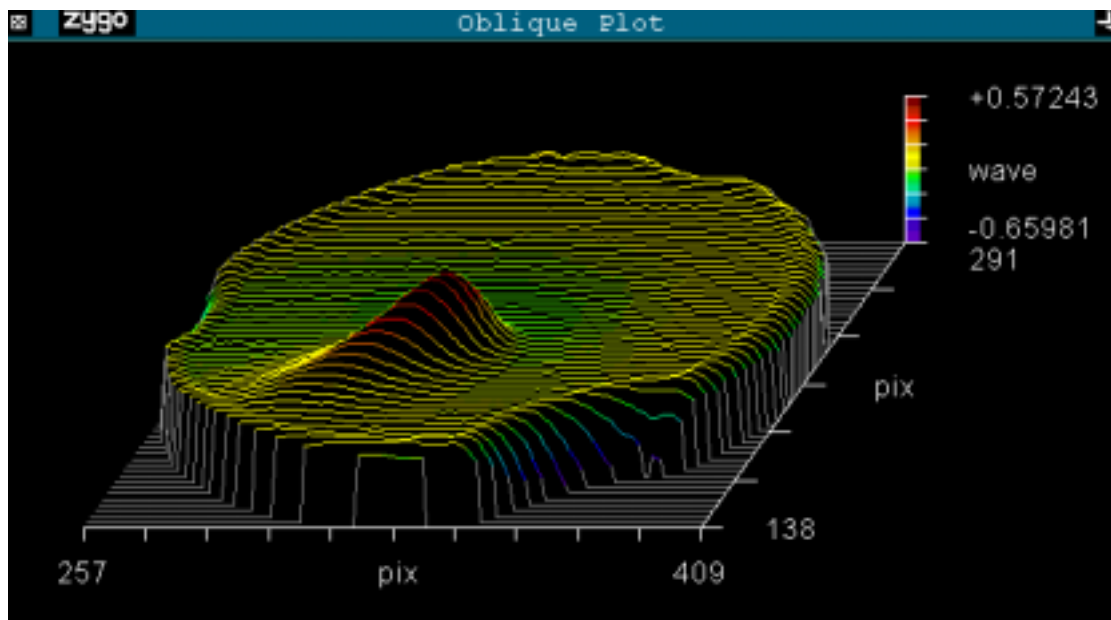


圖 5- 28 Lens5 之上表面品質檢測結果

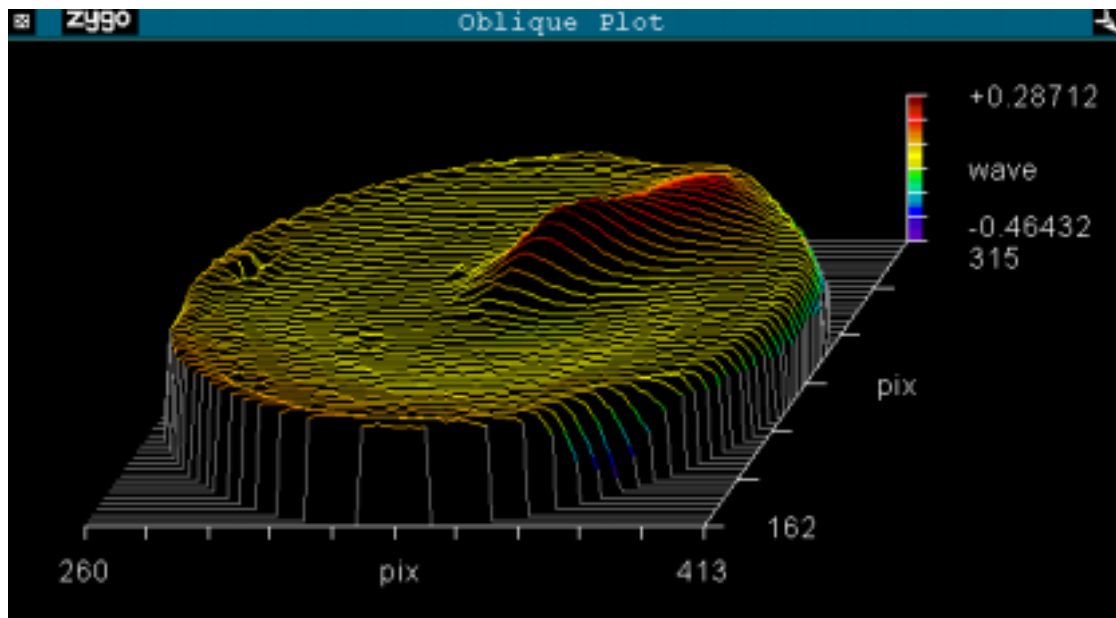


圖 5-29 Lens5 之下表面品質檢測結果

接著進行無硬膜層碳化鎢合金模仁拋光後表面品質檢測，結果如表 5-20 所示，而壓印成品表面品質檢測結果如表 5-21 所示，從表中可看出壓印成品其表面品質不差，可比照干涉條紋與三維的表面輪廓結構圖，如圖 5-30 所示，若非受到析出物的影響，則可達成一定的亮面。

表 5- 20 上、下模仁（碳化鎢合金）拋光後表面品質檢測結果

| 表面品質 | | 過程 | 拋光後 |
|-------|-----------------|-----------------|------|
| | | 上模仁 | 形狀精度 |
| 表面粗糙度 | 0.027λ (17nm) | | |
| 下模仁 | 形狀精度 | 0.148λ (93nm) | |
| | 表面粗糙度 | 0.020λ (13nm) | |

表 5- 21 Lens6 表面品質檢測結果

| 表面品質 | | 透鏡編號 | Lens6 (圖 5-12) |
|-------|-----------------|-------------------|------------------|
| | | 上面 | 形狀精度 |
| 表面粗糙度 | 0.042λ (26nm) | | |
| 下面 | 形狀精度 | 0.411λ (0.26μm) | |
| | 表面粗糙度 | 0.037λ (23nm) | |

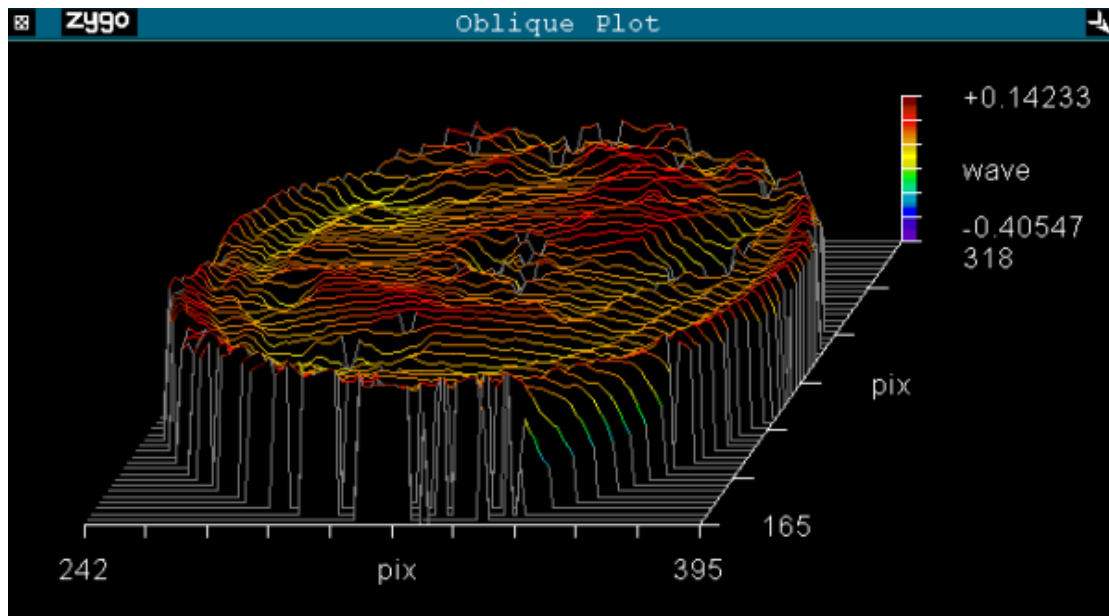


圖 5- 30 Lens6 之上表面品質檢測結果

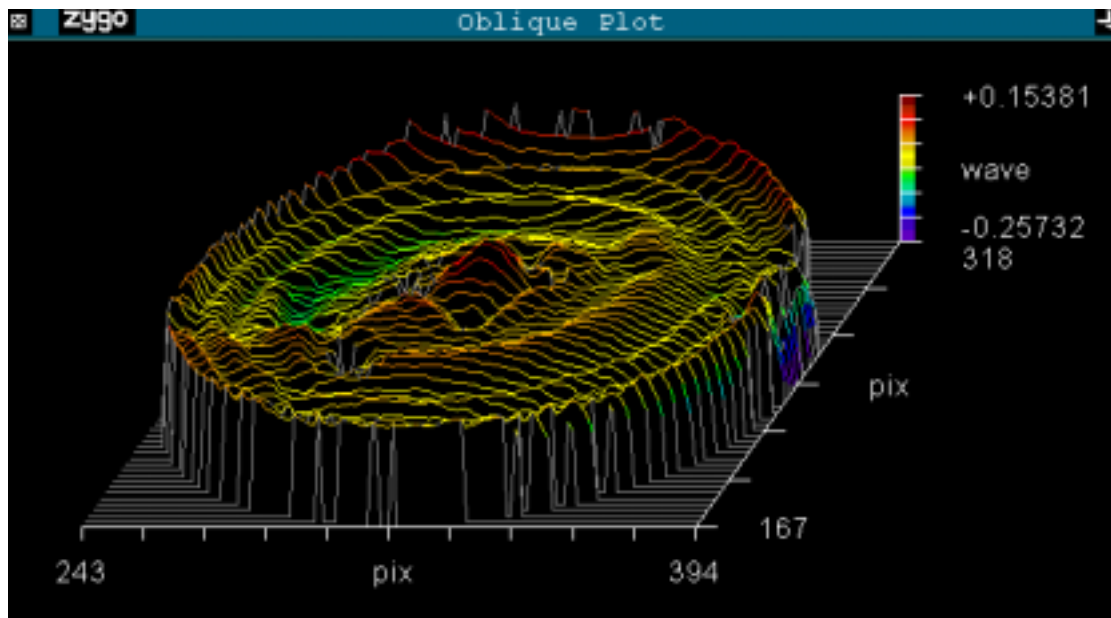
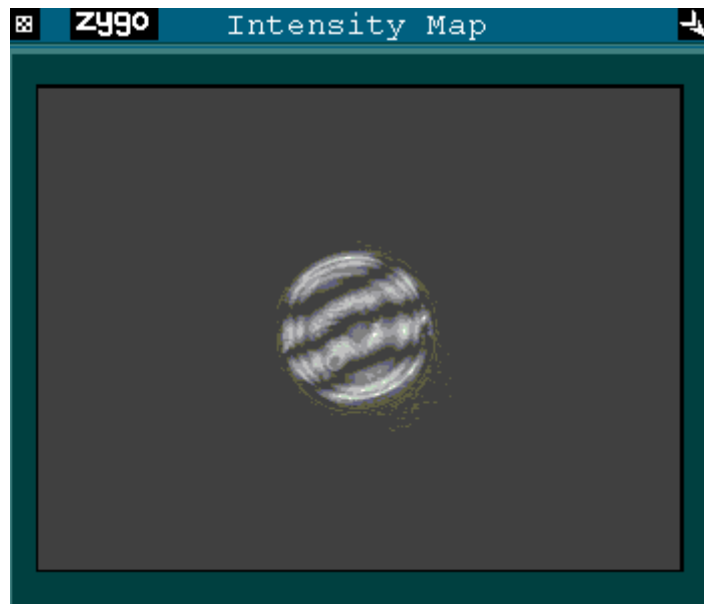


圖 5- 31 Lens6 之下表面品質檢測結果

5.4.5 表面品質檢測結果與討論

經由上述表面品質檢測結果得知，可以得到以下幾點結論：

1. 模仁在拋光後鍍硬膜前與鍍硬膜後其形狀精度與表面粗糙度皆改變甚小，表示若在模仁拋光後可擁有良好表面品質，則在模仁鍍硬膜後可維持一定的品質。
2. 經由開放式模具與密閉式模具實驗後，可得知玻璃在密閉式模具實驗其充填性良好，若能克服模仁沾黏玻璃問題，則壓印成品將可符合高形狀精度要求。
3. 壓印成品符合中形狀精度要求，其值介於 $1/4\lambda\sim\lambda$ ($0.158\sim0.632\mu\text{m}$) 之間。
4. 由表面品質檢測結果得知，在熱壓成形過程中，模仁轉印性良好。



第六章 結論與未來展望

熱壓成形實驗為目前生產光學玻璃透鏡之主要發展技術，相較於傳統製造技術，有其優勢及研究必要性，經由本實驗之研究成果，進行總結與歸納，將在本章節作一結論，也針對本研究之未來展望進行探討。

6.1 結論

本實驗依照玻璃預型體的取得分為兩實驗，分別為自行製作平平、凸凸預型體的開放式模具實驗及商用預型體（玻璃球）的密閉式模具實驗，綜括兩實驗結果與討論，可整理出以下幾點結論：

1. 模仁在鍍硬膜前必須有良好的表面品質，才有利於模仁在鍍硬膜後表面品質的維持，且由本實驗結果得知，模仁在熱壓成形過程中，其轉印性良好，因此，若能掌握模仁鍍硬膜前表面品質，則將可易於控制產品精度要求。
2. 硬膜層的技术將絕對影響壓印成品的結果。本實驗嘗試使用不同硬膜層材料，但皆造成模仁沾黏玻璃現象，影響其表面品質，因此若能擁有良好的鍍硬膜技術，並配合適當之製程參數（例如真空狀態，較短之升、降溫時間），相信將能提高硬膜層壽命，增加壓印次數，並維持壓印成品品質。
3. 壓印時間的掌握。經由本實驗密閉式模具實驗結果可以得知，壓印時間的長短將影響壓印成品的品質，壓印時間長則增加硬膜層與預型體的反應，降低硬膜層的壽命；壓印時間過短則充填性不佳，因此壓印時間的掌握成為熱壓成形參數的重要關鍵。

4. 無硬膜層碳化鎢合金模仁雖然在壓印過程中不會造成模仁沾黏玻璃現象，但由於壓印成品會有黃色析出物的產生，影響其表面品質，因此若能克服此問題，將可節省鍍硬膜的時間及成本的考量。
5. 玻璃預型體的幾何外形。本研究開放式模具實驗採用自行製作預型體，雖然可以研磨、拋光技術製作出接近商用預型體外形，但其側面不均勻桶狀外形（barrel）仍需定心作業來解決，且壓印成品容易造成偏心問題，但密閉式模具實驗採用商用預型體（玻璃球），便可解決以上缺點，因此對於光學玻璃透鏡之熱壓成形實驗而言，依然必須使用商用預型體，也可節省自行製作的人力與時間成本。
6. 經由本研究開放式模具與密閉式模具實驗結果與討論後，得到壓印成品符合中形狀精度要求，若能解決模仁沾黏玻璃問題，將可達成高形狀精度水準。



6.2 未來展望

1. 機台設備的改良。本實驗現階段工作環境並非真空狀態下，因此對於熱壓成形而言，將有一定的氣體與污染反應造成其影響。而目前以加熱棒（Heater）方式進行加熱，加熱至 586 時間約為 10 分鐘，若改用高瓦數紅外線短波電熔石英管方式加溫，則加溫時間約為 1 分鐘，可有效減少製程時間。另外在降溫方面，由於本設備採用自然降溫方式並無其它輔助設備進行降溫動作，因此降溫時間幾乎佔掉整體製程時間，若在降溫過程中可充入氮氣輔助降溫，將可大幅縮短製程時間，且可減少壓印成品在等待降溫過程中與模仁反應時間。
2. 表面品質的提升。本實驗壓印成品符合中形狀精度之要求，若想

提升至高形狀精度，則在模仁拋光後其形狀精度必須有更高的要求。

3. 本實驗目前以適用之模仁與硬膜層組合為主進行熱壓成形實驗，並對產品有精度要求，未來將安排完善系列之實驗規劃，進行熱壓成形實驗。
4. 硬膜層鉑銱 (Pt-Ir) 的使用。本實驗嘗試使用硬膜層鉑銱 (Pt-Ir) 進行熱壓成形實驗，但由於研究後期才進行此實驗，加上時間的限制，因此無法製作出良好的硬膜層，導致壓印成品不佳。根據文獻的參考得知，硬膜層鉑銱 (Pt-Ir) 對於熱壓成形技術而言擁有許多優良的特性，因此日後將持續與儀科中心合作，研發此硬膜層最佳製程條件，提供熱壓成形實驗關鍵技術。
5. 經由本實驗結果得知，在熱壓成形過程中，模仁其轉印性（表面粗糙度）良好，但由於在壓印後降溫過程中，受到溫差的影響，因此其形狀精度將受到改變，因此將在未來進行模仁修正補償。
6. 非球面透鏡的應用。非球面透鏡的製作，以熱壓成形實驗最為適合（相較於研磨、拋光技術），本研究現階段以成形球面透鏡為主，未來將進行非球面透鏡之熱壓成形設計與實驗。

參考文獻

- [1] M. Hecke, "Hot embossing – The molding technique for plastic microstructures," *Microsystem Technologies*, pp. 122–124, 1998.
- [2] Koro Shishido, Masao Sugiura, and Tetsuo Shoji, "Aspect of glass softening by master mold," *Proceedings of SPIE*, v. 2536, pp. 421-433, 1995.
- [3] 游智勝, 「玻璃基材微流道之熱壓成形製程」, 2002 奈米工程暨微系統技術研討會/國科會微機電系統成果發表會。
- [4] 王興邦, *玻璃微熱壓之成形特性研究*, 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 2002 年 6 月。
- [5] 黃建溢, *光學玻璃球面透鏡熱壓成形研究*, 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 2004 年 6 月。
- [6] Allen Y. Yi and Anurag Jain "Compression molding of aspherical glass lenses-a combined experimental and numerical analysis" *Journal of the American Ceramic Society*, pp. 579-586, 2005.
- [7] 邱標麟 編譯, *玻璃製造學*, 復文書局, 2002 年。
- [8] <http://www.oharacorp.com/main.html>
- [9] <http://www.itrc.org.tw>
- [10] *精密光學製造技術應用研討會講義*, 財團法人國家實驗研究院

儀器科技研究中心，2005 年。

- [11] Chris Hall, Marc Tricard, Hiroshi Murakoski, Yoshihiro Yamamoto, Kunitaka Kuriyama and Hiroyoshi Yoko “New mold manufacturing techniques” Proceedings of SPIE, v. 5868, pp.1-10, 2005.
- [12] Shigeru Hosoe and Yoshiharu Masaki “High-speed glass-molding method to mass-produce precise optics” Proceedings of SPIE, v. 2576, pp.115-120, 1995.
- [13] 光學元件製作與檢測技術講義，行政院國家科學委員會精密儀器發展中心，2004 年。

