

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

以鎳鈷合金電鑄模仁進行
光學玻璃微結構熱壓成形研究
Microstructure Hot Embossing on Optical Glass
using electroformed NiCo alloy mold

研究生：王麒翔

指導教授：洪景華 教授

中華民國九十八年六月

以鎳鈷合金電鑄模仁進行
光學玻璃微結構熱壓成形研究

Microstructure Hot Embossing on Optical Glass
using electroformed NiCo alloy mold

研究生：王麒翔

Student : Chi-Shiang Wang

指導教授：洪景華

Advisor : Chinghua Hung



A Thesis
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

中華民國九十八年六月

以鎳鈷合金電鑄模仁進行 光學玻璃微結構熱壓成形研究

研究生：王麒翔

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

玻璃熱壓成形法為近年來逐漸受重視的玻璃光學元件製造技術，由於其擁有低成本且品質穩定的優點，因此廣為應用在球面與非球面透鏡的製作上。除此之外，利用相同概念，透過製作微結構於模仁表面，進行玻璃微熱壓轉印，以大量製造具有特殊光學功能之玻璃微結構元件，為將來光學元件製程技術的重要發展目標。

本研究嘗試使用電鑄鎳鈷合金作為模仁材料，製作結構間距 $250\mu\text{m}$ 和 $500\mu\text{m}$ ，結構深度皆在 $10\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 之間的兩種菲涅爾光學微結構於模仁表面，並搭配光學玻璃型號 K-PSK100 之材料試片，進行玻璃微結構熱壓實驗，探討實驗參數與成形性之間的關係，並成功製作出具有初步光學效果之光學玻璃微結構透鏡。

Microstructure Hot Embossing on Optical Glass using electroformed NiCo alloy mold

Student : Chi-Shiang Wang

Adviser : Dr. Ching-hua Hung

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

Hot embossing of optical glass is a gradually emphasized technique for optical elements fabrication in recent years. It is generally used to manufacture spherical and aspherical lenses with the advantages of low-cost and stable quality. Besides, the same technique is applied to mass produce microstructure optical glass elements by the molds with microstructure surface. Therefore, it is an important goal in optical element fabrication.

In this research, electroformed NiCo alloy was used for mold material. Then the research tried to replicate two kinds of optical structures with the pitch of 250 μm and 500 μm , and both the depth were 10 μm ~100 μm . The optical glass used for microstructure hot embossing experiment was K-PSK100. Several experiment parameters and effects on the microstructure hot embossing experiments were examined and discussed.

誌謝

終於也輪到我寫致謝啦!第一個要感謝的是指導教授洪景華老師，老師不管在做人處事或是嚴謹的研究態度上，都是我這兩年來的學習榜樣，並且給予我許許多多的指導，能夠進入老師的門下學習並完成碩士學歷，是我這兩年來最正確的選擇；並且感謝口試委員蘇德欽教授、賀陳弘教授、以及陳仁浩教授在論文內容以及方向上不吝給予意見。

在完成這本論文的路上，我接受到的幫助真的太多太多了，包括國研院儀科中心蔣副主任、黃國政組長、黃建堯學長、曾釋鋒學長、李昭德學長、郭朝輝學長、還有玻璃工廠的大姐們和機械工廠的大哥們，謝謝你們在我研究之路上的指導與幫助。還有實驗室的學長們，最感謝的是一直以來一路相挺的彥彬學長，能跟著你一起做研究與探討實驗結果，實在讓我在很多地方都有很深的收穫與感觸；以及實驗室的學長們：一直都很有氣勢的洪榮崇學長、搖滾樂專家的宇中學長、英文很好而且酷酷的政成學長、很有大老闆味道的煌綦學長、不只會賣魚還一直被正妹倒追的正展學長、穩重給人安心感的麒禎學長、動漫專家銘傑學長、進實驗室兩年我還沒找到破綻的黃詠學長、認真又很照顧學弟的志嘉學長、組電腦神人世璿學長、把妹與聯誼之王的俊羿學長、運賢學長；和兩年中一起熬夜寫作業、趕報告、準備期中期末考的好戰友：聯誼班底建榮、交大足球校門時恆、運動股長聖平；還有實驗室的學弟們：做事超有效率又很有衝勁的忠諭、講

話很有笑點的立釗、抱著薩克斯風夢想的筱偉、異於常人認真的正一、以及魔獸世界的 Uber 宗鎔。

這兩年的研究生活認識太多各式各樣的人，我很感激自己有這樣的運氣遇見大家，並且學習到很多不同的優點與生活方式。還要感謝女友紹君一路上的相陪與扶持；最後我要感謝父母與家人的支持，讓我在經濟上無後顧之憂的完成碩士學業，真的很謝謝大家！



目錄

摘要	I
ABSTRACT	II
誌謝	III
目錄	V
表目錄	VIII
圖目錄	X
第一章緒論	1
1.1 前言	1
1.2 光學鏡片與菲涅爾透鏡簡介	2
1.2.1 光學鏡片的功用	2
1.2.2 菲涅爾透鏡簡介	3
1.2.3 光學鏡片與光學微結構透鏡製造方法	4
1.3 文獻回顧	8
1.4 研究動機與目的	14
1.5 研究方法	14
1.6 論文內容介紹	15
第二章光學玻璃介紹	16
2.1 光學玻璃的成分與種類	16

2.1.1 光學玻璃的成分	16
2.1.2 光學玻璃的種類	16
2.2 光學玻璃之光學性質	18
2.2.1 折射率(Refractive Index)	18
2.2.2 色散(Dispersion)	19
2.2.3 透明度(Transmittance)	19
2.2.4 光學玻璃之其他性質	20
2.3 玻璃的轉移現象	20
2.4 本研究採用的光學玻璃	22
第三章研究流程與初步實驗介紹	24
3.1 研究流程介紹	24
3.2 初步實驗設備介紹	26
3.2.1 加熱與溫控系統	26
3.2.2 油壓系統	30
3.2.3 真空與氣體環境系統	31
3.3 模仁材料選擇	33
3.3.1 碳化鎢材料介紹	33
3.3.2 玻璃碳(Glassy Carbon)材料介紹	35
3.3.3 電鑄鎳鈷合金簡介	37



3.4 微結構製作方式	38
3.4.1 微放電加工碳化鎢與玻璃碳材料	38
3.4.2 電鑄翻模鎳鈷合金微結構模仁	42
3.5 初步微結構熱壓實驗	46
第四章 微結構熱壓成形研究	54
4.1 模仁鍍鉑鈱硬膜層介紹	54
4.2 微結構熱壓實驗	56
4.2.1 微結構熱壓實驗設備介紹	56
4.2.3 電鑄鎳鈷合金材料高溫耐熱實驗	63
4.2.4 電鑄鎳鈷合金模仁高溫沾黏實驗	65
4.2.5 電鑄鎳鈷合金微結構模仁熱壓實驗	68
4.2.6 製作 pitch=0.5mm 之 Fresnel 微結構模仁進行熱壓實驗	76
4.3 實驗結果歸納與分析	89
4.3.1 實驗結果歸納	89
4.3.2 實驗量測誤差分析	91
第五章 結論與未來展望	94
5.1 結論	94
5.2 未來展望	96

參考文獻.....	97
附錄 A 玻璃碳加熱與熱壓實驗.....	101
附錄 B 熱壓實驗模仁夾具設計.....	108
附錄 C 模仁剖面與白光干涉儀量測.....	110
附錄 D 微結構熱壓實驗參數一覽表.....	113

表目錄

表 1.1 光學玻璃透鏡與光學塑膠透鏡之比較表[3].....	7
表 1.2 玻璃熱壓微結構文獻整理表.....	13
表 2.1 L-BAL42 與 K-PSK100 光學玻璃材料性質表.....	23
表 3.1 碳化鎢材料性質.....	34
表 3.2 玻璃碳的性質[25].....	36
表 3.3 初步玻璃微熱壓轉印性實驗參數.....	46
表 3.4 模仁材料與微結構加工方法優缺點整理表.....	53
表 4.1 玻璃熱壓用模具之硬膜特性比較[28].....	56
表 4.2 鎳鈷合金材料耐熱實驗.....	64
表 4.3 電鑄鎳鈷合金鍍 Pt-Ir 高溫沾黏實驗參數表.....	66
表 4.4 高溫沾黏實驗實驗結果.....	67
表 4.5 玻璃微結構熱壓-壓力實驗參數表.....	68

表 4.6 微結構壓印力實驗結果-表面形貌觀測.....	70
表 4.7 壓印力實驗結果輪廓量測.....	71
表 4.8 壓印力 100N，加壓行程 4.5mm 熱壓實驗結果.....	73
表 4.9 熱壓實驗前後模仁比較.....	75
表 4.10 pitch=0.5mm 微結構模仁熱壓實驗固定之參數表.....	79
表 4.11 微結構熱壓實驗-壓印力(1).....	81
表 4.12 微結構熱壓實驗-壓印力(2).....	82
表 4.13 微結構熱壓實驗-熱壓溫度.....	83
表 4.14 微結構熱壓實驗-保壓時間.....	84
表 4.15 微結構熱壓實驗-加壓行程.....	85
表 4.16 微結構熱壓實驗-熱壓溫度(加壓行程固定).....	86
表 4.17 pitch=0.5mm 模仁熱壓實驗前後比較表.....	88
表 4.18 熱壓實驗前後模仁微結構變形量比較表.....	89
表 A.1 玻璃碳的性質[25].....	102
表 A.2 光學玻璃 L-BAL42 材料性質表.....	103
表 A.3 玻璃碳模仁和 42 玻璃試片加熱實驗結果.....	105
表 A.4 真空環境玻璃碳模仁熱壓 L-BAL42 實驗參數.....	105
表 A.5 真空環境玻璃碳模仁熱壓 42 玻璃試片實驗結果.....	106
表 A.6 真空中玻璃碳模仁熱壓 42 玻璃氮氣降溫實驗.....	107

表 C.1 白光干涉儀量測結果112

圖目錄

圖 1.1 典型 Fresnel 透鏡結構圖3

圖 1.2 Fresnel 透鏡實圖4

圖 1.3 光學微結構熱壓成形流程圖8

圖 2.1 OHARA 公司模造玻璃用光學玻璃18

圖 3.1 研究流程圖25

圖 3.2 加熱爐構造示意圖27

圖 3.3 加熱爐外觀圖27

圖 3.4 紅外線加熱燈管28

圖 3.5 熱電偶28

圖 3.6 溫度控制器29

圖 3.7 功率調整器29

圖 3.8 加熱與溫度控制示意圖30

圖 3.9 油壓系統示意圖31

圖 3.10 氮氣鋼瓶配置圖32

圖 3.11 真空幫浦32

圖 3.12 碳化鎢模仁外觀圖34

圖 3.13 玻璃碳外觀圖36

圖 3.14 電鑄設備外觀圖	38
圖 3.15 微放電加工原理示意圖	39
圖 3.16 微放電機台外觀圖	40
圖 3.17 微放電機台電極與工件放大圖	40
圖 3.18 放電加工於玻璃碳模仁表面顯微鏡圖	41
圖 3.19 放電加工於碳化鎢表面顯微鏡圖	42
圖 3.20 STAVAX 模仁	43
圖 3.21 STAVAX 模仁規格	43
圖 3.22 STAVAX 模仁 Fresnel 結構規格	44
圖 3.23 電鑄翻模鎳鈷合金模仁	44
圖 3.24 表面粗度輪廓儀外觀圖	45
圖 3.25 pitch=0.25mm 之電鑄模仁不同方向對稱性比較圖	45
圖 3.26 玻璃微結構熱壓實驗步驟	46
圖 3.27 實驗後鎳鈷合金模仁	47
圖 3.28 玻璃熱壓微結構成品	47
圖 3.29 鎳鈷合金模仁實驗前顯微鏡圖	48
圖 3.30 鎳鈷合金模仁實驗後顯微鏡圖	48
圖 3.31 玻璃微熱壓成品	49
圖 3.32 實驗前鎳鈷合金模仁表面輪廓粗度儀量測	49

圖 3.33 實驗後鎳鈷合金模仁表面輪廓粗度儀量測	49
圖 3.34 玻璃微熱壓成品表面輪廓粗度儀量測	50
圖 3.35 實驗前模仁、實驗後模仁與玻璃成品輪廓圖比較.....	51
圖 4.1 微結構熱壓實驗設備加熱系統外觀圖	57
圖 4.2 微結構熱壓實驗設備控制系統外觀圖	57
圖 4.3 實驗設備燈管與擠桿配置外觀圖	58
圖 4.4 燈座與擠桿相對位置外觀圖	59
圖 4.5 微結構熱壓實驗夾具設計示意圖	60
圖 4.6 微結構熱壓實驗模仁夾具外觀圖	60
圖 4.7 微結構熱壓實驗模仁夾具組裝示意圖	60
圖 4.8 碳化鎢平面拋光模仁組裝外觀圖	61
圖 4.9 觸控面板控制	61
圖 4.10 壓印力控制顯示器	62
圖 4.11 上下模仁溫度控制顯示器	62
圖 4.12 微結構熱壓實驗流程圖	63
圖 4.13 高溫沾黏實驗用鍍 Pt-Ir 之鎳鈷合金模仁	65
圖 4.14 K-PSK100 玻璃試片	66
圖 4.15 玻璃在熱壓過程與夾具沾黏示意圖	69
圖 4.16 玻璃試片邊緣與夾具沾黏	69

圖 4.17 使用金屬墊片進行控制加壓形成實驗示意圖.....	72
圖 4.18 Fresnel 結構之凹透鏡光學效果	74
圖 4.19 微結構實驗後模仁破裂外觀圖	75
圖 4.20 微結構熱壓實驗模仁夾具預留間隙示意圖	76
圖 4.21 pitch=0.5mm 之電鑄母膜外觀與微結構點資料	77
圖 4.22 電鑄完成(pitch=0.5mm)鎳鈷合金模仁外觀圖	78
圖 4.23 pitch=0.5mm 模仁結構對稱性比較圖	78
圖 4.24 pitch=0.5mm 模仁結構複製性比較圖	78
圖 4.25 夾具熱膨脹擠壓模仁示意圖	89
圖 4.26 具有聚光效果之實驗成品	91
圖 4.27 pitch=0.25mm 模仁設計與量測比較圖	92
圖 4.28 pitch=0.5mm 模仁量測與設計比較圖	93
圖 A.1 玻璃碳加熱實驗流程圖	101
圖 A.2 玻璃碳熱壓實驗流程圖	101
圖 A.3 玻璃碳外觀	102
圖 A.4 L-BAL42 玻璃試片外觀圖	103
圖 B.1 微結構熱壓實驗模仁夾具尺寸圖(mm).....	108
圖 B.2 微結構熱壓實驗模仁夾具-墊片尺寸圖(mm).....	109
圖 C.1 線切割剖面模仁顯微鏡觀測圖.....	110

圖 C.2 剖面與輪廓儀量和設計值比較.....111

圖 C.3 白光干涉儀量測圖112



第一章緒論

1.1 前言

近年來由於光電與高科技產業的蓬勃發展，光學元件（如透鏡、反射鏡、稜鏡、濾光片）的需求量也快速成長，在此種供不應求的情況下，發展低成本量產的製程技術成為當今光學產業中重要的一環。

光學鏡片材質分為玻璃與塑膠兩種，由於塑膠鏡片可藉由射出成形法大量製造，所以有加工成本低廉的優勢，但在高階光學器材所需求性質中，如高折射率、低色散等光學性質，則是玻璃材料才擁有的優點，再加上玻璃材料具有耐高溫、高穩定性等物理與化學性質，使得玻璃材料在高精度光學元件中保有不可取代的地位。1896

除了球面與非球面透鏡，光學元件還包含了在表面加工光學微結構的應用，例如應用繞射原理的菲涅爾（Fresnel）結構和繞射光柵結構等，都是光學鏡片中很重要的應用。玻璃材料雖較塑膠材料有良好的光學解析度、光穿透率、熱穩定性等優點，但玻璃材料表面加工不如塑膠材料容易且成本耗費較高，使得目前光學微結構多應用於光學性質較差的塑膠材料。

玻璃熱壓成形法為近年來逐漸受重視的玻璃光學元件製造技術，由於其擁有低成本且品質穩定的優點，因此廣為應用在球面與非球面透鏡的製作上。除此之外，利用相同概念，透過製作微結構於模仁表面，進行玻璃

微熱壓轉印，以大量製造具有特殊光學功能之玻璃微結構元件，為將來光學元件製程技術的重要發展目標。

1.2 光學鏡片與菲涅爾透鏡簡介

光學鏡片大量運用在國防科技、工業技術、民生用品，其主要功能為聚焦、準直、反射、折射及成像等，以下將介紹光學鏡片與表面微結構具有聚焦功能的菲涅爾透鏡。

1.2.1 光學鏡片的功用

光學鏡片主要功能為聚焦、準直、反射、折射及成像等，若依用途區分，大致可分為下列四種：

1. 透鏡 (Lens)：用於光波前 (Wavefront) 或聚焦，藉由透鏡本身之收斂與發散的特性，能使物體生成實像與虛像，加工時著重於外型尺寸與曲率的控制。
2. 反射鏡 (Mirror)：用於改變光路的方向，由於反射鏡會產生兩倍於其曲率角度的變化，故加工時精度會要求比透鏡還高。
3. 稜鏡 (Prism)：透明角柱狀光學元件，至少具有兩面拋光面可提供光束之分光、集光或改變光路的方向，稜鏡的加工重點在於兩相鄰界面角度的精度。
4. 光柵 (Grating)：在透明或不透明的光學元件上刻畫出均勻條狀間隔之繞射光柵結構，用於將不同波長的光束分離。

1.2.2 菲涅爾透鏡簡介

菲涅爾透鏡(Fresnel lens)為一種光學元件，原理為將傳統透鏡等分成數個區域，將每個區域的中心厚度部分去除，保留表面的曲率，達成不失原本透鏡的聚焦性質下並削減光學元件厚度的目的。圖 1.1 即為典型 Fresnel 透鏡結構圖，圖 1.2 為 Fresnel 透鏡實圖。

工業上利用 Fresnel 透鏡重量輕巧，效率高，製作容易，和功能多樣化之優點，將其用於燈塔探照燈、投影機、汽車大燈燈罩...等元件上面。[1]

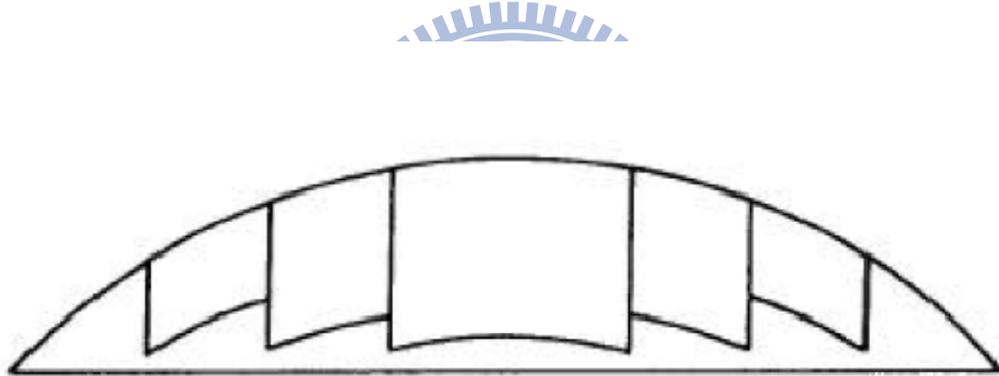


圖 1.1 典型 Fresnel 透鏡結構圖[1]



圖 1.2 Fresnel 透鏡實圖[2]

1.2.3 光學鏡片與光學微結構透鏡製造方法

光學鏡片的製造主要是以透光性佳的光學材料為主，常見的光學材料有兩種；由高分子材料所製成的光學塑膠鏡片和由玻璃材料所製成的光學玻璃透鏡。

由高分子材料所製成的光學塑膠鏡片製造方式以鑄形法(Casting)、熱壓成形法(Hot Embossing)、射出成形法(Injection Molding)、射出壓縮成形法(Injection Compression Molding)等技術為主，因其製造成本低廉，常用於使用條件與光學品質要求較低的產品中。

玻璃透鏡較塑膠透鏡於光學性質中有較好的光學解析度、可見光穿透

率等特性，於機械性質也有較佳之耐磨損、耐高溫、耐潮濕、抗靜電等優點，但是相較於高分子材料，玻璃材料由於具有較高的成形溫度與硬度等特性，使得玻璃鏡片的製造成本與技術都比光學塑膠鏡片來的高出許多，因此目前玻璃材料多用於高階之精密光學設備為主。表 1.1 為光學玻璃透鏡與光學塑膠透鏡之比較[3]。

在光學玻璃微結構元件方面，現今製造方法有超精密輪磨與玻璃微熱壓成形法兩種，前者因為成本高昂使得量產不易；而玻璃微熱壓成形法雖具有可量產化、成本降低和生產品質穩定等優勢，但微結構熱壓技術尚處於發展階段，業界中也僅見結構尺度在 1mm 以上的光學結構元件生產，因此若能利用玻璃微熱壓成形法製作出結構尺度更小且成本更為低廉、品質優良之光學玻璃微結構元件，將可使得玻璃微熱壓成形法的發展成為未來大量製造光學玻璃微結構元件之關鍵技術，並使得低階之光學設備也有機會使用到光學品質較佳之玻璃材料元件。

玻璃微熱壓成形法是將玻璃預形體加熱軟化，再利用具有高精度表面形狀或擁有光學微結構的成形模具加壓轉寫製成所需外形之光學玻璃鏡片；其成形過程是將模仁與玻璃預形體加熱至熱壓溫度（通常為超過玻璃轉移點之一特定溫度）後由上下模仁加壓成形，經過保壓與降溫後取出鏡片成品，微熱壓成形流程圖如圖 1.3 所示。玻璃微熱壓成形技術具有材料流動距離短、成形精度高、設備簡單等特性，任何一種製程所製作出來的模仁

皆能經由微熱壓成形技術來達到批量複製的目的，以降低鏡片生產成本及穩定品質。

雖然玻璃微熱壓成形法有上述之眾多優點，但是表面擁有光學微結構之模仁取得不易。模仁必須加工容易且熱穩定性高，由於光學元件表面品質要求極高，所以在加工方式的選用，以機械加工為例，必須使用超精密加工機等級之加工設備才能同時加工微結構並得到良好之表面品質。因此光學微結構熱壓成形比起不需加工表面結構之玻璃透鏡熱壓成形，不只在於模仁取得難度更高，在微結構尺度的考量下，製程參數的選取也顯得較為困難。

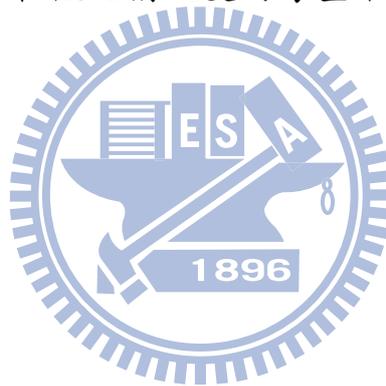


表 1.1 光學玻璃透鏡與光學塑膠透鏡之比較表[3]

特性 \ 材料	光學玻璃透鏡	光學塑膠透鏡
折射率	1.5~1.9 以上	1.3~1.7
色散率(v_d)	20~65 以上	25~55
雙折射	不產生雙折射	會產生雙折射
全光線透過率(%)	85~95	90 以上
光譜範圍	370~1500nm 以上	400~1100nm
玻璃轉移溫度 (T_g)	500~700°C	70~130°C
線性膨脹係數($10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)	70~130	(約為玻璃的 10 倍)
比重	2.2~7.3	1.0~1.5

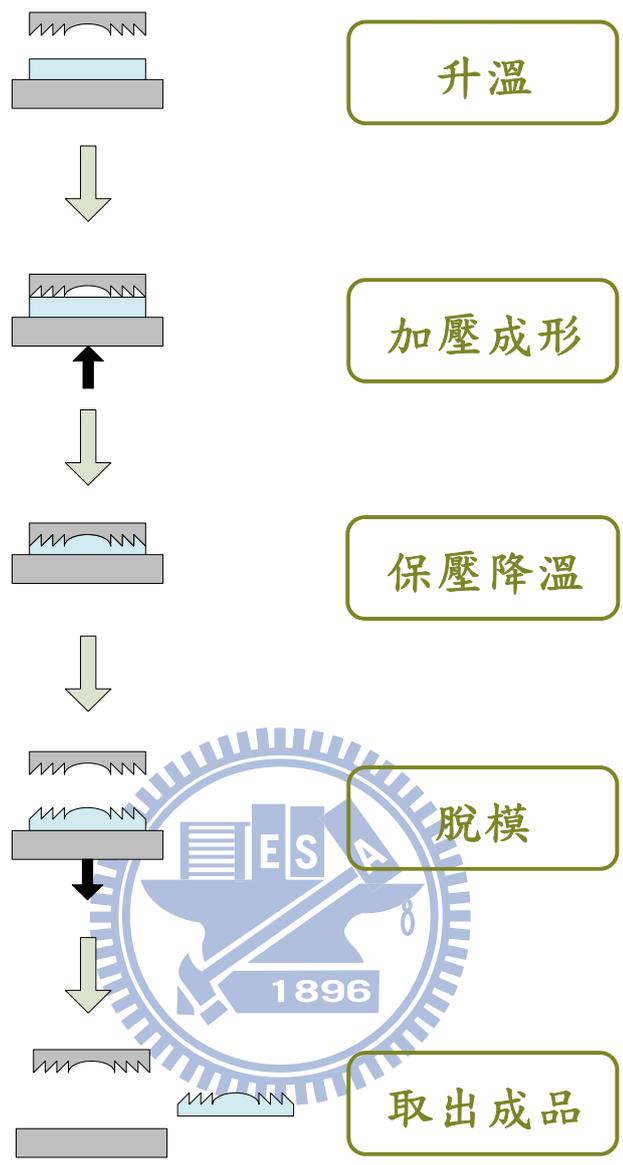


圖 1.3 光學微結構熱壓成形流程圖

1.3 文獻回顧

球面與非球面透鏡製作，模仁與玻璃沾黏性相關文獻介紹：

黃[4]以 FCD1 光學玻璃做為熱壓實驗的材料，採用平面透鏡成形球面透鏡，依照實驗中所設定的壓印力與保壓時間等參數，對巨觀的幾何外形需求而言，以經過加工後之平面透鏡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。

王[5]透過自行製作之 S-FPL53 光學玻璃材料預形體與 L-BAL42 商用預形體做為實驗材料，進行熱壓成形實驗，發現模仁在鍍硬膜前必須有良好的表面品質，才有利於鍍膜後表面品質以及產品精度的維持，且硬膜層技術將絕對影響成品的結果。

林[6]以 L-BAL42 球狀光學玻璃預形體作為熱壓實驗的材料，使用可在真空環境下熱壓成形之設備進行實驗，成功解決硬膜層易脫落、劣化失效及與玻璃產生沾黏、表面反應等情形，並探討不同硬膜層在熱壓成形時的差別。



玻璃熱壓微結構相關文獻介紹:

Fireston[7]等人設計玻璃熱壓實驗設備，以製程控制與量測為目標，開發出可充氮氣環境的熱壓成形設備，可精確達到位移、荷重、溫度等參數之控制，並可應用於微透鏡陣列的成形上。

Youn[8~12]等人選用玻璃碳(Glassy Carbon)材料當作模仁進行派瑞斯(Pyrex)玻璃與石英玻璃的微結構熱壓實驗，並利用離子束加工法(FIB)、飛秒脈衝雷射加工法、機械加工法(Dicing)等方法加工各種不同微結構於玻璃碳模仁表面，進行微結構熱壓轉印之研究，探討熱壓成形後表面品質與填

充度之轉印結果。

Saotome[13]等人使用光學玻璃 K-PSK100 與 K-PG375 (T_g 點分別為 390°C 與 343°C)，在 T_g 點到 T_g 點+30°C 的溫度範圍條件下進行壓縮實驗，得到不同溫度下的真實應力(True Stress)與應變率(Strain Rate)的關係，在應力與應變率的圖形上可得知應變率敏感性(Strain Rate Sensitivity)等於 1，證實了在該溫度區間玻璃可視為牛頓黏滯流(Newtonian Viscous Flow)，亦即表示黏度係數(Viscosity Coefficient)為一常數；再以單晶矽為模仁進行 V 形溝槽的模造實驗，實驗結果發現由於 V 形溝槽的尖角與溝槽表面粗糙度的因素，導致玻璃無法完整的填充模穴。

王[14]以陣列式 V 形槽結構，寬 50μm，深 25μm，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。

Mekaru[15][16]等人使用電鑄非結晶鎳磷(Ni-P)合金作為模仁，進行派瑞斯(Pyrex)玻璃的微熱壓實驗，並探討模仁經過熱處理後，對於玻璃微熱壓實驗的影響。

Yasui[17]等人使用鎳鎢(Ni-W)合金作為微熱壓玻璃之模仁，利用離子束加工法(FIB)加工寬度 0.4μm 的溝槽結構於模仁上，進行型號 D263 硼玻璃的微熱壓轉印實驗，探討使用離子束加工法於 Ni-W 模仁對於熱壓玻璃微結構轉印結果之影響。

Chen[18]等人選用 P-SK57 玻璃材料，利用熱壓玻璃製程搭配 reflow 製程成形玻璃微透鏡陣列，發現影響透鏡表面形狀最重要參數為再熱溫度與持溫時間。其研究亦搭配數值模擬法模擬 reflow 過程，探討製程參數對於微透鏡陣列成形的影響。

Komori[19]等人選用矽基板、玻璃碳等材料作為模仁，並在表面鍍上 TiN、CrN、化學沉積鑽石(CVD diamond)等硬膜層，進行 Pyrex、Tempax、BK7 三種玻璃材料之熱壓沾黏實驗，得到 CVD diamond 鍍膜在沾黏測試有良好表現，後續實驗探討熱壓矩形微結構轉印的現象，得出矩形微結構轉印的填充性與結構最短邊之大小成正比的結論。

Chen[20]等人將光阻層 SU8-2025 塗抹在矽基板上，利用超精密車削 3D 微結構於光阻層上，最後用 RIE(Reactive Ion Etching)蝕刻出微結構於矽基板上，成功製作出有微結構的矽基板模仁，並經由熱壓實驗轉印微結構於玻璃上，證實其模仁微結構製作方法之可行性。

Suzuki[21]等人利用橢圓振動車削的方式加工微結構於鎢合金，並達成在加工深度未滿 $0.8\mu\text{m}$ 時，加工面不會有脆性的破裂情形發生，並利用製作出的鎢合金模仁進行編號 BK7 的光學玻璃之微熱壓實驗，轉印出有微結構之玻璃成品。

Yan[22]等人利用模擬與實驗兩階段式的單點鑽石車削於鎳磷合金表面，其中第一次的車削負責大部分的工件除料，第二次車削則在於毛邊與表面

品質的改善，成功製作出尺寸在 $10\mu\text{m}$ 的 V 溝與金字塔形微結構，最後在玻璃微結構熱壓實驗後證實其方法之可行性。

表 1.2 為上述玻璃熱壓微結構文獻有關模仁材料、模仁微結構加工方式、微熱壓玻璃材料之整理表。



表 1.2 玻璃熱壓微結構文獻整理表

作者	模仁材料	模仁微結構加工法	熱壓玻璃材料
Youn AIST [5~9]	Glassy Carbon	FIB(focused ion beam) Nano/femtosecond- pulsed laser Mechanical machining	Pyrex7740 (T _g =560°C) Quartz (T _g =1300°C)
Saotome Gunma University [13]	Si	Electron beam lithography and anisotropic etching	K-PSK100 (T _g =390°C) K-PG375 (T _g =343°C)
Mekaru AIST [15][16]	Ni-P alloy	FIB	Pyrex glass (T _g =560°C)
Yasui AIST [17]	Ni-W	FIB	Borosilicate glass, D263 (T _g =557°C)
Chen The Ohio State University [18]	Glassy Carbon	Cleanroom lithography-etching process	P-SK57 (T _g =493°C)
Komori Kyoto University [19]	CVD diamond	FIB	Pyrex 、BK7 (T _g =560°C) TEMPAX (T _g =525°C)
Chen The Ohio State University [20]	Si	RIE (Reactive Ion Etching)	
Suzuki Nagoya University [21]	Tungsten Alloy	Elliptical Vibration Cutting	BK7 (T _g =560°C)
Yan Tohoku University [22]	Electroless-pla ted NiP	Two-step micro cutting	

1.4 研究動機與目的

雖然玻璃熱壓成形技術有大量生產與品質穩定之特性，在成本與精度的考量上具有相當的優勢，但玻璃微結構熱壓成形相較於不需加工表面結構的玻璃透鏡熱壓則困難度高上許多，如模仁材料的選用，模仁材料上光學微結構的加工方法選用，和為了增加模仁壽命於其表面鍍膜之材料選用，都是需要克服的難題。

本研究目的在搜尋適用可加工光學微結構之模仁材料，製作出符合光學精度要求之模仁，再利用此模仁進行微結構熱壓成形實驗，達成有潛力量產光學微結構玻璃元件之目的，同時亦能控制產品之精度與加工時程。

1.5 研究方法

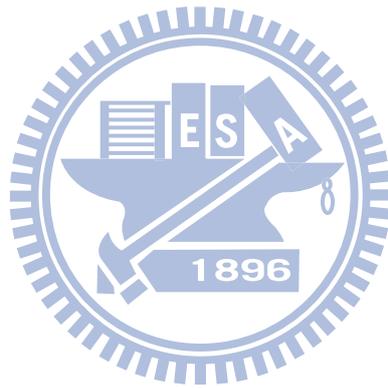
本研究為製作出尺寸與表面精度良好之光學微結構玻璃透鏡，並瞭解光學玻璃微熱壓製程參數對結構填充性與成形性之影響，將分成三個階段，第一階段參考現有玻璃熱壓微結構文獻，選出適當之模仁材料後，並嘗試不同加工方法製作微結構模仁，進行可行性評估。

第二階段為使用第一階段製作之模仁進行初步微結構熱壓實驗，由實驗結果評估成形溫度適合之玻璃材料進行後續微結構熱壓研究。

第三階段將運用前兩階段所得到之模仁與玻璃材料，進行不同實驗參數之光學玻璃微結構熱壓實驗，並於實驗後量測玻璃轉印之結構尺寸，探討實驗參數與微結構成形性之間的關係。

1.6 論文內容介紹

論文將以光學玻璃介紹(第二章)、研究流程與初步實驗介紹(第三章)、微結構熱壓成形研究(第四章)、結論與未來展望(第五章)等五個章節進行詳細介紹。



第二章光學玻璃介紹

2.1 光學玻璃的成分與種類

2.1.1 光學玻璃的成分

光學玻璃即為陶瓷材料(Ceramic Materials)中的非結晶陶瓷(Amorphous Ceramic)，係以離子鍵結(Ionic Bonding)或共價鍵結(Covalent Bonding)所組成的複雜化合物或固溶體，其主要成分為二氧化矽(SiO_2)及其他少量有機物如三氧化鋁(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，除了氧化鐵會使玻璃著色外，多數成分對玻璃的性質並無大損害。

2.1.2 光學玻璃的種類

目前國際上較知名的光學玻璃供應廠有日本小原光學(OHARA)、日本保谷光學(HOYA)、日本住田光學(SUMITA)、美國康寧(CORNING)、中國北方工業(NORINCO)、德國首德(SCHOTT)等公司，其中歷史最久的生產廠為德國首德公司；國內則有聯一光學、一品光學、亞洲光學等公司生產光學玻璃毛胚。

光學玻璃毛胚的種類約有三百多種，分類方法主要有兩種，由化學成分分類或由玻璃的折射率(n_d)與色散率(v_d)進行分類，若依玻璃的折射率(n_d)與色散率(v_d)來進行分類，可分為冕冕玻璃(Crown Glass)和火

石玻璃 (Flint Glass) 兩大類；冕冕玻璃的折射率與色散率定義為 $n_d < 1.60$ ， $v_d > 50$ ，其成分中含有氧化鋇 (BaO)，為折射率較低，色散率較高的光學玻璃；火石玻璃的折射率與色散率定義為 $n_d > 1.60$ ， $v_d < 50$ ，其成分中含有氧化鉛 (PbO)，屬於折射率較高，色散率較低之光學玻璃。

光學玻璃的命名會因不同光學廠的規則而有所不同，因此光學廠會依據玻璃本身的光學特性進行編號，目的在於能與他廠之光學玻璃相互對應。

以 OHARA 公司之 L-BAL42 光學玻璃為例，其編號為 583594，其編號前三碼所代表的意義為折射率 $n_d = 1.583$ ，後三碼則為色散率 $v_d = 59.4$ 。圖 2.1 為 OHARA 公司模造玻璃用的光學玻璃品種，圖中縱座標為折射率 n_d ，橫座標為色散率 v_d 。



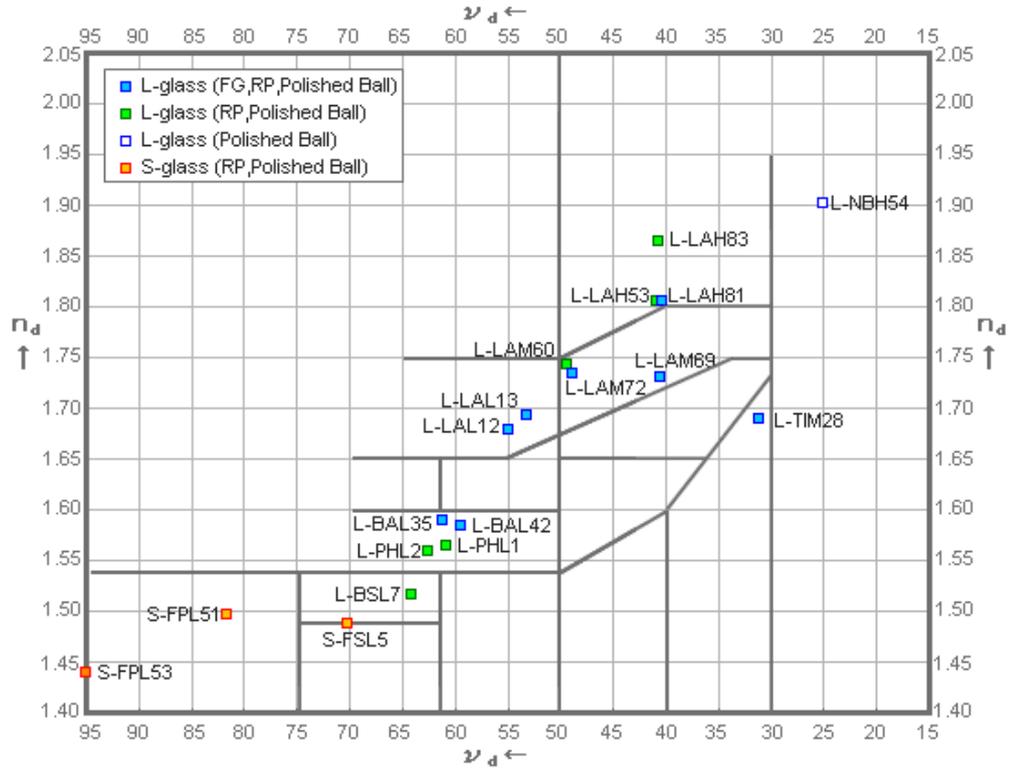


圖 2.1 OHARA 公司模造玻璃用光學玻璃[23]

2.2 光學玻璃之光學性質

2.2.1 折射率(Refractive Index)

光在不同介質(Medium)中有不同的傳播速度；所以當光在進入不同介質時，其行進方向會有所改變，即為光的折射。折射率一般分成絕對折射率(Absolute Index of Refraction)與相對折射率(Relative Index of Refraction)；絕對折射率 n 之定義為：光在真空中的速度 c ($2.99 \times 10^8 \text{m/sec}$) 與光在介質中的速度 v 之比值。然而在工程上習慣以相對折射率來表示，如 2.1 式所示。

[24]

$$n_{rel} = \frac{n_{glass}}{n_{air}} \quad (2.1)$$

n_{rel} : 相對折射率

n_{glass} : 玻璃的折射率

n_{air} : 空氣的折射率

2.2.2 色散(Dispersion)

真空中各波長的光其速度均相等，但在進入較密介質中後，不同頻率之色光的速度便各有差異，以可見光範圍而言紅光最快紫光最慢。當光線斜射於一折射面時，此效果尤為顯著，色光會依照其速度之不同，被折射程度也不同，因此有色散現象產生。色散率以 Abbe number(v_d)表示。

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_c} \quad (2.2)$$

n_d : 介質對光波長 587.56nm 的折射率

n_F : 介質對光波長 486.10nm 的折射率

n_c : 介質對光波長 656.27nm 的折射率

2.2.3 透明度(Transmittance)

光進入物質後之行為與物質之性質有關；一般的情況下，光進入物質一小段距離後，光被物質所吸收會變為其他形式的能，如熱能或化學能等。凡是光線所不能通過之物質，稱之為不透明(Opaque)；而某些物質當光線通

過時吸收極少光或幾乎不吸收光，則該物質稱為透明物(Transparent)，而透明度係指物質對光的吸收程度。

2.2.4 光學玻璃之其他性質

除了光學性質之外，光學玻璃的機械及化學性質也同樣關係到光學元件在光學系統上的表現。

一般光學玻璃的機械性質以硬度最為重要，硬度值以Hk表示，為Knoop硬度測試所得之值，該測試法是藉著在玻璃表面造成壓痕的方式測量材料的硬度。光學玻璃的硬度與成分有關，一般而言鉛玻璃較鈣玻璃質軟，玻璃中若含氧化硼能增加玻璃的硬度。

玻璃的化學性質係指玻璃對化學的耐久性，即玻璃對水、酸、鹼、鹽類等溶液與空氣中的水分及二氧化碳的抵抗能力，其中更以抵抗酸性為化學性質主要的指標。

除了對化學的抵抗能力和硬度等物理性質之外，光學元件的使用場合有時會有白天與黑夜高低溫差的變化，或者接受強光照射等狀況，因此對於這類因素的穩定性就顯得相當重要，而光學玻璃比起光學塑膠在此類性質上便具有相當的優勢。

2.3 玻璃的轉移現象

大部分液體在冷卻到一定溫度下後就會凝固變成晶體結構(Crystal Structure)，但玻璃並不在一定溫度下凝固，而是當冷卻到一定溫度後，便

會逐漸增加其黏性，最後不進行結晶而成為硬的固形物；在加熱方面，玻璃由常溫加熱時就隨即軟化然後才變為凝體(Condensation)，不像一般結晶物質具有一定的熔點。

玻璃的體積會隨著溫度變化而改變，在升溫過程中，溫度與體積大致上是呈線性變化，當加熱至某一溫度時，體積變化率會稍加增大，該溫度則稱為玻璃轉移溫度(Glass Transition Temperature ; T_g)，如圖 2.2 所示。

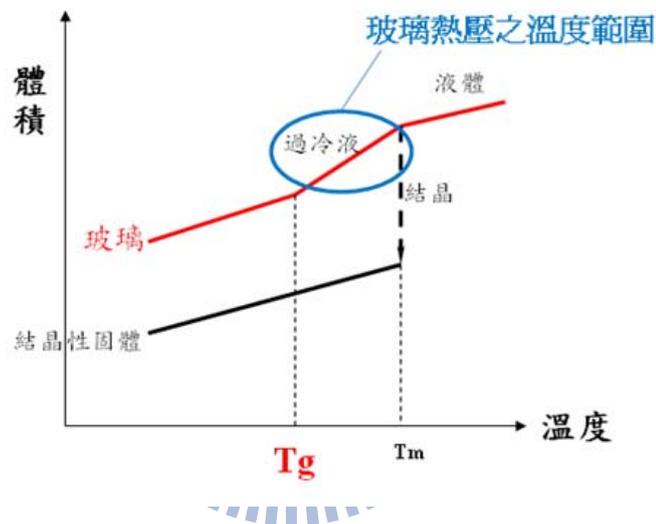


圖 2.2 玻璃狀態固-液體關係圖[24]

當玻璃溫度處於 T_g 點上方時，溫度下降，體積會因為原子振動減少和重新排列的情況，造成玻璃體積的收縮。當玻璃溫度處於 T_g 點下方時，則因為原子無法移動重新排列，然後溫度逐漸降低時，僅剩下因熱振動減少而使體積減少的因素，因此形成 T_g 點以上的熱膨脹係數要比 T_g 點以下還大，而且玻璃亦屬無定型(Amorphous)，使得玻璃固定未能形成最有效的結晶堆積，所以其體積仍比結晶性固體大。

若將溫度再持續升高，超過玻璃轉移溫度後，玻璃會逐漸失去其剛性，成為黏彈性的性質，若再持續升溫則玻璃隨即軟化，玻璃軟化點(Softening Point)的定義為以直徑 0.55~0.75mm，長度 23.5 mm 的玻璃纖維(Glass Fiber)，在玻璃纖維上部 10mm 處，以 5°C/sec 的速率升溫，玻璃由於自重產生的伸長速率達 1mm/min 時的溫度。

若將玻璃保持在 T_g 點上某一溫度時，其物理性質會隨著時間而變化，在該溫度下維持長時間後，玻璃的物理性質將不再變化，逐漸趨近於穩態(Steady State)，並可達到其溫度所對應之平衡值，在此一溫度下與時間一起變化且其性質達到穩定之現象稱為轉移現象(Transformation Phenomenon)，用來表示該轉移溫度的範圍稱為轉移域(Transformation Range)，通常轉移域係指由轉移溫度到軟化溫度之間的溫度範圍。

2.4 本研究採用的光學玻璃

本研究初步模仁材料實驗所選用之光學玻璃胚料為 Ohara 公司所生產之編號 L-BAL42(T_g=506°C)玻璃材料，微結構實驗則選用 T_g 點較低的 Sumita 公司生產之編號 K-PSK100(T_g=390°C)玻璃材料，考量因素有玻璃材料之光學性質與適合模造之成形溫度及玻璃毛胚取得之難易等。表 2.1 為 L-BAL42 與 K-PSK100 光學玻璃的材料性質表。

表 2.1 L-BAL42 與 K-PSK100 光學玻璃材料性質表

玻璃編號		L-BAL42	K-PSK100
材料性質			
折射率 n_d		1.583	1.591
色散率 v_d		59.4	60.7
玻璃轉移點 T_g (°C)		506	390
線膨脹係數 $\alpha(10^{-7}/^{\circ}\text{C})$	-30~+70°C	72	
	+100~+300°C	88	114
熱傳導率 k (W/m · K)		1.028	
Knoop 硬度 (Hk)		590	384

第三章研究流程與初步實驗介紹

3.1 研究流程介紹

本研究之研究流程首先為探討模仁材料之選用，參考文獻中使用過之材料與微結構製作的可行性，分別選出電鑄鎳鈷合金、碳化鎢、玻璃碳等三種材料；其後進行模仁微結構製作方式選用之探討；製作出有微結構之模仁後再進行初步熱壓實驗，探討模仁表面微結構轉印至玻璃試片可行性，然後再進行模仁材料耐熱實驗，選擇成形溫度合適之玻璃試片以進行後續微結構熱壓實驗；另外因為文獻指出模仁鍍貴金屬硬膜層可延長模仁壽命與改善微結構熱壓實驗中沾黏之問題[6]，所以進行模仁表面鍍貴金屬硬膜層之步驟，並實驗觀察鍍上硬膜層後模仁壽命與玻璃沾黏性的關係，最後進行玻璃微結構熱壓實驗，使用光學顯微鏡和表面粗度輪廓儀量測實驗結果，探討實驗參數與微結構成形性之關係。研究流程如圖 3.1。

本研究所使用之表面粗度輪廓儀、電鑄儀器、白光干涉儀等為財團法人國家實驗研究院儀器科技研究中心（以下簡稱儀科中心）所提供。

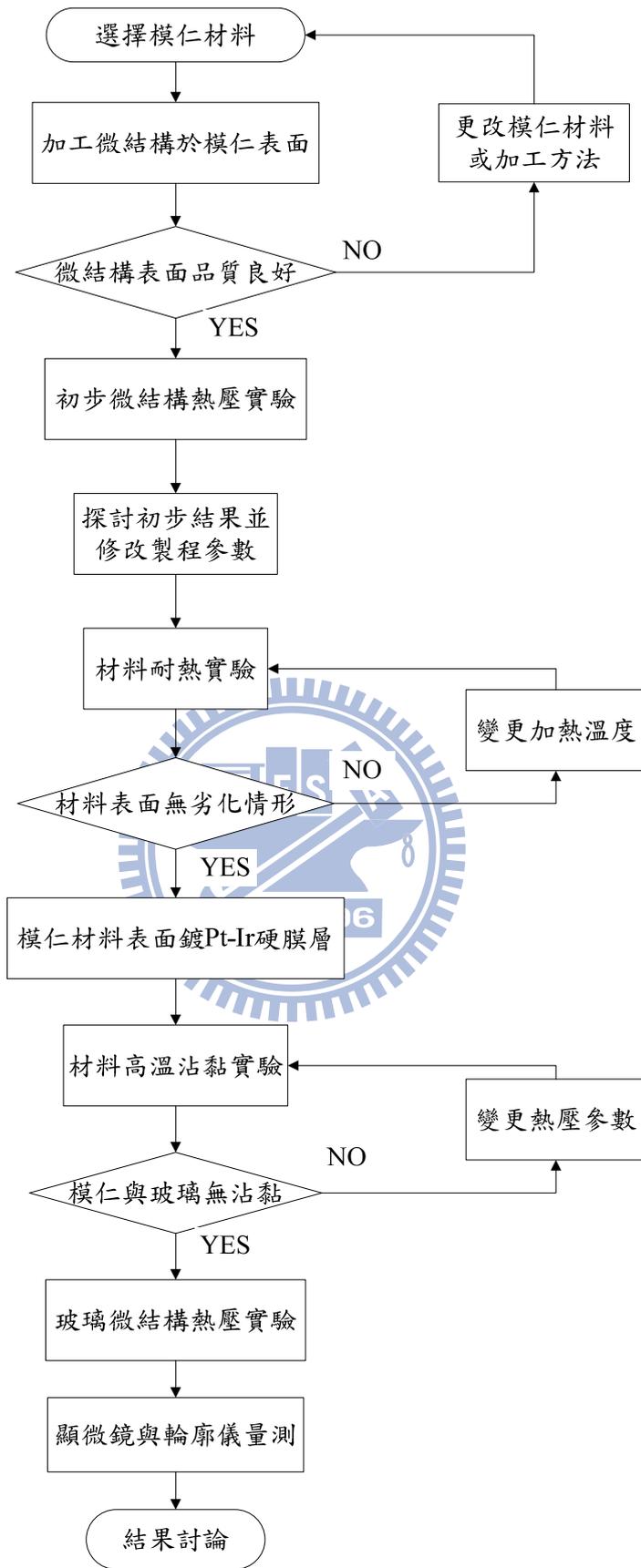


圖 3.1 研究流程圖

由於在模仁材料選用和微結構製作方式選用的探討中會進行初步的加熱與熱壓實驗，所以下一節將先介紹初步實驗之設備。

3.2 初步實驗設備介紹

初步實驗包括模仁材料選擇時的材料加熱與熱壓實驗，和初步的微結構熱壓實驗，所使用之熱壓設備為本實驗室自行設計並委外製造之高溫熱壓成形機，主要包含加熱與溫控系統、油壓系統及真空與氣體環境系統等三部份，將分別敘述如下。

3.2.1 加熱與溫控系統

初步實驗使用之加熱儀器中最重要設備為加熱爐，其加熱源使用紅外線短波電熔石英燈管，並可在大氣、氮氣、真空等氣氛下進行熱壓實驗，其構造示意圖如圖 3.2、外觀圖如圖 3.3。

加熱爐分為上爐與下爐兩部分，上爐主要包含一具單向推動的油壓缸，此油壓缸功用在於使加熱爐可密封作真空抽氣的動作，並且藉由油壓缸的推動改變行程，使模仁在密封環境下得以做壓印的動作。由於實驗時加熱爐內部為高溫環境，為避免熱影響壓力試驗機的感測元件，因此上下加熱爐外圍均有使用冷卻水路，避免熱量傳出；下爐則包含紅外線加熱燈管及真空幫浦抽氣孔，該氣孔亦為充填氣體於爐內的進氣孔；此外，上下爐皆有裝設溫度感測器熱電偶之開孔，使熱電偶與外部溫度控制設備做連結。

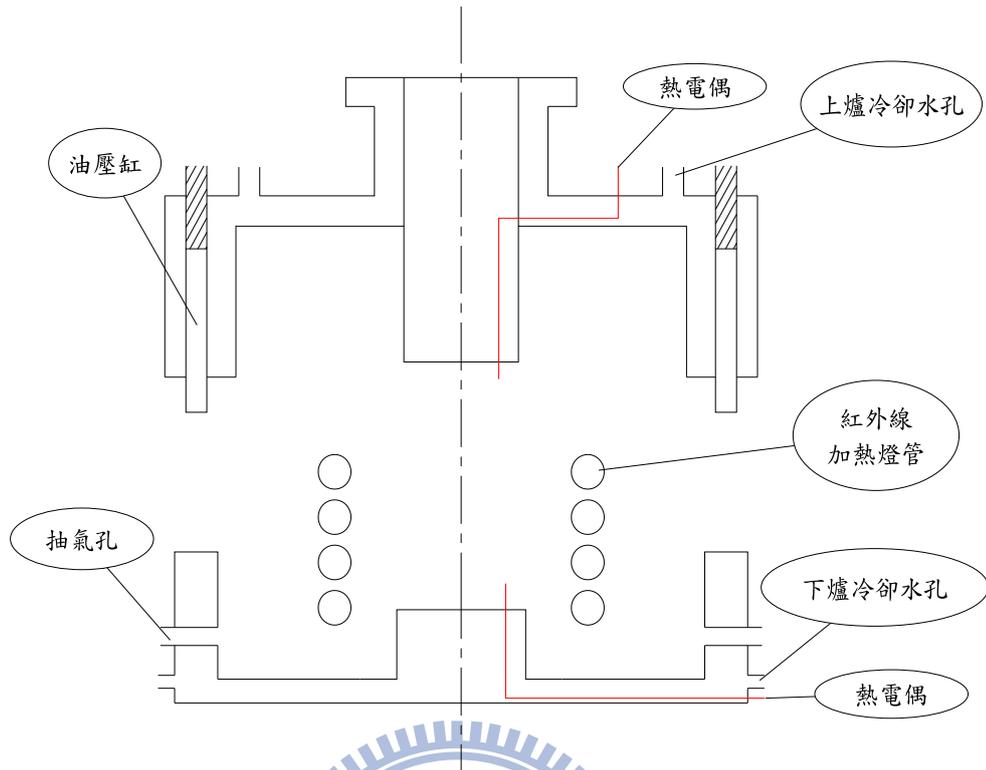


圖 3.2 加熱爐構造示意圖[6]



圖 3.3 加熱爐外觀圖

在紅外線加熱燈管方面，其功率為每支燈管 2500W，在設計上是用並聯的方式最多同時使用四支燈管做為加熱源，圖 3.4 為同時並聯三支燈管之外觀圖。在溫度控制上，使用熱電偶（圖 3.5）對待測物進行感測，並將訊號送至溫度控制器（圖 3.6），然後再由溫度控制器傳送訊號至功率調整器 SCR（圖 3.7）來控制燈管的加熱功率；加熱與溫度控制示意圖如圖 3.8 所示。

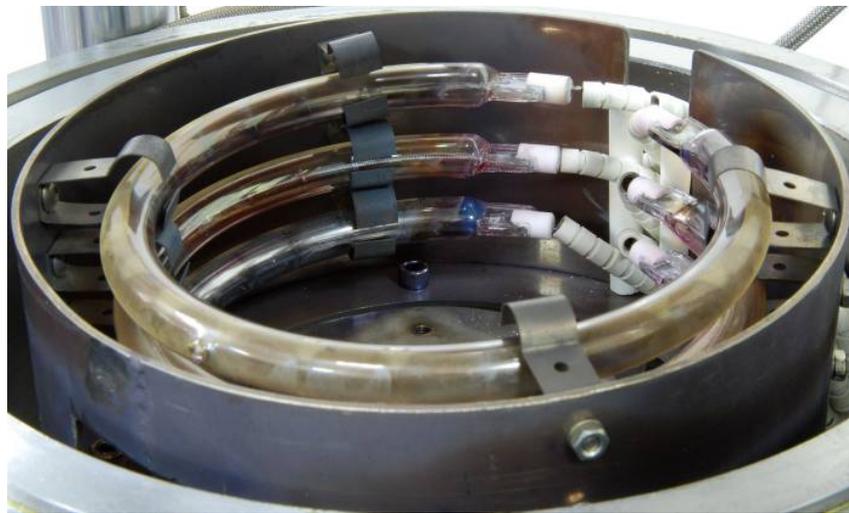


圖 3.4 紅外線加熱燈管



圖 3.5 熱電偶



圖 3.6 溫度控制器



圖 3.7 功率調整器

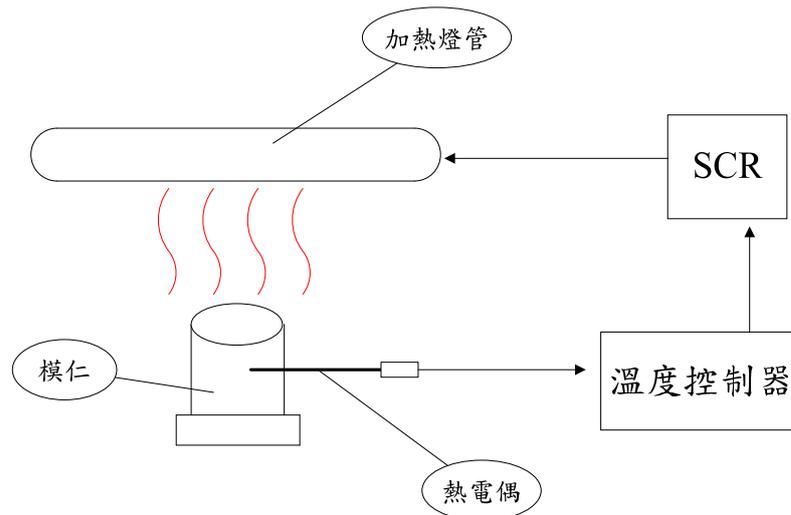


圖 3.8 加熱與溫度控制示意圖[6]

3.2.2 油壓系統

加熱爐的上爐為單向推動之油壓缸，使用油壓作為動力去推動油壓缸向下封閉加熱爐進行實驗，而油壓缸向上的行程則由壓力試驗機推動使之歸回上位，油壓缸最大行程約為 42mm。進行真空實驗時，由於加熱爐內外氣壓差，導致大氣壓力會推動下爐往上，故即使油壓缸已經降下，依然需要一循環的油壓系統使缸內保持壓力，因此在實驗過程中，油壓系統將持續運轉。油壓系統示意圖如圖 3.9 所示。

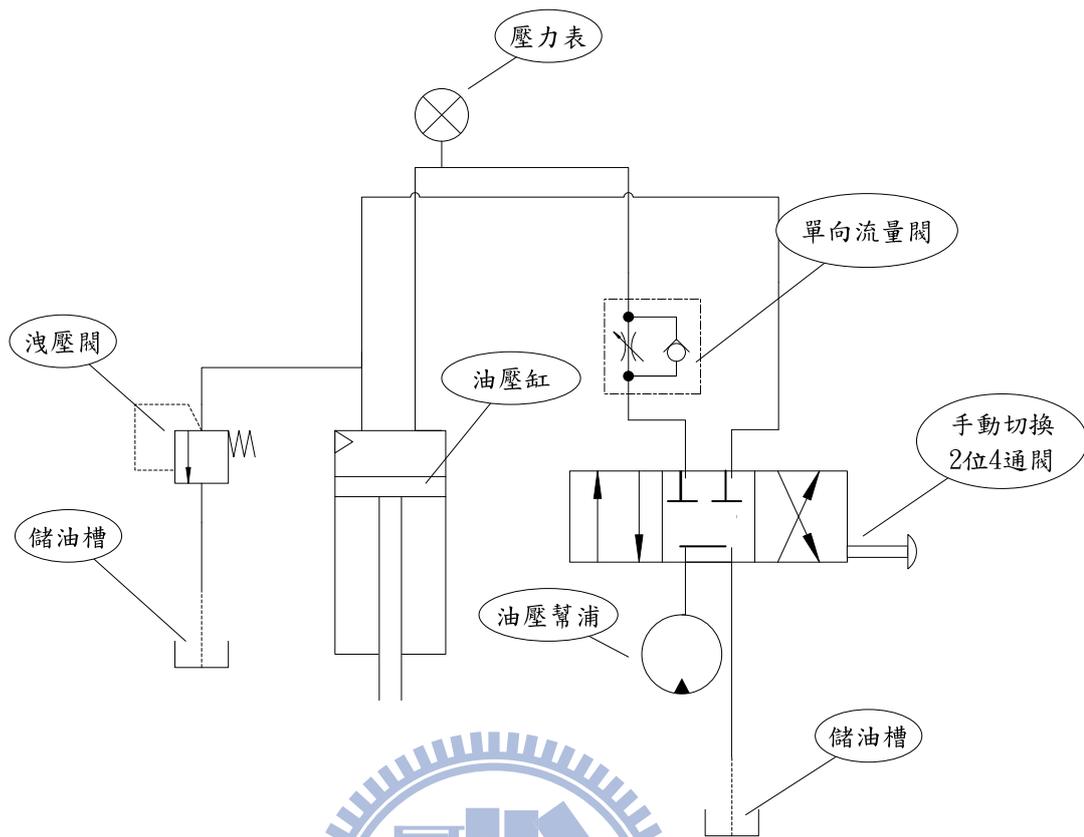


圖 3.9 油壓系統示意圖[6]

3.2.3 真空與氣體環境系統

加熱爐之下爐預留的兩個抽氣孔為抽氣與充氣使用，在進行真空實驗時，只需將一端之抽氣孔關閉，另一端之抽氣孔接上真空幫浦即可進行真空抽氣的動作；如需充氣體環境時，以氮氣為例，將抽氣孔接上氮氣鋼瓶，打開真空幫浦端上的洩氣閥，即可通入氮氣。氮氣鋼瓶配置及真空幫浦如圖 3.10、圖 3.11 所示。



圖 3.10 氮氣鋼瓶配置圖



圖 3.11 真空幫浦

3.3 模仁材料選擇

模仁材料選擇將依據(1)參考文獻中使用過的材料：包括碳化鎢和玻璃
碳兩種材料；和(2)較容易製作出微結構的材料：鎳鈷合金，等三種材料進
行可行性之探討，將分別介紹如下。

3.3.1 碳化鎢材料介紹

碳化鎢為一般業界常使用之模仁材料，優點為在重複且急速升降溫過
程中，表面不易產生變形、裂痕與氧化作用，且具有高剛性、耐衝壓強度
與高硬度等特性，所以在玻璃熱壓非球面透鏡製程中常使用為模仁材料。

圖 3.12 為碳化鎢模仁外觀圖。

由本實驗室先前研究之論文也指出，碳化鎢在真空下進行玻璃熱壓實
驗後，透鏡成品不會有沾黏與析出物之現象，可成功製作表面品質良好之
透鏡成品[6]，為一適合做為玻璃熱壓模仁之材料，所以本研究初步選用其
做為微結構加工可行性探討的材料之一。表 3.1 為本實驗所使用之碳化鎢
材料性質。



圖 3.12 碳化鎢模仁外觀圖[6]

表 3.1 碳化鎢材料性質

碳化鎢	
比重 (g/cm^3)	13.9
硬度 (HV)	1600
抗折力 (GPa)	2.5
壓縮強度 (GPa)	5.9
熱膨脹係數 ($\times 10^{-6}/\text{K}$)	6 (20~150°C)
熱傳導率 ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	67

3.3.2 玻璃碳(Glassy Carbon)材料介紹

玻璃碳(Glassy Carbon)的構成元素為碳(Carbon)，因其結構和玻璃一樣都為非結晶型態，故稱為玻璃碳。玻璃碳同時兼有碳和玻璃的特型，在熱性質和導電性質方面與其他碳元素的材料並無太大差別；在結構方面則和玻璃一樣緻密呈不透氣性，機械性質也和玻璃相似具有玻璃形狀的斷口和光澤。

文獻[5~9]指出，由於玻璃碳具有良好的氣密性、不易產生化學反應、易於拋光成鏡面和熱膨脹係數小等優點，所以適合使用於玻璃熱壓成形之模仁。

由於玻璃碳為本實驗室不熟悉之材料，所以本研究向 SPI 公司購買生產型號 **SPI-Glas™ 10** 的玻璃碳材料，進行材料耐熱與熱壓實驗，實驗詳細內容請見附錄 A，玻璃碳外觀如圖 3.13。加熱與熱壓實驗結果顯示，玻璃碳材料高溫穩定性佳，且在真空下進行加熱與熱壓實驗後表面品質保持良好，不易與玻璃產生沾黏反應，為一適合玻璃熱壓的模仁材料。

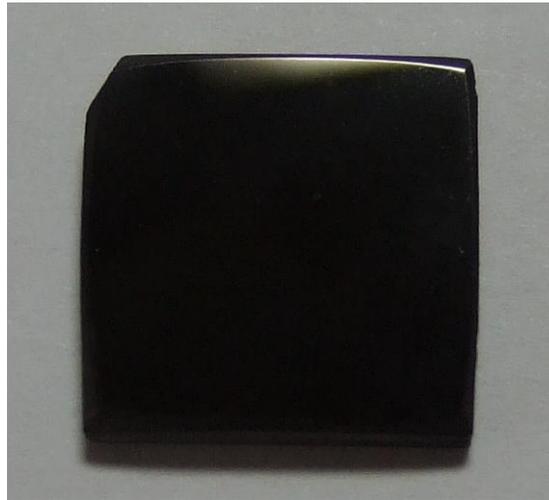


圖 3.13 玻璃碳外觀圖

表 3.2 玻璃碳的性質[25]

玻璃碳(Glassy Carbon)	
密度(g/cm ³)	1.54
最高工作溫度 (°C)	1100
開放式孔洞 (%)	0
滲透係數 (cm ² /s)	10 ⁻¹¹
維氏硬度 (HV)	340
撓曲強度(N/mm ²)	210
耐壓強度(kN/mm ²)	580
楊氏係數 (kN/mm ²)	35
熱膨脹係數 (20 - 200°C), (1/K)	3.5 x 10 ⁻⁶
熱傳導率 (30°C), (W/(K.m))	4.6

3.3.3 電鑄鎳鈷合金簡介

鎳鈷合金(Ni-Co alloy)為一種新發展的塑膠射出模具材料，比起傳統鎳金屬塑膠射出模具有更高的硬度、耐熱性和耐磨性等優點；在微結構模仁製作方面，可先使用超精密加工機加工出其他材料之母模後，再利用電鑄的技術快速生產精度良好之鎳鈷合金模仁，達成降低微結構模仁製作成本之目的。

電鑄是利用電解原理將電解液中的金屬離子還原為金屬，並使之沉積在陰極的表面。所以將欲鑄的金屬材料置於陽極，而被鑄的物體則接於陰極，以欲鑄金屬離子的電解質溶液作為電鑄液。若為非導體之電鑄，須於被鑄體之表面塗上一層導電層，便可將欲鑄的金屬電鑄在被鑄體上。[26]

電鑄技術的優點在於能百分之百複製精度，如光學鏡面的複製；表面細紋複雜的複製；傳統加工方法製作不易或製作成本太高之模具複製；希望透過大量翻製，縮短製程時間等。

本實驗所使用鎳鈷合金電鑄材料為儀科中心所提供，其成分比例為Ni-80%；Co-20%，圖 3.14為儀科中心電鑄設備外觀圖。

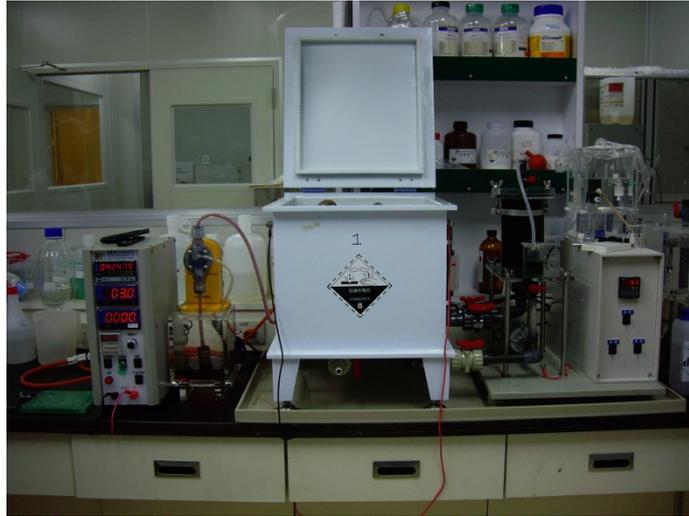


圖 3.14電鑄設備外觀圖

3.4 微結構製作方式

3.4.1 微放電加工碳化鎢與玻璃碳材料

由於業界目前使用加工微結構於碳化鎢和玻璃碳等含碳材料的方式為超精密輪磨法，其成本昂貴且量產不易，所以首先嘗試使用成本較低之微放電加工法，加工微結構於碳化鎢和玻璃碳表面並探討其可行性。

微放電加工為一種利用放電產生的火花，侵蝕揮發微量的工件，以得出所需結構的大小與形狀的加工方法，其優點有可加工形狀複雜之微細元件，精度可達 $1\mu\text{m}$ ，且加工時不會受切削力與材料性質的影響，殘留應力極小等，微放電加工原理示意圖如圖 3.15，微放電加工機台外觀如圖 3.16，微放電加工機台之電極與工件如圖 3.17。

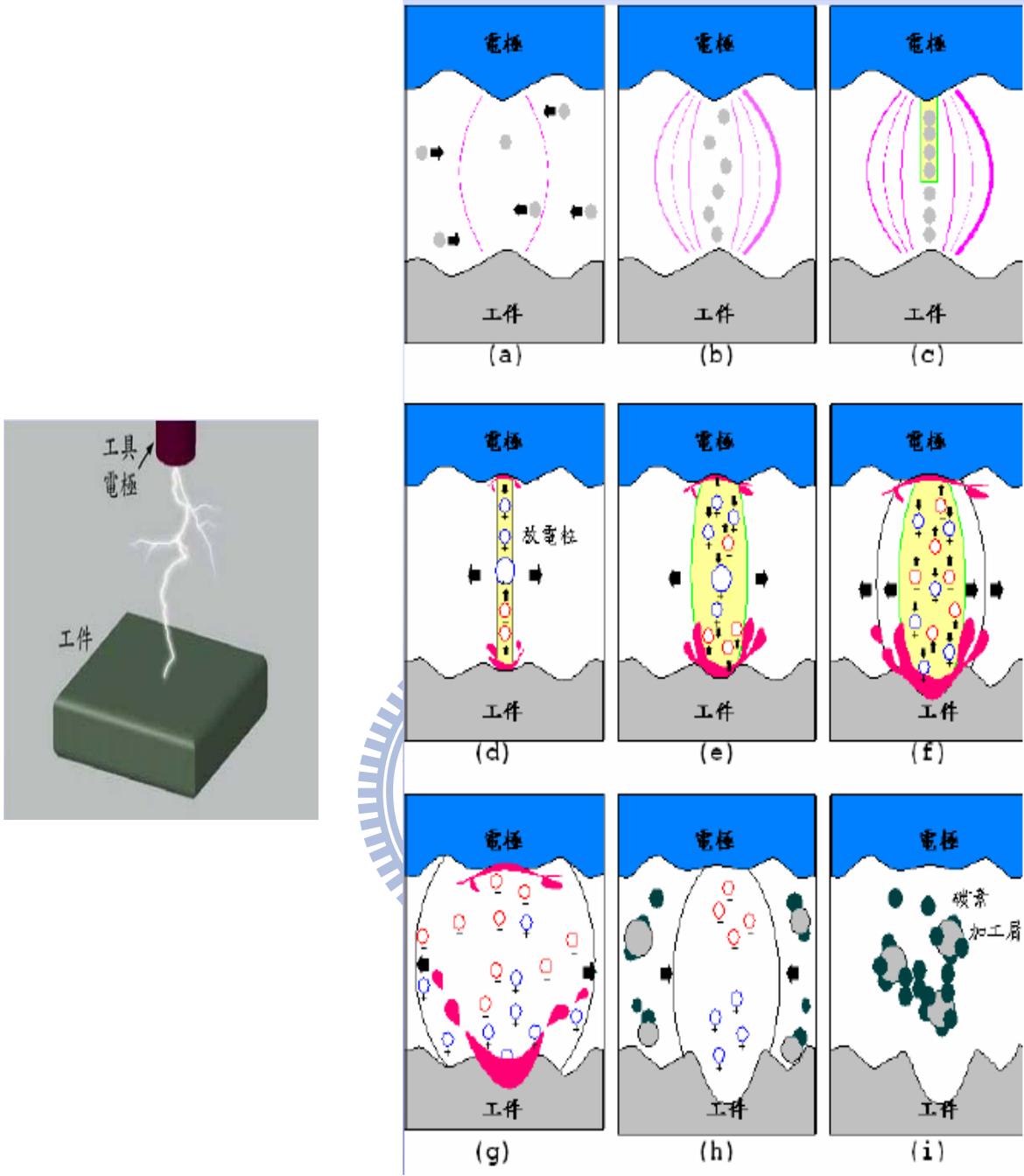


圖 3.15 微放電加工原理示意圖[26]



圖 3.16 微放電機台外觀圖

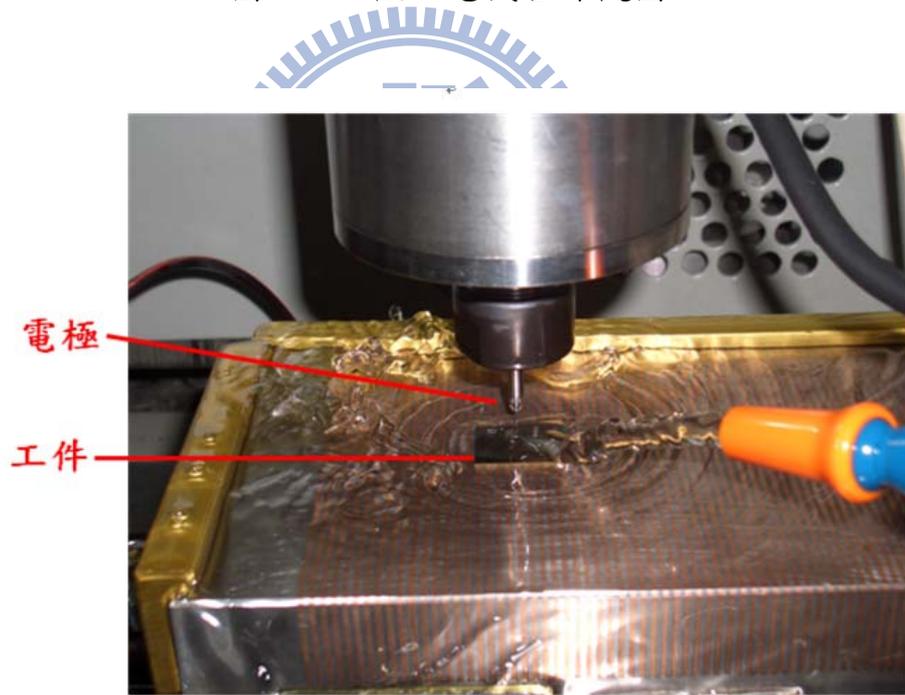


圖 3.17 微放電機台電極與工件放大圖

本實驗利用微放電加工法加工寬 0.2mm、深 1mm 的溝槽結構於玻璃碳模仁表面(如圖 3.18)和寬 0.2mm、深 0.1mm 的溝槽結構於碳化鎢模仁表面(如圖 3.19);由圖 3.18和圖 3.19可知,雖然微放電加工尺寸精度可達 $1\mu\text{m}$,但其加工後表面品質呈現凹凸不平的形貌,表面粗度與光學元件要求也相去甚遠,所以可知微放電加工技術雖可加工出微米尺寸之結構,但不適用於表面品質要求較高之光學微結構模仁製作。

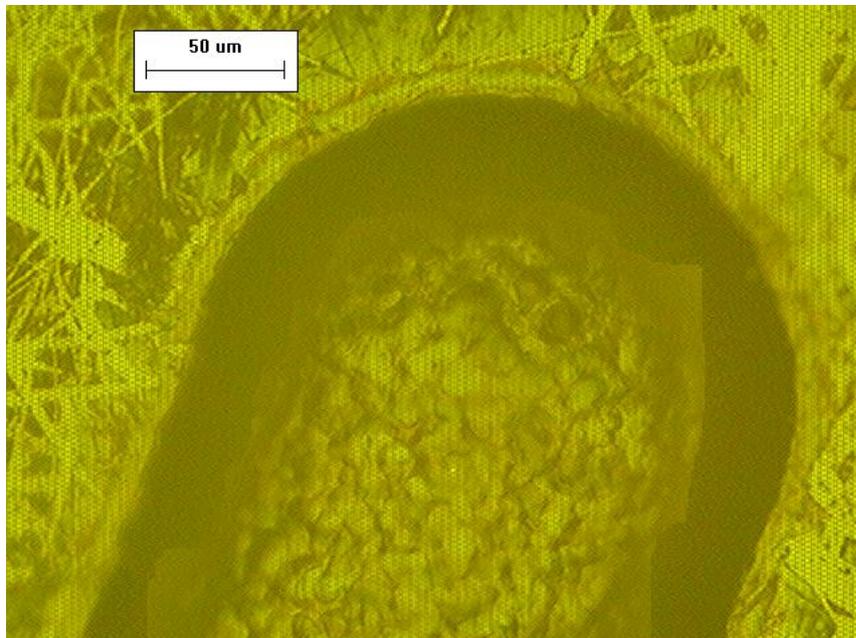


圖 3.18 放電加工於玻璃碳模仁表面顯微鏡圖

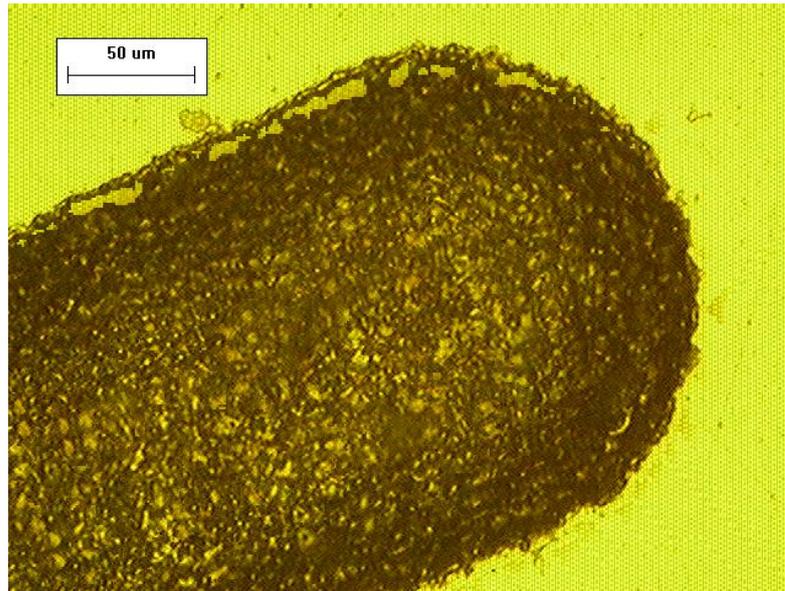


圖 3.19 放電加工於碳化鎢表面顯微鏡圖

3.4.2 電鑄翻模鎳鈷合金微結構模仁

本研究使用電鑄翻模法之測試母模為儀科中心提供之塑膠射出成形用 Fresnel 微結構模仁(圖 3.20)，其底材為不銹鋼 STAVAX(S-136)表面鍍無電解鎳，並使用超精密加工機於鎳層車削出 Fresnel 結構，測試母模規格如圖 3.21，Fresnel 結構規格如圖 3.22；玻璃熱壓微結構模仁則利用鎳鈷合金電鑄於母模上進行翻模製作而成，初步實驗模仁電鑄厚度為 0.3mm，電鑄完成之鎳鈷合金模仁如圖 3.23。



圖 3.20 STAVAX 模仁

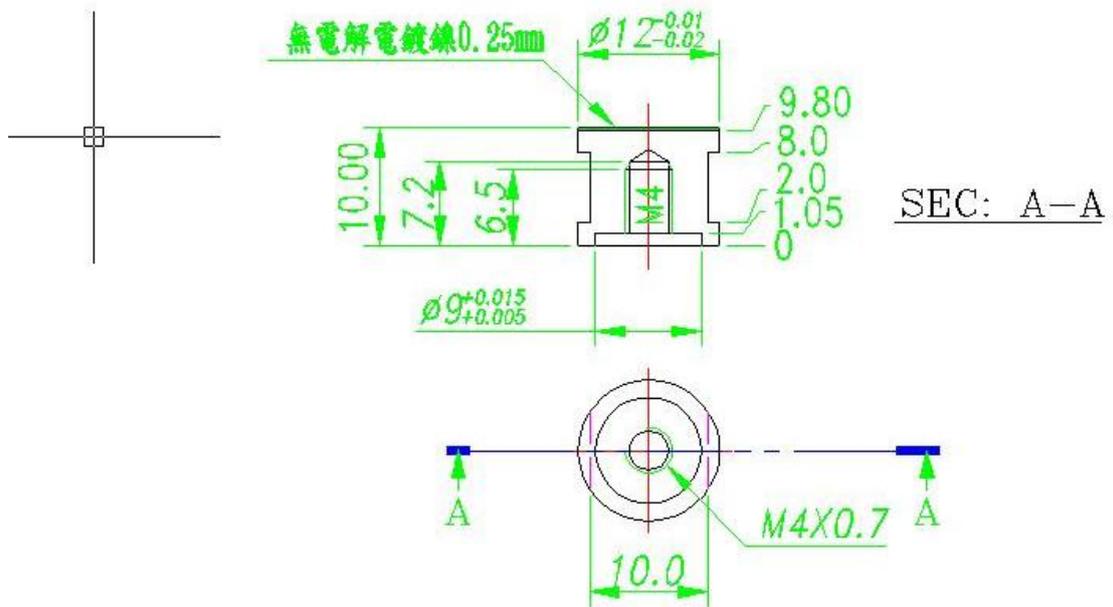


圖 3.21 STAVAX 模仁規格

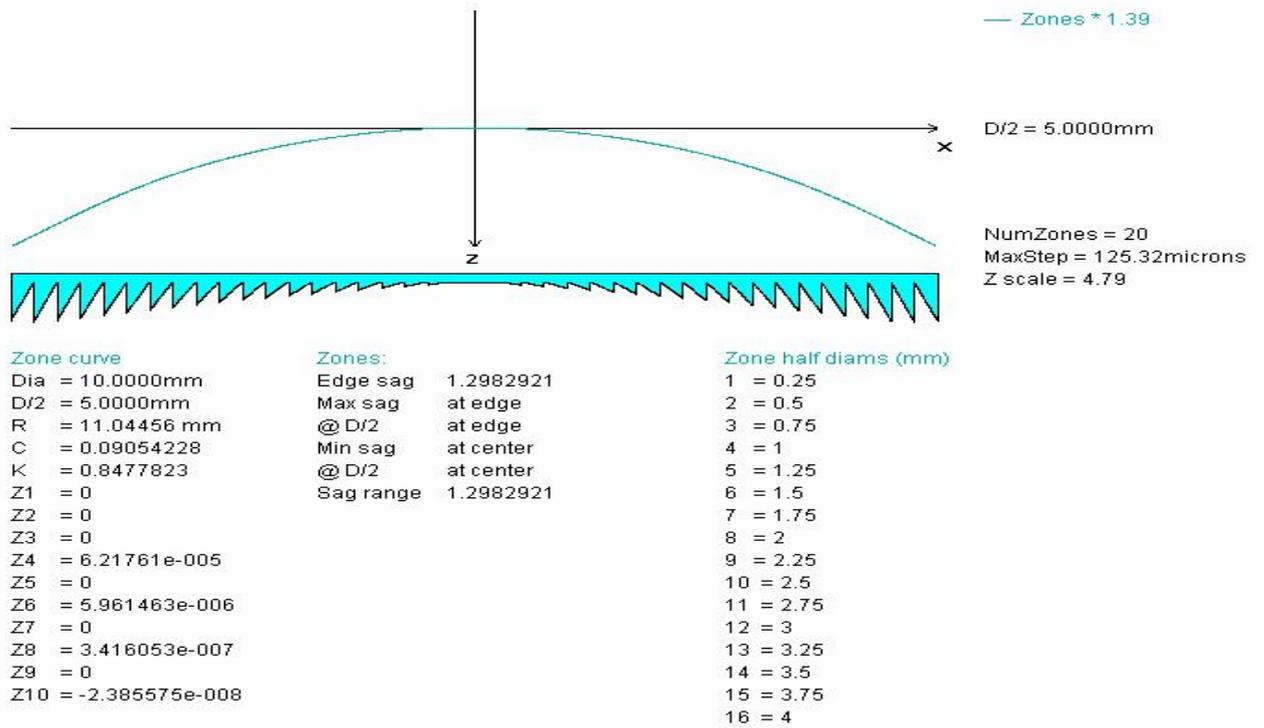


圖 3.22 STAVAX 模仁 Fresnel 結構規格



圖 3.23 電鑄翻模鎳鈷合金模仁

對電鑄完成之鎳鈷合金模仁先進行表面結構量測，量測儀器為利用探針進行接觸式量測的表面粗度輪廓儀，其外觀如圖 3.24；分別量測模仁表面不同方向之三組直徑以比較其結構對稱性，結果如圖 3.25 所示。可知使用電鑄翻模法製作之鎳鈷合金模仁其對稱性佳且表面品質良好。3.5 節將討論初步微結構熱壓實驗結果，評估鎳鈷合金做為玻璃微熱壓模仁材料之可行性。



圖 3.24 表面粗度輪廓儀外觀圖

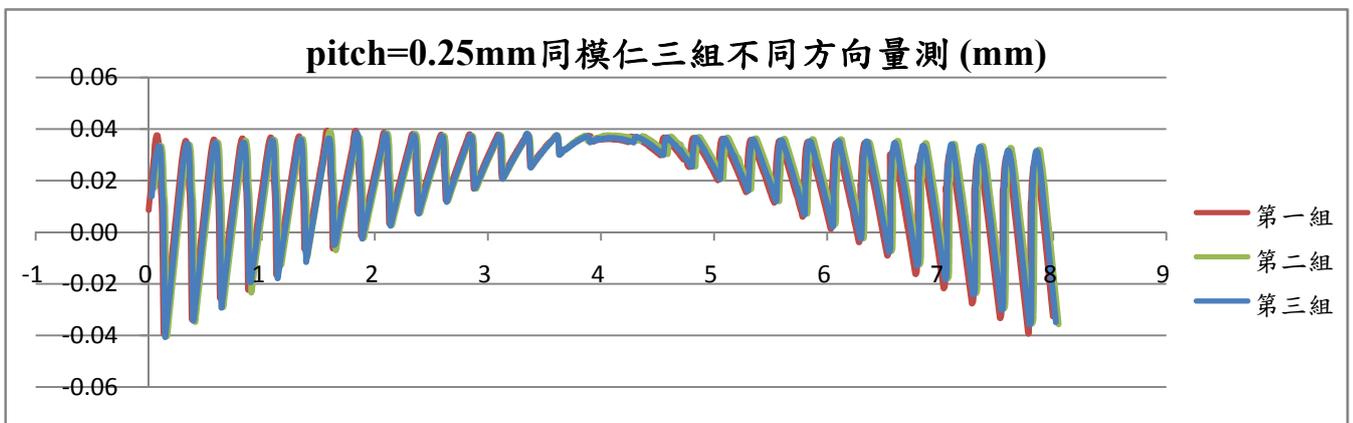


圖 3.25 pitch=0.25mm 之電鑄模仁不同方向對稱性比較圖

3.5 初步微結構熱壓實驗

初步微結構熱壓實驗用玻璃試片為 OHARA 公司所生產之成形用 L-BAL42 光學玻璃，直徑為 8mm、高 5.5mm 上下平面拋光之玻璃圓錠。實驗步驟如圖 3.26 所示，實驗相關參數如表 3.3 所列。

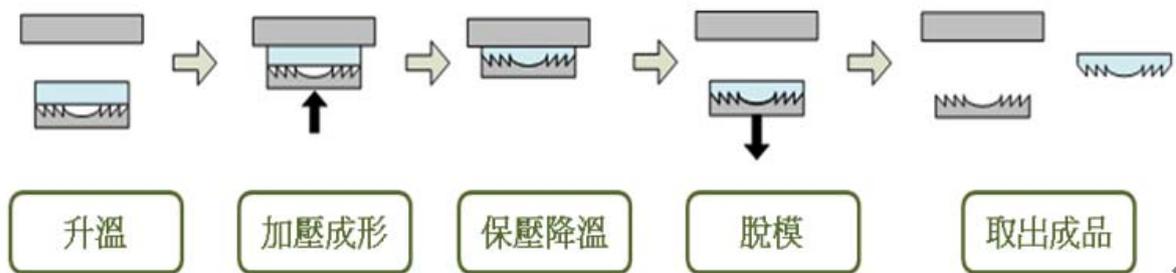


圖 3.26 玻璃微結構熱壓實驗步驟

表 3.3 初步玻璃微熱壓轉印性實驗參數

玻璃材料	L-BAL42	升溫時間	15min30s
模仁材質	電鑄鎳鈷合金	持溫時間	30min
		壓印力(N)	1960
溫度設定 (°C)	568	保壓時間	30s
熱壓氣氛	真空	脫模溫度 (°C)	100

圖 3.27、圖 3.28 分別為實驗後鎳鈷合金模仁與玻璃微熱壓成品，由圖中可看出鎳鈷合金模仁微熱壓後表面有明顯劣化情形產生，熱壓期間模仁結構並無全部接觸到玻璃試片，圖 3.27 模仁中央較光亮部分為熱壓期間有接觸到玻璃試片部份，邊緣較暗淡部分為沒有接觸到玻璃試片部份，玻璃熱壓成品部分則有結構邊緣破損碎裂之情形。

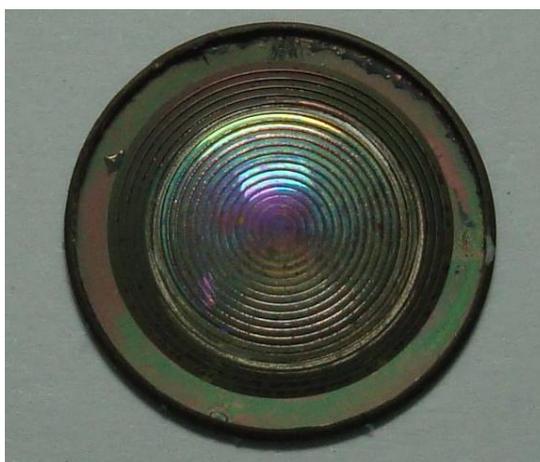


圖 3.27 實驗後鎳鈷合金模仁



圖 3.28 玻璃熱壓微結構成品

配合光學顯微鏡與表面輪廓粗度儀之量測，光學顯微鏡拍攝如

圖 3.29、圖 3.30、圖 3.31。表面輪廓粗度儀量測如圖 3.32、圖 3.33、

圖 3.34。

由圖 3.29、圖 3.30、圖 3.31 可看出模仁之 Fresnel 結構在微熱壓實驗後有變形與破損之情形，結構溝槽邊緣也比實驗前來得明顯不平整，在玻璃成品部分，Fresnel 溝槽部分也如實驗後之鎳鈷合金模仁邊緣有凹凸不平之現象。再由圖 3.32、圖 3.33、圖 3.34 可觀察到，鎳鈷合金模仁微熱壓實驗後中央與玻璃試片接觸部份產生形變，結構向下凹陷，而玻璃成品部份可看出玻璃並無完全轉印模仁之結構，在形狀上與模仁並不完全相同。

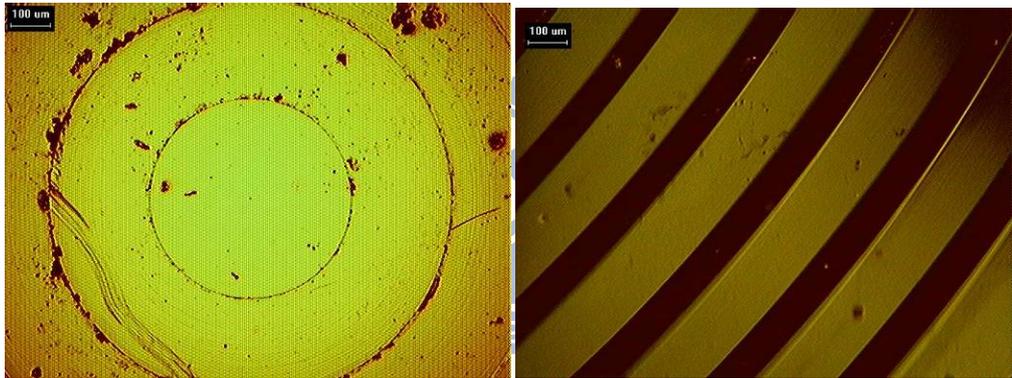


圖 3.29 鎳鈷合金模仁實驗前顯微鏡圖，左圖為結構中央處，右圖為 Fresnel 溝槽結構部份



圖 3.30 鎳鈷合金模仁實驗後顯微鏡圖，左圖為結構中央處，中圖為模仁 Fresnel 溝槽結構與玻璃接觸處，右圖為模仁 Fresnel 溝槽結構未接觸到玻璃

處

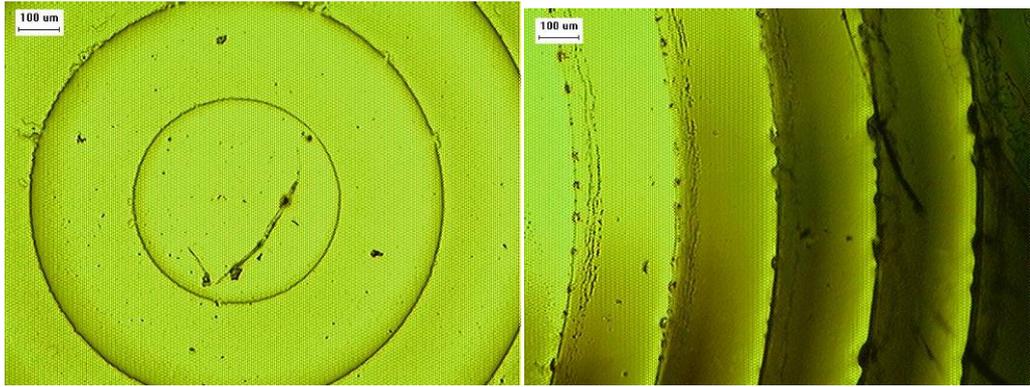


圖 3.31 玻璃微熱壓成品，顯微鏡圖左圖為結構中央處，右圖為 Fresnel 溝槽結構部分

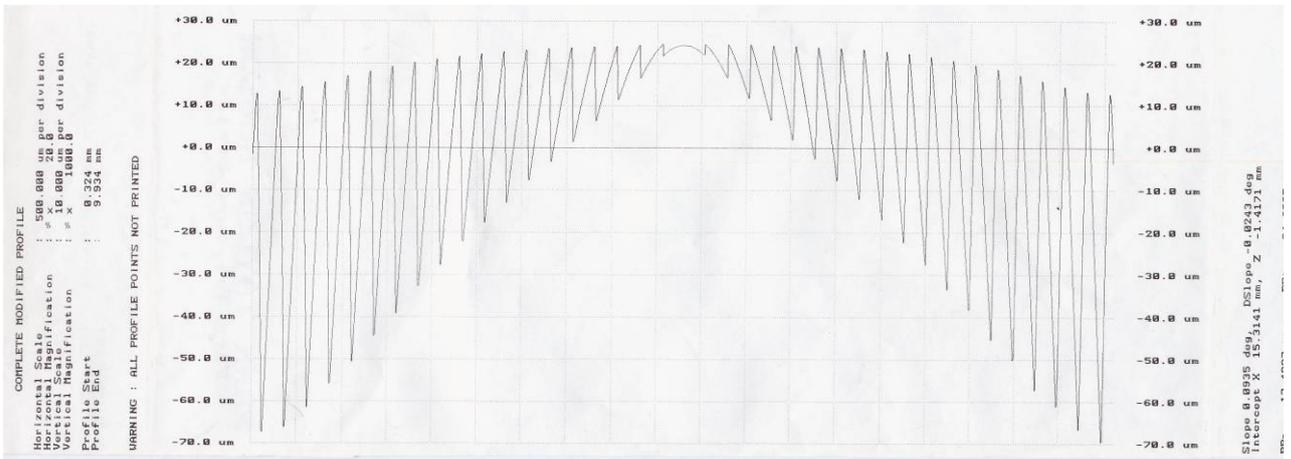


圖 3.32 實驗前鎳鈷合金模仁表面輪廓粗度儀量測

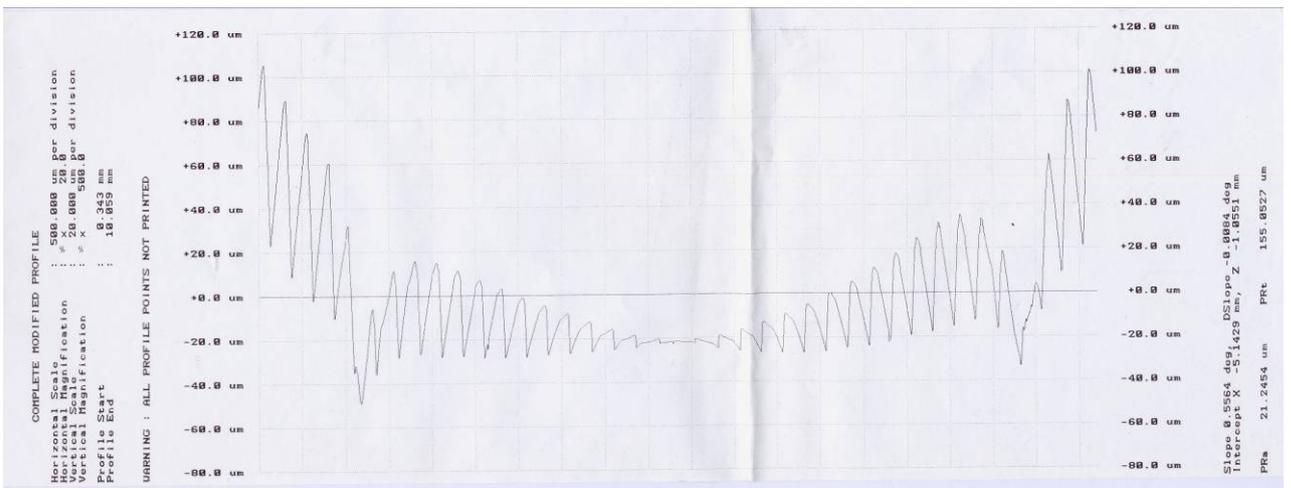


圖 3.33 實驗後鎳鈷合金模仁表面輪廓粗度儀量測

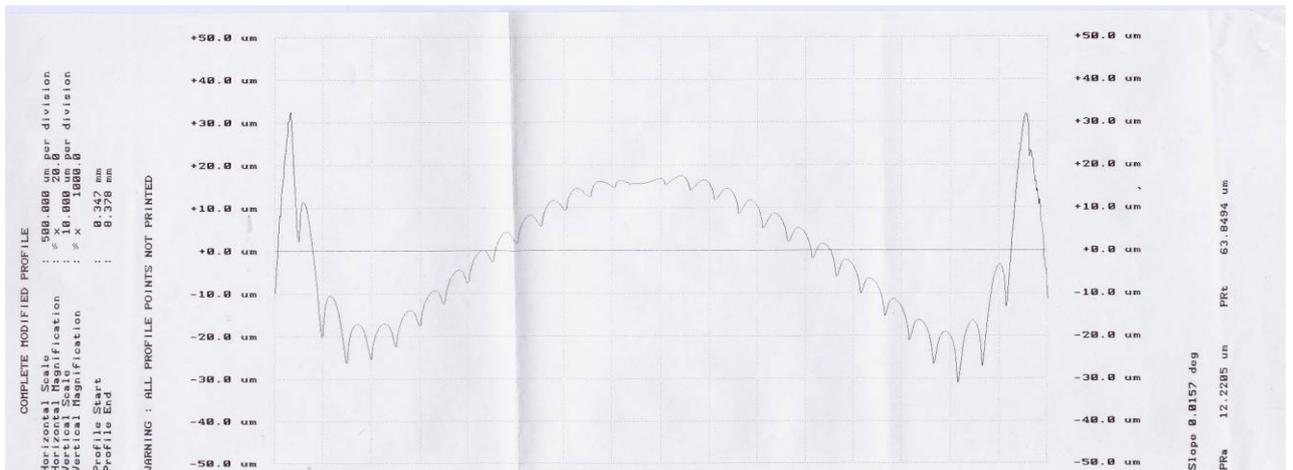
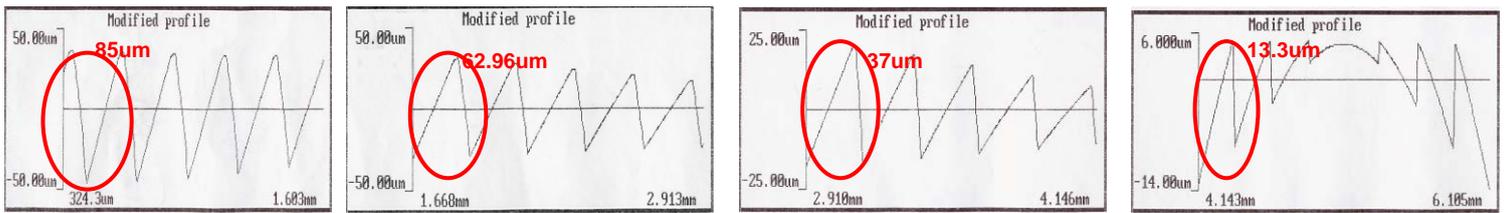


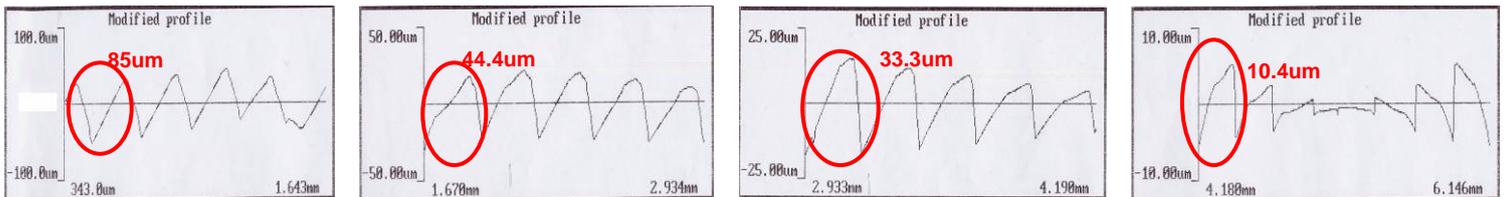
圖 3.34 玻璃微熱壓成品表面輪廓粗度儀量測

再由表面輪廓粗度儀量測之結果放大觀察，如圖 3.35，由上而下三排圖為實驗前模仁、實驗後模仁與玻璃成品，其中最右之圖為結構中央處，圖依序向左為結構向外圈延伸之對照；可看出微熱壓實驗後鎳鈷合金模仁與玻璃接觸處之結構高度有明顯下降，外圍沒有與玻璃接觸之高度無明顯之變化。在玻璃試片方面，轉印後結構之高度從中央至外圍，比起無論是實驗前或實驗後之鎳鈷合金模仁結構都來得小，並且尖端部分成圓弧形，與模仁尖端部分呈銳利形狀不同。

熱壓實驗前鎳鈷模仁



熱壓實驗後鎳鈷模仁



轉印後玻璃成品

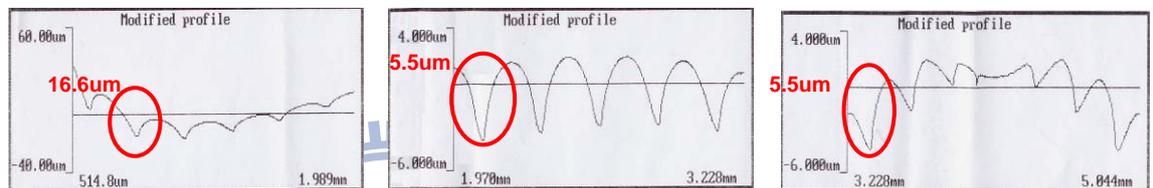


圖 3.35 實驗前模仁、實驗後模仁與玻璃成品輪廓圖比較

經由初步微結構熱壓實驗結果分析歸納如下幾點：

- (1) 電鑄鎳鈷合金模仁在微熱壓實驗後表面有劣化情形產生，由本來光亮之表面在實驗後呈現黯淡情形。
- (2) 玻璃成品邊緣呈現破損缺片之情形，可能為加壓、脫模或冷卻時產生之情況，需改變實驗加壓、脫模或冷卻等參數來解決破損之情況。
- (3) 鎳鈷合金模仁在微熱壓實驗後結構幾何形狀發生明顯之形變，熱壓過程造成結構向下凹陷且邊緣溝槽呈現凹凸不平之情形，顯示鎳鈷合金模仁在 568°C 溫度下進行微熱壓實驗，模仁會被玻璃試片擠壓產生不可恢復之變形，改善方法可在模仁表面鍍上耐熱硬膜層強化結構之強度，或者電鑄更厚之

鎳鈷合金模仁加強其耐壓強度。

- (4) 玻璃轉印性方面，初步微結構熱壓實驗之實驗參數無法使玻璃在熱壓過程中完全填充於模仁結構之間，使得玻璃成品結構填充性不足，需改變實驗之如升溫溫度、保壓時間、壓印力、壓印速率等參數來探討玻璃轉印性之情形。

由第三章初步實驗結果，將模仁與微結構加工方法優缺點整理分析如表 3.4，可知碳化鎢和玻璃碳兩種材料雖為合適之玻璃熱壓模仁材料，但其微結構有加工不易或價格昂貴之缺點；而電鑄翻模鎳鈷合金則可成功製作出成本便宜且表面品質良好之微結構模仁，所以本研究在接下來之微結構熱壓實驗，將採用電鑄翻模之鎳鈷合金模仁進行微熱壓成形研究，包括使用製程參數更精準之熱壓設備和實驗後之成形性研究，都將在第四章進行詳細的介紹。

表 3.4 模仁材料與微結構加工方法優缺點整理表

模仁材料	微結構加工方法	優點	缺點
碳化鎢	超精密加工	模仁硬度高， 高溫穩定性佳	模仁為含碳系材料， 不適用鑽石刀頭加工
	超精密輪磨		加工成本高昂
	微放電加工		加工表面品質不佳
玻璃碳	超精密加工	模仁高溫穩定性佳， 不易與玻璃起反應	模仁為含碳系材料， 不適用鑽石刀頭加工
	超精密輪磨		加工成本高昂
	微放電加工		加工表面品質不佳
鎳鈷合金	電鑄翻模	成本便宜，可大量製 作，模仁表面品質與 複製精度佳	模仁材料較不耐高 溫，須使用低 Tg 點玻 璃進行熱壓實驗

第四章 微結構熱壓成形研究

經由前一章初步實驗結論可知，使用電鑄翻模法可成功製作出表面品質與對稱性良好之 Fresnel 結構鎳鈷合金模仁，並且有成本便宜可大量複製之優點，因此本研究後續將針對鎳鈷合金模仁進行玻璃熱壓微結構之成形探討。

本章節主要介紹包含模仁表面鍍硬膜層之介紹，精度較佳之熱壓實驗設備介紹，和電鑄模仁對稱性和複製性的探討，最後進行微結構熱壓實驗，並探討實驗參數與成形性之關係。

4.1 模仁鍍鉑鈷硬膜層介紹

硬膜技術使用範圍廣泛，在 3C、光學、光電等產業和國防工業皆扮演重要的地位，而在模具方面的應用其效果更為顯著，如模具表面藉由超硬薄膜被覆處理後，可提升其表面硬度，減少模具的磨耗量，減少摩擦係數，避免模具表面有溶著、刮傷等問題，達成提高產品精度與延長模具壽命之效果。

硬膜技術於光學玻璃熱壓成形模仁表面的適用性須考慮到以下幾點：

1. 離形性，以避免在模造過程中與玻璃產生反應、黏沾現象。
2. 足夠的硬度與機械強度，以免於模造過程中變形或受損。
3. 高溫穩定性，避免在模造氣氛中發生分解現象或與氣氛反應。

4. 耐熱衝擊性，以忍受模造過程中的熱循環。
5. 硬膜壽命，延長硬膜壽命可降低模仁成本。

其中硬膜層的成長方式，主要分為物理氣相沉積（physical vapor deposition, PVD）與化學氣相沉積（chemical vapor deposition, CVD）兩種方法；隨著激發方式不同，又可細分為蒸鍍、濺鍍、離子鍍、熱 CVD、電漿輔助 CVD（即 PECVD）、光誘發 CVD 等。簡單來說，PVD 以物理方式，而 CVD 以化學的方式對工件表面進行鍍膜。

表 4.1 為玻璃熱壓用模具之硬膜特性比較，由本實驗室先前研究[5]、[6]和表 4.1 可知，鉑銱(Pt-Ir)硬膜層在高溫下不易與玻璃發生反應，且具有優秀的抗沾黏性、高溫抗氧化性、品質穩定等優點，在玻璃熱壓製程中為一理想之硬膜層；因此本研究採用 Pt-Ir 做為微結構模仁之主要硬膜層材料，使用物理氣相沉積法中的濺鍍法進行模仁表面鍍膜，由儀科中心所提供。

表 4.1 玻璃熱壓用模具之硬膜特性比較[28]

種類 \ 特性	Ni-P or Ni-W	TiN or CrN	DLC	Diamond	Pt-Ir	B-N or C-B-N
低溫強度	○	◎	◎	◎	○	◎
高溫強度	×	◎	○	◎	△	◎
薄膜應力	○	△	△	×	○	×
抗沾黏性	×	△	○	◎	◎	○
高溫氧化	×	△	×	◎	◎	○
高溫與玻璃反應	×	×	×	○	◎	○
品質穩定性	◎	◎	○	○	◎	△
鍍膜成本	◎	○	○	△	△	△
模具壽命	×	△	△	○	◎	○
×：最差、不良、最嚴重，△：普通、尚可，○：較佳、較不嚴重，◎：最佳、最不嚴重						

4.2 微結構熱壓實驗

4.2.1 微結構熱壓實驗設備介紹

微結構熱壓實驗所使用之實驗設備，為矽基科技公司所製造生產之玻璃熱壓機台，主要分為加熱系統與控制系統兩部分，加熱系統外觀圖如圖 4.1，控制系統外觀圖如圖 4.2。設備為儀科中心所提供。



圖 4.1 微結構熱壓實驗設備加熱系統外觀圖



圖 4.2 微結構熱壓實驗設備控制系統外觀圖

加熱系統主要為一加熱腔體，腔體內可進行抽真空與充氮氣之行程，腔體內部配置則由紅外線加熱燈管組和伺服馬達推動之上擠桿與固定不動之下擠桿組成，燈管與擠桿配置外觀圖如圖 4.3；其中紅外線燈管每支功率 500W，配置則由六邊形燈座所組成，每邊 2 支燈管，共 12 支燈管，燈座可拆成前後兩部分，圖 4.4 為將前半燈座拆開後，後半燈座與上下擠桿相對位置外觀圖。



圖 4.3 實驗設備燈管與擠桿配置外觀圖

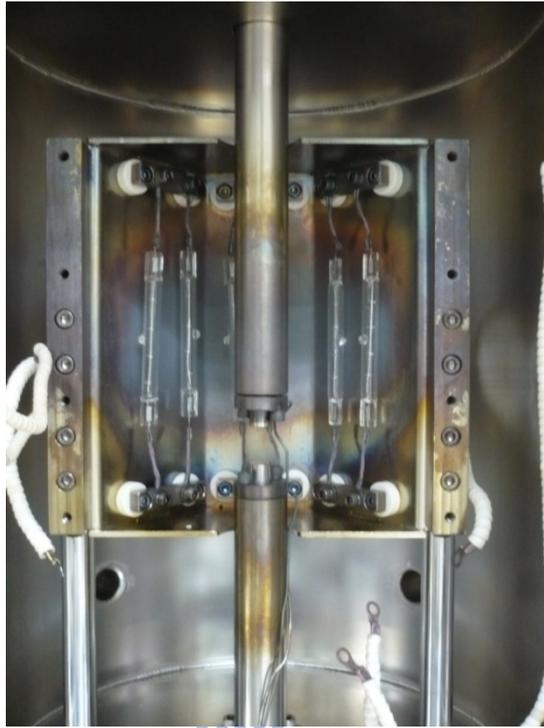


圖 4.4 燈座與擠桿相對位置外觀圖

熱壓實驗的微結構模仁是利用夾具與螺絲固定於下擠桿的頂端，熱電偶則是插入夾具內進行溫度感測，夾具與微結構模仁配置示意如圖 4.5，夾具設計圖見附錄 A，模仁與夾具組裝後之外觀圖如圖 4.6，組裝示意如圖 4.7，上模則是使用碳化鎢材料平面拋光模仁，上模組裝之外觀如圖 4.8。

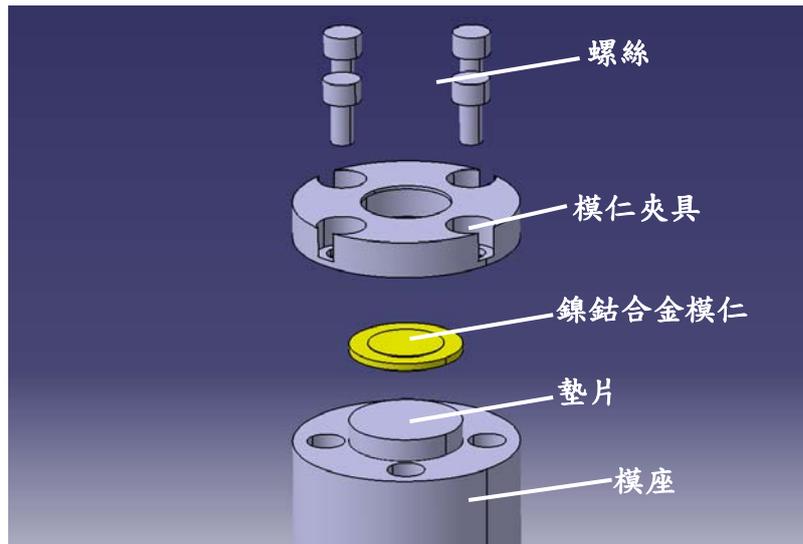


圖 4.5 微結構熱壓實驗夾具設計示意圖

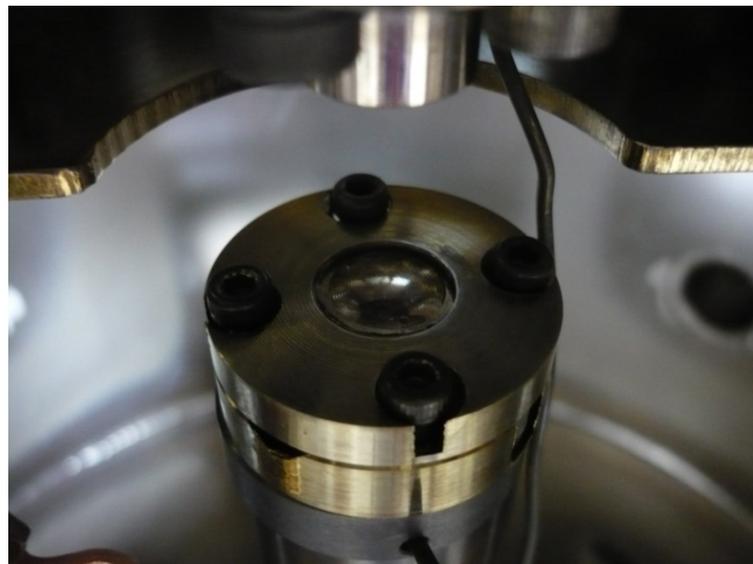


圖 4.6 微結構熱壓實驗模仁夾具外觀圖

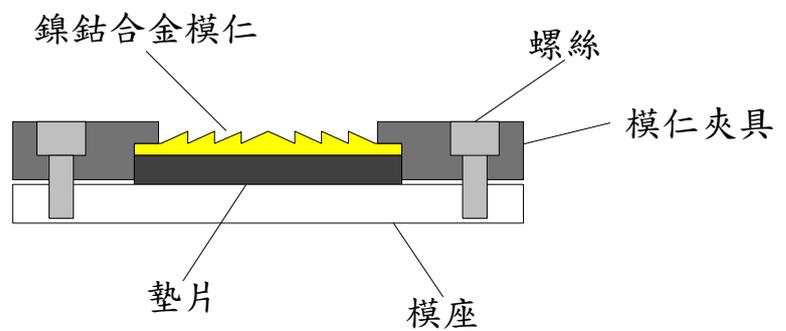


圖 4.7 微結構熱壓實驗模仁夾具組裝示意圖



圖 4.8 碳化鎢平面拋光模仁組裝外觀圖

控制系統則可分為觸控面板控制、壓印力控制和溫度控制等三部分，外觀圖分別如圖 4.9、圖 4.10、圖 4.11，其中觸控面板控制主要為腔體抽真空次數和加壓時間的設定。此外，由於機台本身抽真空與充氮氣之行程為內建之設定，抽真空行程只會在加熱實驗前進行，目的為排除加熱腔體內易於高溫中與玻璃試片起反應之空氣，並在實驗過程中充入氮氣作為保護氣體，避免模仁或玻璃試片在高溫中與空氣產生氧化或其他不必要之反應。



圖 4.9 觸控面板控制



圖 4.10 壓印力控制顯示器



圖 4.11 上下模仁溫度控制顯示器

4.2.2 微結構熱壓實驗流程

微結構熱壓實驗流程如圖 4.12；在進行微結構熱壓實驗前，首先進行鎳鈷合金材料耐熱實驗，目的為找出鎳鈷合金之耐熱極限，得到其在高溫下可用之溫度範圍，再進行材料沾黏實驗，找出在何種溫度下進行熱壓實驗，模仁與玻璃試片較不易產生沾黏情形，其後利用沾黏實驗所得之溫度參數進行微結構熱壓實驗；實驗後使用光學顯微鏡、輪廓儀等儀器，量測模仁與玻璃成品表面品質和結構尺寸，並探討實驗參數與成形性之間的關係。

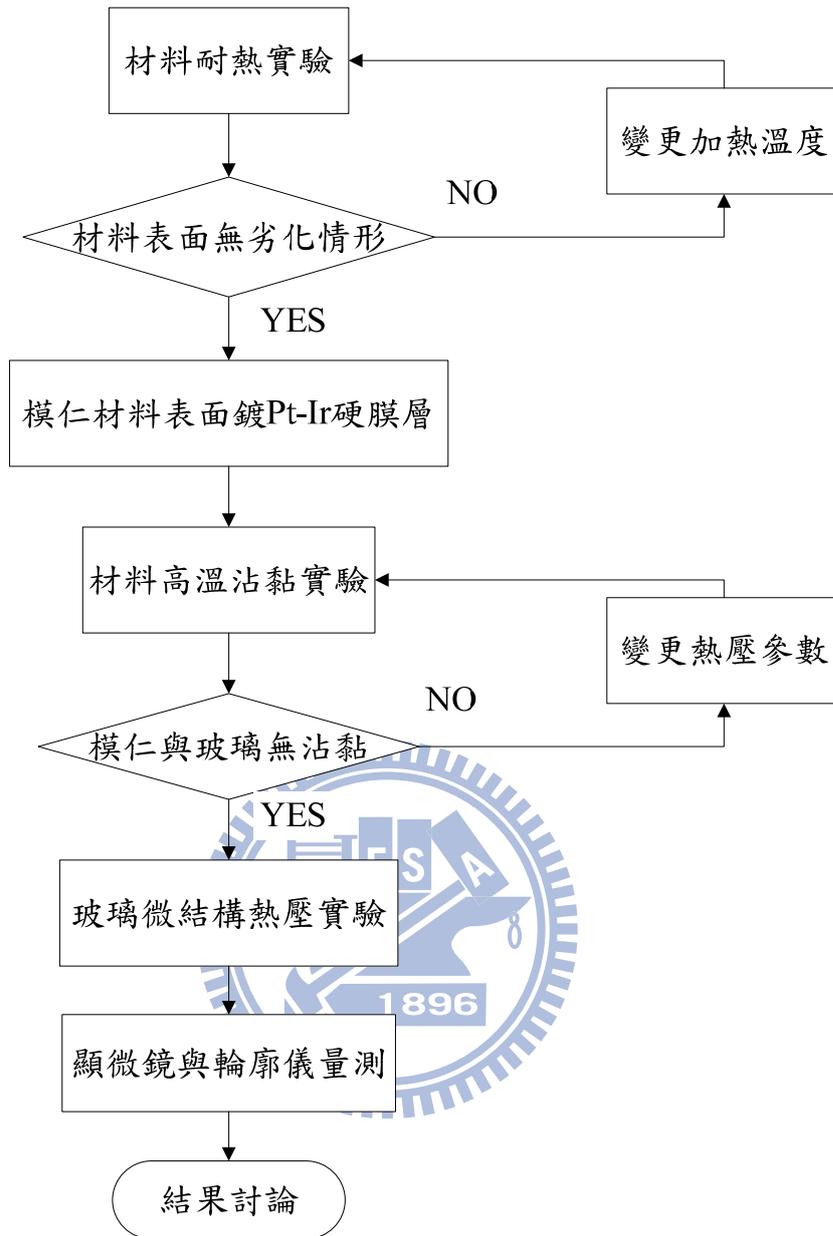


圖 4.12 微結構熱壓實驗流程圖

4.2.3 電鑄鎳鈷合金材料高溫耐熱實驗

材料耐熱實驗方法為將未鍍硬膜層之鎳鈷合金材料放進加熱爐中並抽真空進行升溫、保溫與降溫的過程，再從實驗結果觀察表面劣化情形，以推測其高溫耐熱的使用範圍，實驗結果如表 4.2 所示；由實驗結果可知，

鎳鈷合金耐熱極限在 440°C 還可保持表面完整沒有劣化現象，超過此溫度後表面會變色且表面品質呈劣化現象，因此後續熱壓實驗考慮模仁材料耐熱範圍，而採用 Tg 點為 390°C 之編號 K-PSK100 玻璃試片進行成形研究。

表 4.2 鎳鈷合金材料耐熱實驗

加 熱 溫 度	400°C	
	430°C	
	440°C	
	445°C	
	455°C	

4.2.4 電鑄鎳鈷合金模仁高溫沾黏實驗

由前一節耐熱實驗得出未鍍硬膜層鎳鈷合金材料耐熱範圍後，再來進行模仁材料高溫沾黏實驗，目的為測試鍍 Pt-Ir 硬膜層之電鑄鎳鈷合金材料在何種溫度下較不易與玻璃試片產生沾黏反應，實驗所使用之模仁為平面型電鑄鎳鈷合金，尺寸為 1mm X 1mm，表面鍍上 Pt-Ir 硬膜層，並添加 Cr 做為鍍膜中介層，外觀如圖 4.13；玻璃試片則使用 Sumita 公司生產編號為 K-PSK100 之低 Tg 點玻璃圓錠，Tg 點為 390°C，尺寸為直徑 7mm 高 6.5mm，玻璃試片外觀如圖 4.14。

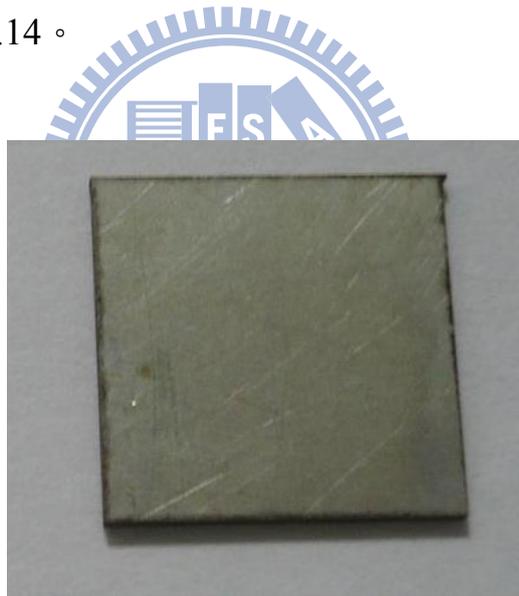


圖 4.13 高溫沾黏實驗用鍍 Pt-Ir 之鎳鈷合金模仁



圖 4.14 K-PSK100 玻璃試片

實驗步驟與圖 3.26 玻璃微結構熱壓實驗相同，除了溫度外之實驗參數主要為參考本實驗室先前研究與儀科中心之實驗經驗而得，實驗參數如表 4.3；在實驗結果方面，除了觀察有無沾黏外，並記錄了實驗後玻璃試片之壓縮量，做為後續微結構熱壓實驗預測試片變形量之參考，實驗結果如表 4.4。

表 4.3 電鑄鎳鈷合金鍍 Pt-Ir 高溫沾黏實驗參數表

玻璃材料	K-PSK100	升溫時間	5min
模仁材質	電鑄鎳鈷合金 鍍 Pt-Ir 硬膜層	持溫時間	20min
		壓印力	100N
模造氣氛	氮氣	保壓時間	10s

表 4.4 高溫沾黏實驗實驗結果

熱壓溫度	試片 壓縮量(mm)	玻璃試片實驗結果	是否沾黏
400°C	0.76		無沾黏
410°C	0.83		無沾黏
440°C	4.08		無沾黏
460°C	5.17		無沾黏
470°C	破碎		無沾黏
500°C	破碎		沾黏

由表 4.4 實驗結果可知，K-PSK100 玻璃試片在熱壓溫度 400°C~470°C 之間不會有沾黏情形發生，但在 470°C 時玻璃試片則有變形量過大產生破裂之情形，所以在後續微結構熱壓實驗，溫度參數的選取會優先採用於 400°C~460°C 之間進行實驗。

4.2.5 電鑄鎳鈷合金微結構模仁熱壓實驗

本節所使用之微結構模仁尺寸同 3.5 節初步熱壓實驗模仁，電鑄厚度為 0.7mm，並於表面鍍添加 Cr 做為中介層之貴金屬 Pt-Ir 硬膜層增加其高溫穩定性。實驗參數以壓印力為變數進行實驗，共有壓印力 30N、50N、100N 三次實驗，熱壓溫度則參考 4.2.3 節高溫沾黏實驗之結果設定為 440°C，實驗參數如表 4.5。

表 4.5 玻璃微結構熱壓-壓力實驗參數表

玻璃材料	K-PSK100	升溫時間	5min
模仁材質	電鑄鎳鈷合金 鍍 Pt-Ir 硬膜層	持溫時間	20min
		熱壓溫度	440°C
模造氣氛	氮氣	保壓時間	10s
荷重壓力	30N、50N、100N		

在實驗結果方面，壓印力 50N 和 100N 兩組實驗中，由於玻璃試片邊緣在熱壓變形過程中沾黏到無鍍膜之夾具(示意如圖 4.15)，以致邊緣在脫模時會有破碎現象產生(如圖 4.16)，所以使用輪廓儀量測時，將以量測結構較為完整之中央區域為主要探討對象。

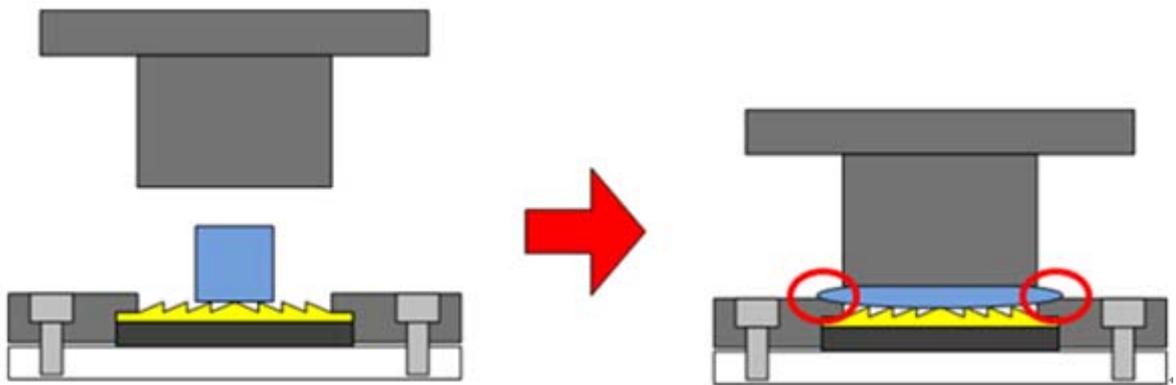


圖 4.15 玻璃在熱壓過程與夾具沾黏示意圖



圖 4.16 玻璃試片邊緣與夾具沾黏

實驗結果之表面形貌觀測如表 4.6；在輪廓量測方面，除了量測微結構轉印後玻璃試片之表面輪廓外，並將試片輪廓點資料進行翻轉與平移，和實驗後模仁輪廓量測最中間結構處貼齊並觀察其填充情況，輪廓儀量測

如表 4.7 所示。

表 4.6 微結構壓印力實驗結果-表面形貌觀測

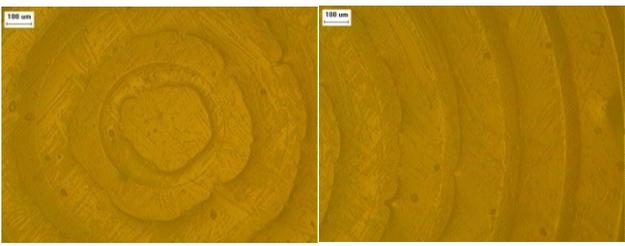
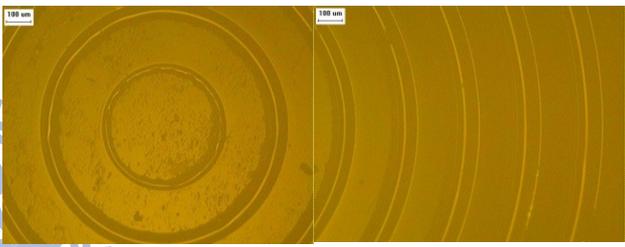
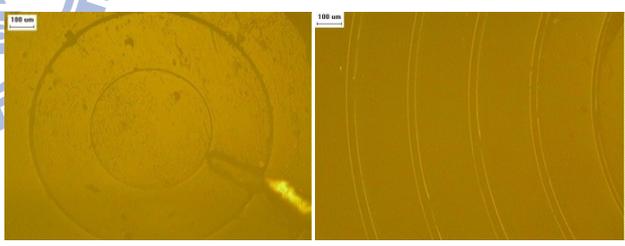
壓印力	外觀	顯微鏡觀測
30N	 The macro view shows a circular, slightly flattened sample with concentric rings. The micro view shows a close-up of these concentric rings.	 Two micrographs showing the surface texture of the 30N sample. The left image shows a circular area with concentric rings, and the right image shows a close-up of the rings. Both images include a 100 μm scale bar.
50N	 The macro view shows a circular sample that is more flattened and has some irregularities. The micro view shows a close-up of the concentric rings, which appear more pronounced.	 Two micrographs showing the surface texture of the 50N sample. The left image shows a circular area with concentric rings, and the right image shows a close-up of the rings. Both images include a 100 μm scale bar.
100N	 The macro view shows a circular sample that is significantly flattened and has some irregularities. The micro view shows a close-up of the concentric rings, which appear more pronounced and somewhat irregular.	 Two micrographs showing the surface texture of the 100N sample. The left image shows a circular area with concentric rings, and the right image shows a close-up of the rings. Both images include a 100 μm scale bar.

表 4.7 壓印力實驗結果輪廓量測

壓印力	輪廓儀量測(mm)，實驗結果與模仁比較
30N	
50N	
100N	

由壓印力實驗結果輪廓量測可知，30N 壓印力之試片結構填充程度最差，而 50N 和 100N 壓印力兩組之試片比較，雖然 100N 壓印力試片邊緣破裂情形較為嚴重，但比較兩試片中央結構較完整處，100N 壓印力之試片則呈現較佳的填充狀況；在光學顯微鏡觀測圖片也可比較出 100N 壓印力之試片表面結構較為明顯；所以可知玻璃試片之填充程度會與壓印力呈正相關，壓印力越大試片填充程度越佳，但是過大的壓印力容易造成試片變形量過大而有破裂情形產生，所以嘗試使用金屬墊片進行控制加壓行程之實驗，實驗方法示意如，實驗參數同表 4.5，壓印力為 100N，加壓行程控制為 4.5mm，實驗結果如表 4.8。

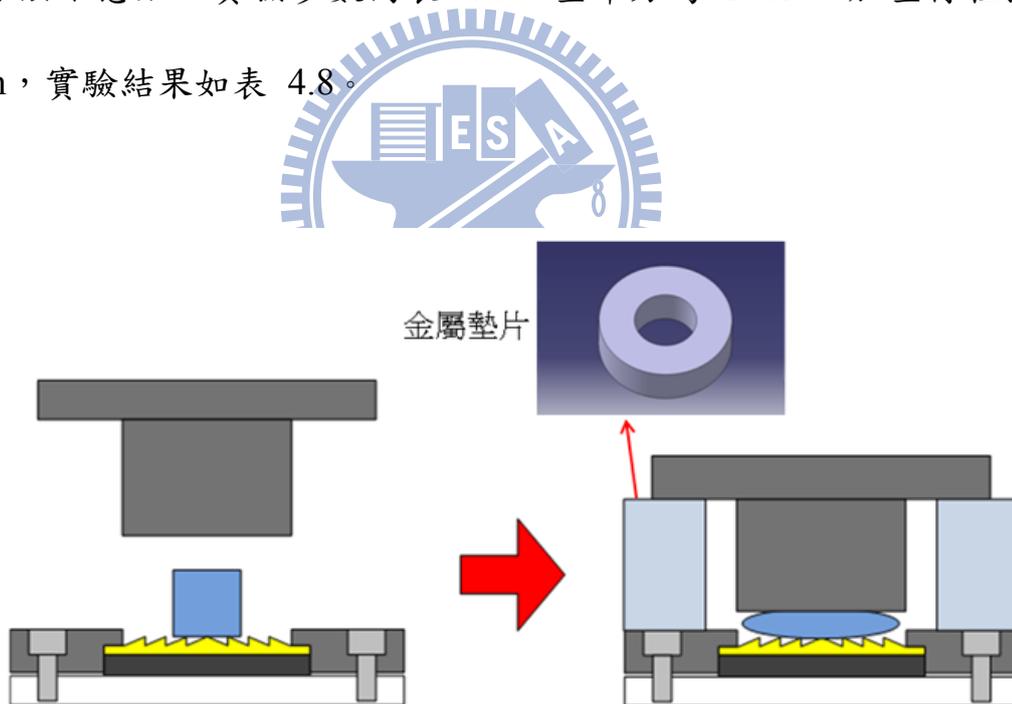
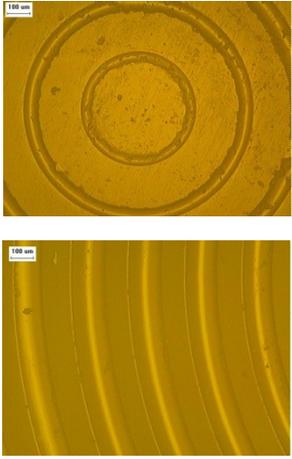
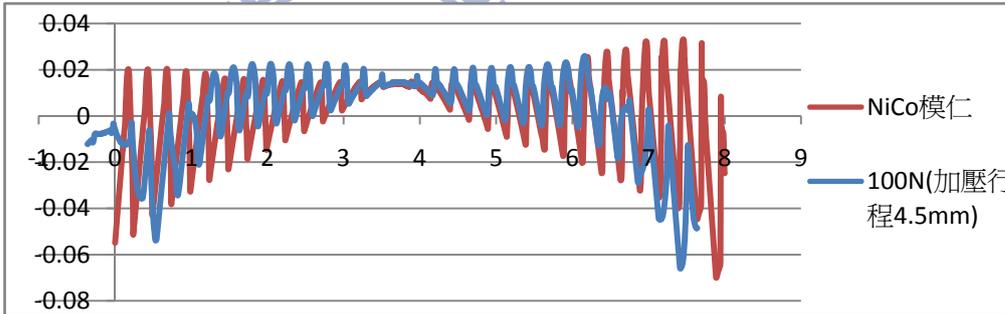


圖 4.17 使用金屬墊片進行控制加壓形成實驗示意圖

表 4.8 壓印力 100N，加壓行程 4.5mm 熱壓實驗結果

壓印力	外觀	顯微鏡觀測
<p>100N 加壓行程 4.5mm</p>		
	<p>輪廓儀量測(mm)，實驗結果與模仁比較</p>	
		

由表 4.8 實驗結果可知，經過加壓行程控制之試片，實驗後試片表面形貌保持較為完整；在顯微鏡觀測圖中，雖然其表面結構比起表 4.6 壓印力 100N 實驗結果結構較為不明顯，但在輪廓儀量測圖中可知成形之 Fresnel 結構較多圈，結構兩側也較為對稱，並且有初步的 Fresnel 結構凹透鏡之光學效果呈現如圖 4.18。



圖 4.18 Fresnel 結構之凹透鏡光學效果

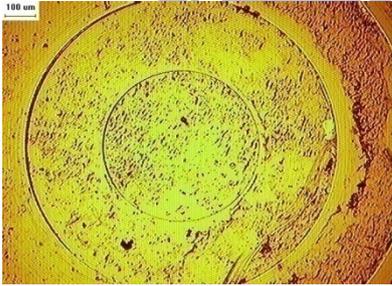
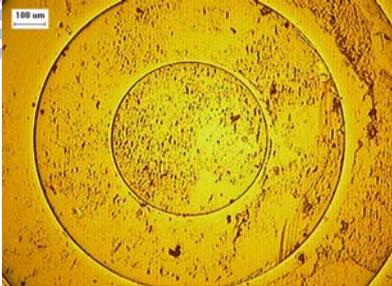
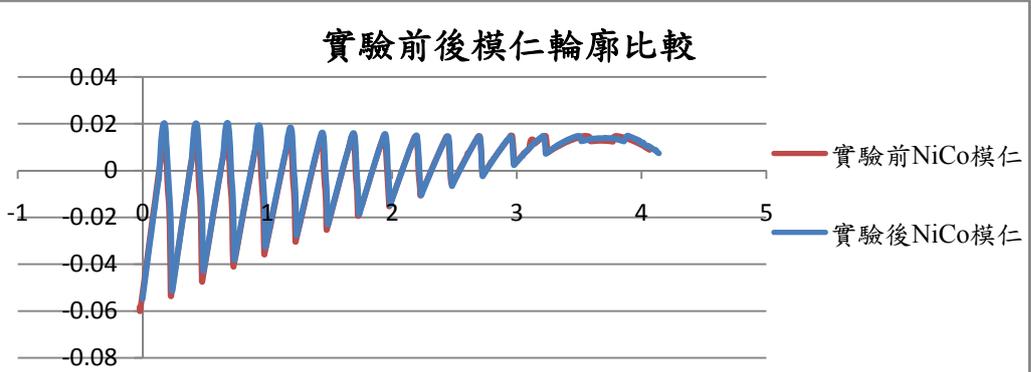
經過以上四次反覆熱壓實驗後，電鑄鎳鈷合金模仁邊緣有破裂之情況發生如圖 4.19，為了確定其表面微結構是否有嚴重變形，使用顯微鏡和輪廓儀觀測與實驗前模仁進行比較，如表 4.9 所示，其中輪廓儀量測由於實驗後模仁有破裂情況，所以只量測較為完整的半徑與實驗前進行比較。由表 4.9 比較可知，在顯微鏡觀測方面，實驗前後表面形貌變化不明顯，微結構也無明顯破裂或變形現象，輪廓量測方面，除了輪廓中央與較外圈處有些微變形外，大部分微結構與實驗前吻合，並無明顯變化，所以推測模仁邊緣發生破裂之原因，可能為加熱時模仁與夾具熱膨脹係數不同而產生擠壓變形，造成模仁邊緣破裂之情形發生，因此在後續實驗考慮模仁熱膨脹之因素，於夾具與模仁間留下間隙(如

圖 4.20)，以避免模仁受夾具擠壓造成破裂情形發生。



圖 4.19 微結構實驗後模仁破裂外觀圖

表 4.9 熱壓實驗前後模仁比較

	實驗前鎳鈷合金模仁	實驗後鎳鈷合金模仁
光學顯微鏡		
輪廓儀量測	<p style="text-align: center;">實驗前後模仁輪廓比較</p> 	

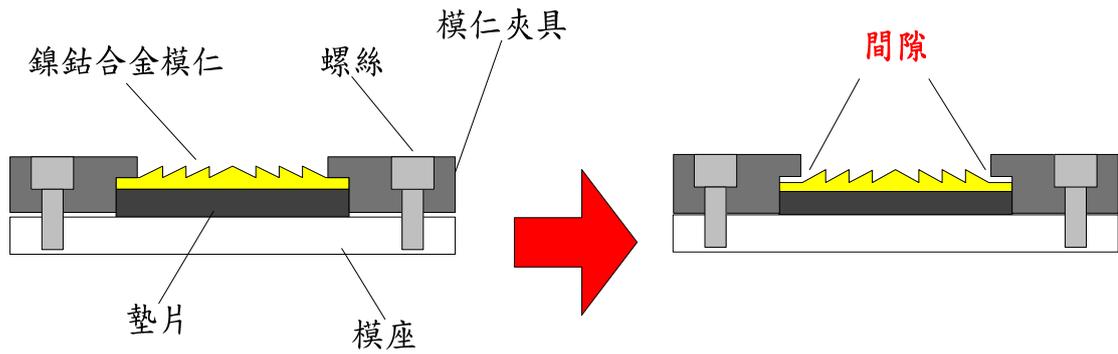
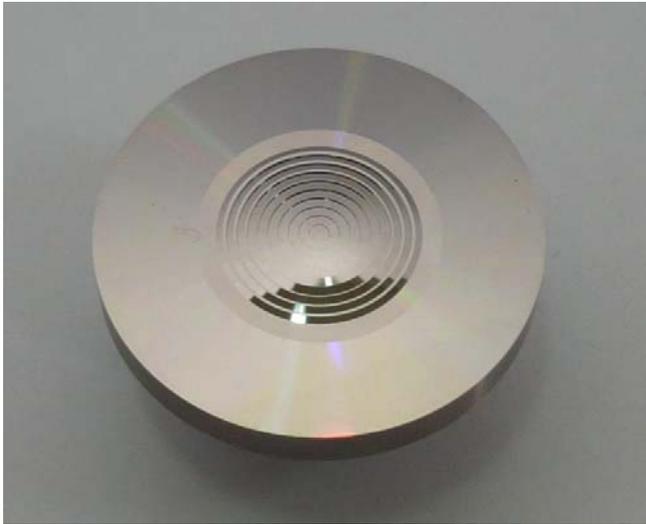


圖 4.20 微結構熱壓實驗模仁夾具預留間隙示意圖

4.2.6 製作 $\text{pitch}=0.5\text{mm}$ 之 Fresnel 微結構模仁進行熱壓實驗

本研究於研究後期搭配實驗室另一位廖建榮同學之研究主題光學 Fresnel 透鏡設計，進行 $\text{pitch}=0.5\text{mm}$ 之 Fresnel 結構凸透鏡熱壓實驗，新的電鑄母模製作方式為使用 STAVAX 材料表層鍍無電解鎳，再利用超精密加工機加工微結構於其表層，電鑄母模外觀與微結構尺寸點資料如圖 4.21 所示。



X(mm)	Y(mm)
0	0.264
0.5	0.25
0.5	0.278
1	0.25
1	0.292
1.5	0.25
1.5	0.306
2	0.25
2	0.32
2.5	0.25
2.5	0.333
3	0.25
3	0.347
3.5	0.25
3.5	0.36
4	0.25
4	0.373
4.5	0.25
4.5	0.386
5	0.25

圖 4.21 pitch=0.5mm 之電鑄母膜外觀與微結構點資料

電鑄翻模模仁厚度為 0.5mm，依序共完成三片如圖 4.22 所示，並將其
 中一片使用輪廓儀量測三組不同方向直徑之表面形貌，比較其 Fresnel 結構
 對稱性，結果如圖 4.23 所示，接著再個別量測三片模仁表面輪廓比較其複
 製性，結果如圖 4.24 所示，由圖 4.23 和圖 4.24 可知電鑄完成之
 pitch=0.5mm 鎳鈷合金模仁具有良好的對稱性和複製性。

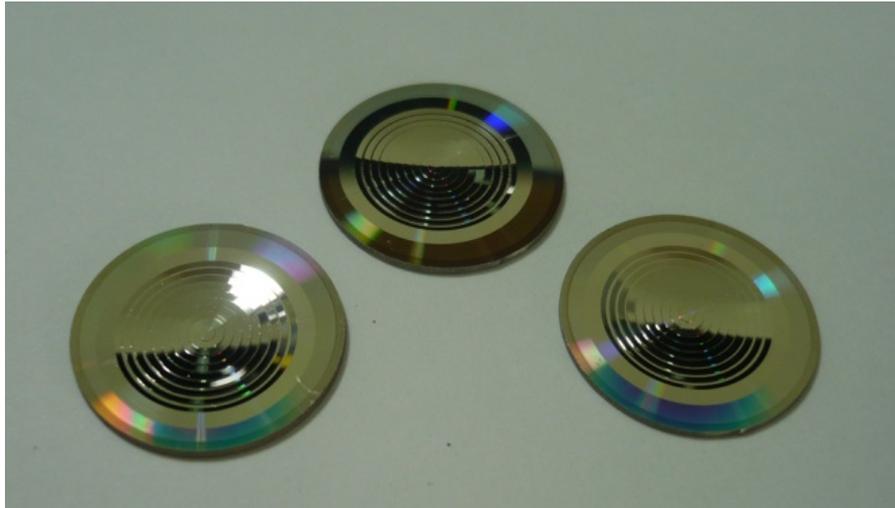


圖 4.22 電鑄完成(pitch=0.5mm)鎳鈷合金模仁外觀圖

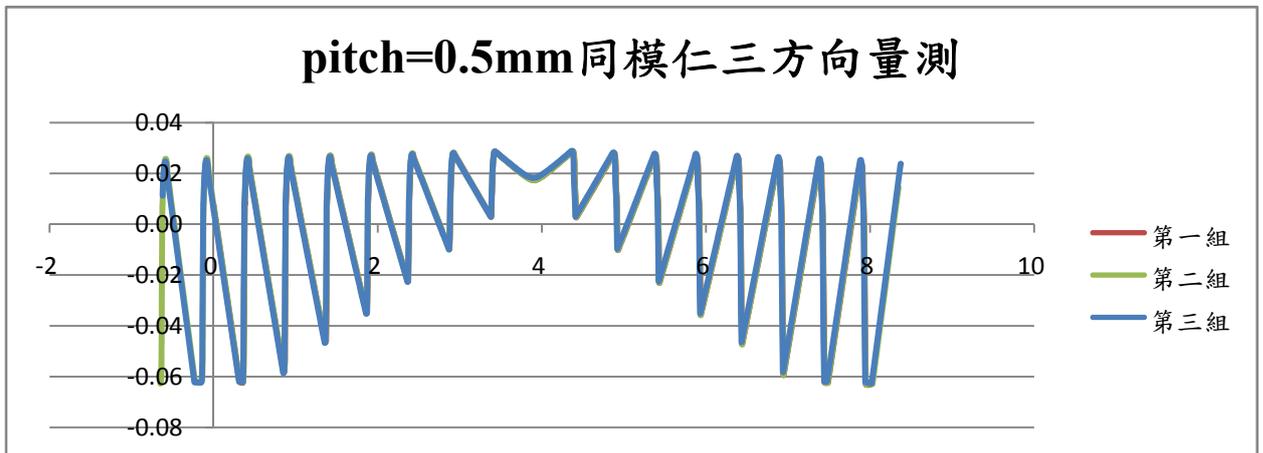


圖 4.23 pitch=0.5mm 模仁結構對稱性比較圖

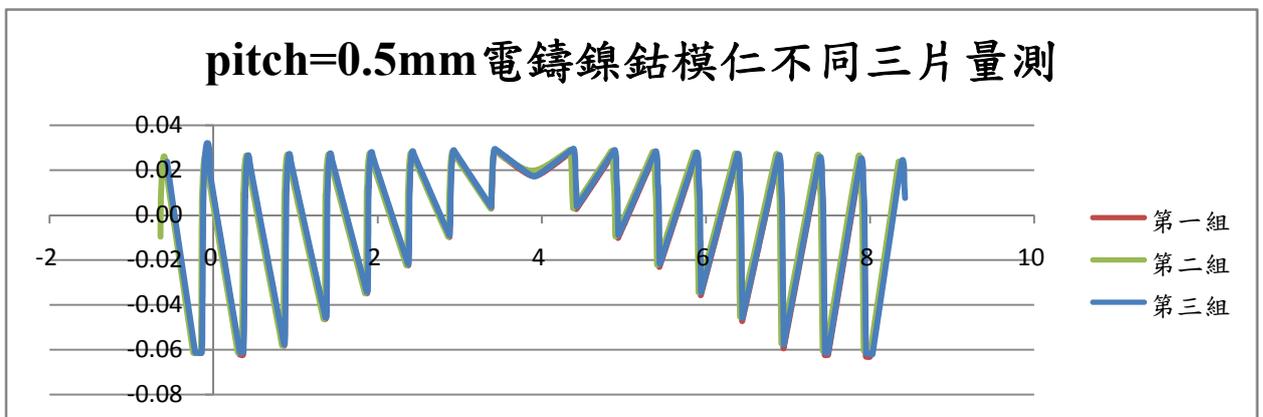


圖 4.24 pitch=0.5mm 模仁結構複製性比較圖

製作完成 pitch=0.5mm 之電鑄模仁後，交由儀科中心進行貴金屬硬膜層 Pt-Ir 之鍍膜，而此次鍍膜則配合儀科中心之測試，使用未添加鉻做為中介層之 Pt-Ir 硬膜層，探討硬膜層之附著性；在玻璃微結構熱壓實驗，則以熱壓溫度、壓印力、保壓時間、加壓行程等參數為主要變數進行實驗，實驗後使用光學顯微鏡觀測與表面粗度輪廓儀量測，探討實驗參數與微結構成形之間的關係，實驗中固定之參數如表 4.10。

表 4.10 pitch=0.5mm 微結構模仁熱壓實驗固定之參數表

玻璃材料	K-PSK100	升溫時間	5min
模仁材質	電鑄鎳鈷合金	持溫時間	20min
	鍍 Pt-Ir 硬膜層 (未添加 Cr)	氣體環境	氮氣

此外，由於模仁在實驗前進行表面粗度輪廓儀之量測，微結構表面有被探針掃過之刮痕，因此在熱壓實驗後，玻璃試片表面也有刮痕轉印之痕跡顯示。實驗結果敘述如下。

以壓印力為變數之實驗結果如表 4.11 和表 4.12，分別在不同保壓時間下進行實驗，由實驗結果可知壓印力越大微結構成形性越佳，但過大的壓印力容易造成試片邊緣有破裂之情形發生。

以熱壓溫度為變數之實驗結果如表 4.13，進行熱壓溫度 440°C 和 460°C

兩組實驗，可知在較高的溫度下進行熱壓，試片填充情況較佳，但由 4.2.4 節材料沾黏實驗可知，熱壓溫度越高則越容易造成玻璃與模仁沾黏，所以在參數的選取上需考慮沾黏問題。

以保壓時間為變數之實驗結果如表 4.14，進行保壓時間 5 秒、10 秒、15 秒三組實驗，由實驗結果可看出，保壓時間越長結構表面形貌轉印越清楚，但對結構整體填充程度影響較不明顯。

以加壓行程為變數之實驗結果如表 4.15，在同樣的熱壓溫度、壓印力與保壓時間下進行加壓行程 1mm 和 4mm 兩組實驗，由實驗結果可知，雖然兩組實驗結果鏡心厚度差 3mm，但填充程度卻無顯著之差別，可知加壓行程的控制影響微結構填充程度並不明顯。

表 4.16 之實驗結果為將加壓行程固定為 1mm，進行熱壓溫度 440°C 和 460°C 兩組實驗，由實驗結果可知，雖然兩組實驗結果之鏡心厚度無明顯之差別，但較高之熱壓溫度則有較佳之填充結果呈現。

表 4.11 微結構熱壓實驗-壓印力(1)

微結構熱壓實驗-壓印力(1)			
<p>熱壓溫度440°C，保壓10s</p>			
	<p>壓印力 30N 鏡心厚度 5.5mm</p>	<p>壓印力 35N 鏡心厚度 2.2mm</p>	<p>壓印力 50N 鏡心厚度 2.2mm</p>
外觀			
顯微鏡 觀測			

表 4.12 微結構熱壓實驗-壓印力(2)

微結構熱壓實驗-壓印力(2)		
熱壓溫度440°C，保壓15s		
	<p>壓印力 35N</p> <p>鏡心厚度 2.3mm</p>	<p>壓印力 50N</p> <p>鏡心厚度 1.84mm</p>
外觀		
顯微鏡 觀測		

表 4.13 微結構熱壓實驗-熱壓溫度

微結構熱壓實驗-熱壓溫度		
<p>壓印力30N，保壓10s</p>		
	<p>熱壓溫度 440°C 鏡心厚度 5.5mm</p>	<p>熱壓溫度 460°C 鏡心厚度 5.2mm</p>
外觀		
顯微鏡 觀測		

表 4.14 微結構熱壓實驗-保壓時間

微結構熱壓實驗-保壓時間			
<p style="text-align: center;">熱壓溫度440°C，壓印力35N</p>			
	保壓 5s 鏡心厚度 2.3mm	保壓 10s 鏡心厚度 2.2mm	保壓 15s 鏡心厚度 2.3mm
外觀			
顯微鏡 觀測	 	 	

表 4.15 微結構熱壓實驗-加壓行程

微結構熱壓實驗-加壓行程		
<p>熱壓溫度460°C，加壓50N，持壓15s</p>		
	<p>加壓行程 1mm 鏡心厚度 5.6mm</p>	<p>加壓行程 4mm 鏡心厚度 2.76mm</p>
外觀		
顯微鏡 觀測		

表 4.16 微結構熱壓實驗-熱壓溫度(加壓行程固定)

微結構熱壓實驗-熱壓溫度(加壓行程固定)	
<p>壓印力50N，保壓15s，加壓行程1mm</p>	
	<p>熱壓溫度 450°C 鏡心厚度 5.73mm</p>
	<p>熱壓溫度 460°C 鏡心厚度 5.6mm</p>
外觀	
顯微鏡 觀測	

微結構熱壓實驗後，實驗前後模仁比較如表 4.17，實驗前後模仁微結構高度比較如表 4.18 所示，可知模仁表面硬膜層於實驗過程中與玻璃試片沾黏造成脫落之現象，顯示未添加鉻為中介層之 Pt-Ir 硬膜層在高溫下附著力不佳，容易造成硬膜層的沾黏與脫落；而本次實驗模仁與夾具間留有間隙，使得模仁邊緣沒有如前次實驗發生破裂之情形，但由輪廓量測比較可知，模仁依然發生彎曲變形之情況，比較實驗前後微結構高度，微結構變形量皆在 5.5um 以內，可知在高溫下玻璃試片並沒造成模仁微結構明顯之變形，所以推測造成模仁整體彎曲變形應為夾具熱膨脹時向內擠壓造成，如圖 4.25 所示。



表 4.17 pitch=0.5mm 模仁熱壓實驗前後比較表

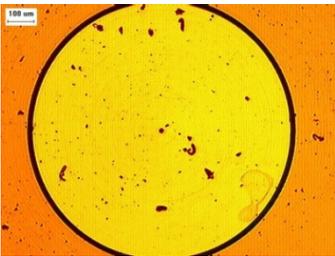
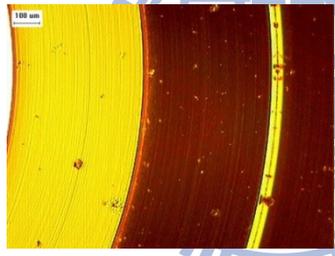
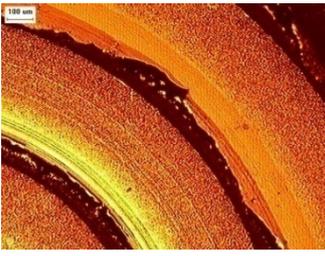
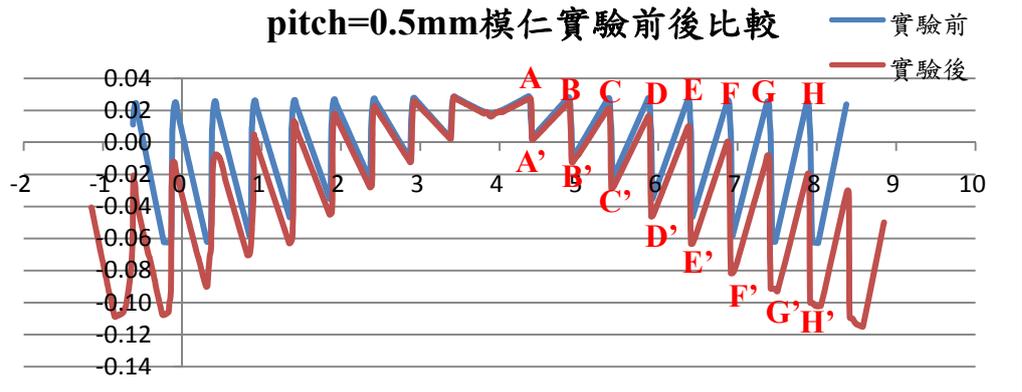
	熱壓實驗前模仁	熱壓實驗後模仁
外觀		
顯微鏡 觀測	 	 
輪廓儀 量測比較	<p style="text-align: center;">pitch=0.5mm 模仁實驗前後比較</p> 	

表 4.18 熱壓實驗前後模仁微結構變形量比較表

	實驗後-實驗前(um)	實驗後/實驗前
A-A'	0.299	101%
B-B'	-0.582	98%
C-C'	-0.187	100%
D-D'	0.088	100%
E-E'	0.147	100%
F-F'	-2.354	97%
G-G'	-2.749	97%
H-H'	-5.356	94%

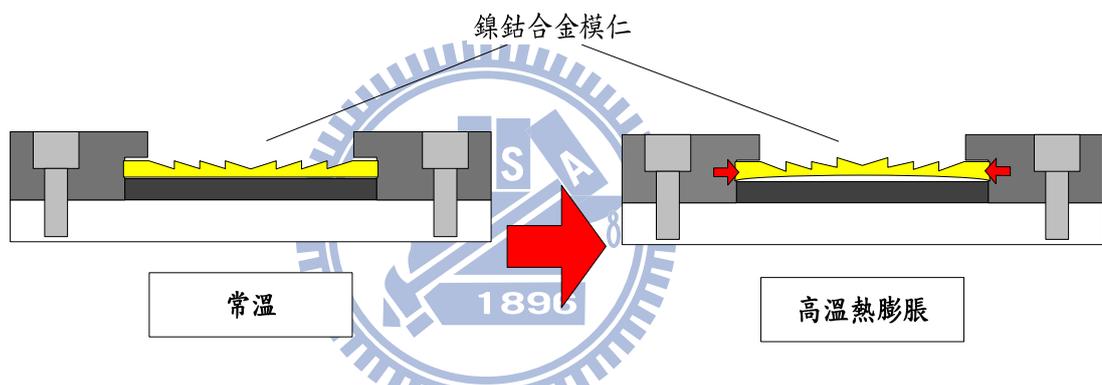


圖 4.25 夾具熱膨脹擠壓模仁示意圖

4.3 實驗結果歸納與分析

4.3.1 實驗結果歸納

經由本章節一系列玻璃微結構熱壓實驗，可歸納出以下幾點：

1. 由材料耐熱實驗可知，鎳鈷合金未鍍硬膜層前之耐熱溫度約為 450°C，超過此溫度後合金表面會有劣化之情形發生，須鍍硬膜層加強其模仁表面高溫穩定性才能進行玻璃熱壓實驗。

2. 由材料沾黏實驗可知，鍍添加 Cr 之 Pt-Ir 硬膜層的電鑄鎳鈷合金在高溫下須超過 500°C 才會與 K-PSK 玻璃試片發生沾黏，由試片變形量可知在壓印力 100N 的參數下，400°C~460°C 為合適之熱壓溫度。
3. 電鑄翻模後之模仁經由輪廓儀量測其表面形貌可知，電鑄模仁表面 Fresnel 結構對稱性佳，且多次翻鑄後之模仁微結構複製性也保持良好。
4. 由 pitch=0.25mm 之 Fresnel 結構模仁熱壓實驗，壓印力與填充性成正相關，但太大的壓印力則容易造成試片厚度過薄而有破裂之情形發生，須藉由加壓行程控制或壓印力的取捨保持實驗後試片完整性。
5. 由 pitch=0.5mm 之 Fresnel 結構模仁熱壓實驗可知，在壓印力、熱壓溫度、保壓時間與加壓行程等參數中，壓印力與熱壓溫度對填充性有較明顯之影響，而保壓時間與加壓行程控制則對填充性影響較不顯著。
6. 未添加 Cr 做為中介層之 Pt-Ir 硬膜層，在高溫下附著力不佳，容易與玻璃試片起反應造成沾黏與脫落。
7. 微結構熱壓實驗中，玻璃試片變形量較大時，容易於高溫中碰觸到不銹鋼之模仁夾具而造成沾黏之情形，並在實驗後脫模時發生試片沾黏破裂之情形；且夾具與模仁於高溫下容易因為熱膨脹而有擠壓情形發生，造成模仁邊緣破裂或變形之情況，因此在模仁夾具的設計上應考慮試片變形量與模仁間的熱膨脹變形。
8. 本實驗玻璃熱壓微結構之成品，填充性雖然皆未達到百分之百，但實驗

結果已具有初步聚光效果如圖 4.26 所示。



圖 4.26 具有聚光效果之實驗成品

4.3.2 實驗量測誤差分析

本研究所使用量測微結構儀器為表面粗度輪廓儀，屬於接觸式探針量測，由於 Fresnel 結構有垂直壁之特徵，所以使用探針量測時有其誤差存在，因此在電鑄模仁製作後量測其表面輪廓並與結構設計值進行比較，pitch=0.25mm 和 pitch=0.5mm 模仁量測比較結果分別如圖 4.27 和圖 4.28 所示，其中 pitch=0.25mm 模仁由於結構深寬比較大，因此量測時探針較無

法深入底部，量測誤差較為明顯，誤差大約在 $10\mu\text{m} \sim 40\mu\text{m}$ ；而 $\text{pitch}=0.5\text{mm}$ 模仁微結構深寬比較小，所以量測誤差較不明顯，誤差約在 $5\mu\text{m}$ 以內，因此在做微結構成形的探討時，須注意誤差的存在。

此外，本研究曾嘗試使用線切割的方式剖面 $\text{pitch}=0.25\text{mm}$ 模仁，並使用光學顯微鏡量測其微結構剖面高度；也嘗試使用白光干涉儀量測模仁微結構之高度，以期能真正量測到模仁完成後之微結構實際尺寸，量測之詳細比較請見附錄 C，由於這兩種方法亦有其量測誤差與限制存在，因此由量測之比較結果只能推測出模仁微結構實際尺寸應介於設計值與表面粗度輪廓儀量測值之間。

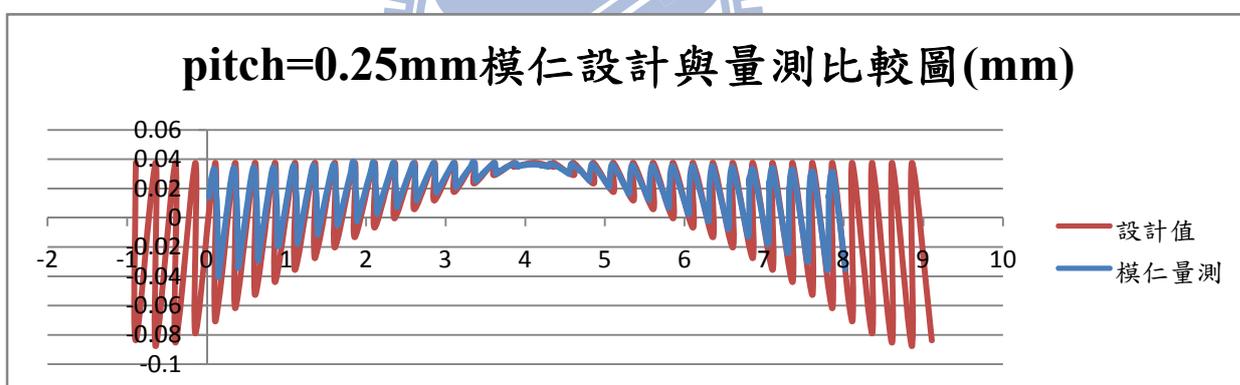


圖 4.27 pitch=0.25mm 模仁設計與量測比較圖

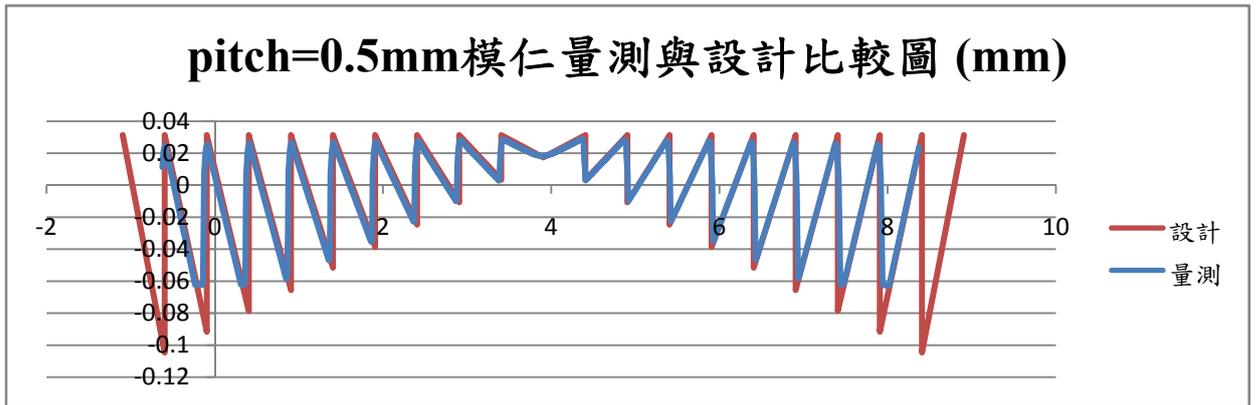
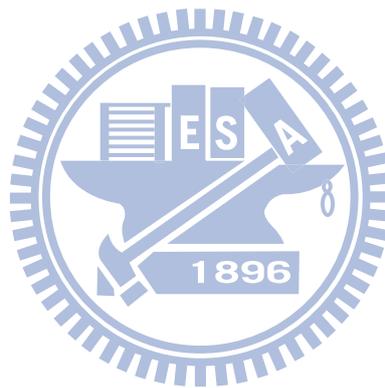


圖 4.28 pitch=0.5mm 模仁量測與設計比較圖



第五章結論與未來展望

光學玻璃相較於光學塑膠有許多特性之優勢，使得高品質及高精度需求之光學產品均需使用玻璃做為元件材料；在製作方法上，熱壓成形技術由於相較於傳統製作方法有低成本大量生產之優點，因此為目前生產光學玻璃透鏡之主要發展技術。本研究嘗試使用電鑄翻模法製作結構間距 $250\ \mu\text{m}$ 和 $500\ \mu\text{m}$ ，深度在 $10\ \mu\text{m}\sim 100\ \mu\text{m}$ 之間的兩種 Fresnel 結構之鎳鈷合金模仁，並進行一系列之玻璃微結構熱壓實驗，探討熱壓製程參數與結構成形性之間的關係。



5.1 結論

本研究經由模仁材料與微結構加工方法選擇到後續之玻璃微結構熱壓實驗，可得以下之結論：

1. 在模仁材料選擇方面，碳化鎢與玻璃碳雖為高溫穩定性佳之模仁材料，但其表面微結構加工困難，且有成本昂貴之缺點，相較於成本與加工方法，電鑄翻模鎳鈷合金則有較為便宜且可大量翻製之優點，因此本研究在模仁材料與微結構加工方法選擇上，採用電鑄鎳鈷合金做為玻璃熱壓微結構實驗之模仁，並在其表面鍍上 Pt-Ir 硬膜層增加其表面硬度與高溫穩定性。
2. 模仁表面硬膜層之好壞絕對影響壓印成品的結果，本研究配合儀科中心

鍍膜測試，共使用有無添加 Cr 做為中介層之兩種 Pt-Ir 硬膜層，由實驗結果可知，無添加 Cr 做為中介層之 Pt-Ir 硬膜層容易於高溫下與玻璃試片產生沾黏脫落情形；有添加 Cr 做為中介層之 Pt-Ir 硬膜層則有良好之高溫穩定性與離形性，不易與玻璃產生反應，為一品質良好之模仁表面硬膜層。

3. 由玻璃微結構熱壓實驗，不銹鋼之模仁夾具易與鎳鈷合金在高溫下熱膨脹有擠壓之情形，且玻璃試片變形量較大時容易與夾具形成沾黏，因此在夾具的設計上應該考量熱膨脹與試片沾黏之情況，甚至可嘗試於夾具表面鍍離形性佳之硬膜層避免沾黏問題。
4. 由玻璃熱壓微結構實驗，製程參數對於微結構之填充性有不同程度之影響，壓印力與熱壓溫度為影響較明顯之參數，保壓時間與加壓行程的控制則對於填充性的影響較不顯著。
5. 儘管熱壓實驗後，鎳鈷合金模仁皆有邊緣破裂或彎曲變形之情形發生，但其微結構高度依然與實驗前相差不明顯，因此如能改善夾具之設計，或使用與模仁熱膨脹系數相近之高溫耐熱材料做為夾具材料，將可保持模仁表面結構於實驗後完好並且增加模仁之壽命。
6. 本研究玻璃熱壓實驗之成品，填充性雖然皆未達到百分之百，但實驗結果已具有初步 Fresnel 結構凸透鏡與凹透鏡之光學效果。

5.2 未來展望

1. 本研究所使用之熱壓設備能控制之參數有限，如能進行設備改良，增加實驗過程可控制之參數，如熱壓溫度與壓印力對應之多階控制等，將可改善微結構成形之製程問題。
2. 本研究進行之熱壓實驗，降溫時間幾乎佔掉整體製程時間，因此如能在降溫過程中充入大量氮氣輔助降溫，將可大幅縮短製程時間。
3. 本研究在玻璃熱壓製程的過程中，由於現階段還未找出有效將試片與模仁對心之方法，造成實驗結果之微結構轉印皆有偏心之現象，如能改善此問題找出試片與微結構模仁之對心方法，將可提升成品之完整性。
4. 玻璃熱壓為低成本量產光學玻璃元件之重要技術，在玻璃微結構元件的製作上更有其優勢，雖然目前研究主要為小尺寸之光學玻璃微結構元件，未來如能朝向大尺寸元件的製作，如太陽能集光器等大型光學元件，相信應用範圍會有更寬廣的發展。
5. 玻璃熱壓微結構製程如能搭配超音波輔助成形進行設備之改良，在熱壓過程中施加超音波於玻璃試片表面，將可增加微結構之填充性與成品完整性。

參考文獻

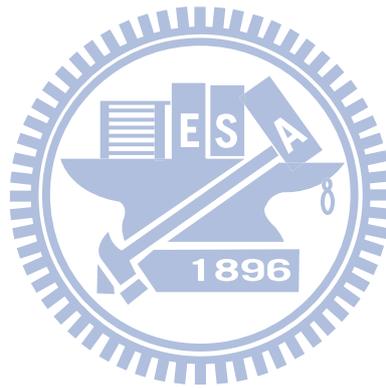
- [1] 駱志龍，*Fresnel 透鏡設計及應用*，國立中央大學光電科學研究所碩士論文，2001 年 7 月
- [2] <http://www.profoto.com/en/products/accessories/lenses/clear-fresnel-lens/>
- [3] 財團法人光電科技工業協進會，1996 年光學元件與器材產業及技術動態調查報告，1997 年。
- [4] 黃建溢，*光學玻璃球面透鏡熱壓成形研究*，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，2004 年 6 月。
- [5] 王嘉偉，*光學玻璃透鏡之熱壓成形研究*，國立交通大學機械工程學系碩士論文，2006 年 6 月。
- [6] 林運賢，*模造玻璃透鏡實驗設備改良與模造成形之研究*，國立交通大學機械工程研究所碩士論文，2008 年 6 月。
- [7] C. F. Gregory, J. Anurag, and Y.Y. Allen, "Precision laboratory apparatus for high temperature compression molding of glass lenses" *Rev. Sci. Instrum.*, **76**, 063101, May 2005.
- [8] S.W. Youn , M. Takahashi, H. Goto, and R. Maeda, "Microstructuring of glassy carbon mold for glass embossing – Comparison of focused ion beam, nano/femtosecond-pulsed laser and mechanical machining," *Microelectronic Engineering*, 83, pp. 2482-2492, June 2006.
- [9] S. W. Youn, M. Takahashi, H. Goto, and R. Maeda, "A study on focused ion beam milling of glassy carbon molds for the thermal imprinting of quartz and borosilicate glasses," *Journal of Micromechanics and*

Microengineering, 16, pp. 2576-2584, October 2006.

- [10] S. W. Youn, M. Takahashi, H. Goto, and R. Maeda, “The effect of heat-treatment conditions on mechanical and morphological properties of a FIB-milled glassy carbon mold with micro patterns,” Journal of Micromechanics and Microengineering, 16, pp. 1277-1284, May 2006.
- [11] S. W. Youn, M. Takahashi, H. Goto, and R. Maeda, “AFM, SEM and nano/micro-indentation studies of the FIB-milled Glassy Carbon surface heat-treated at different conditions,” DTIP of MEMS & MOEMS, pp.26-28, April 2006.
- [12] M. Takahashi, Y. Murakoshi, R. Maeda, and K. Hasegawa, “Large area micro hot embossing of Pyrex glass with GC mold machined by dicing,” Microsyst Technol, 13, pp.379-384, May 2006
- [13] Y. Saotome, “Microformability of optical glasses for precision molding,” Journal of Materials Processing Technology, 140, pp. 379-384, September 2003.
- [14] 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。
- [15] H. Mekar, T. Kitadani, Y. Michiru, and T. Masaharu, “Glass nanoimprint using amorphous Ni-P mold etched by focused-ion beam,” American Vacuum Society, Vol. 25, No. 4, July 2007.
- [16] H. Mekar, T. Tsuchida, J. Uegaki, M. Yasui, M. Yamashita, and M. Takahashi, “Micro lens imprinted on Pyrex glass by using amorphous Ni-P alloy mold,” Microelectronic Engineering, 85, pp.873–876, January 2008
- [17] M. Yasui, M. Takahashi, S. Kaneko, T. Tsuchid, Y. Hirabayashi, K.

- Sugimoto, J. Uegaki, and R. Maeda, "Micro Press Molding of Borosilicate Glass Using Plated Ni–W Molds" Japanese Journal of Applied Physics, Vol. 46, No. 9B, pp. 6378–6381, September 2007
- [18] C. Yang, Y.Y. Allen, Y. Donggang, K. Fritz, and P. Guido, "A reflow process for glass microlens array fabrication by use of precision compression molding," Journal of Micromechanics and Microengineering, 18, April 2008
- [19] M. Komori, H. Uchiyama, H. Takebe, T. Kusuura, K. Kobayashi, H. Kuwahara, and T. Tsuchiya, "Micro/nanoimprinting of glass under high temperature using a CVD diamond mold," Journal of Micromechanics and Microengineering, May 2008
- [20] C. Yang, L. Lei, and Y.Y. Allen, "Fabrication of precision 3D microstructures by use of a combination of ultraprecision diamond turning and reactive ion etching process," Journal of Micromechanics and Microengineering, April 2007
- [21] N. Suzuki, M. Haritani, J. Yang, R. Hino, and E. Shamoto, "Elliptical Vibration Cutting of Tungsten Alloy Molds for Optical Glass Parts," Annals of the CIRP, May 2005
- [22] Y. Jiwang, O. Takashi, Z. Tianfeng, and K. Tsunemoto, "Precision machining of microstructures on electroless-plated NiP surface for molding glass components," Journal of Materials Processing Technology, December 2008
- [23] 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。

- [24] Hans Bach, Norbert Neuroth, editors, *The Properties of optical glass*.
- [25] <http://www.2spi.cn/catalog/mounts/vitreous.html>
- [26] 闕明珠，*微透鏡陣列製程分析*，國立中央大學機械工程研究所碩士論文，2005年6月
- [27] http://www.me.ncu.edu.tw/ckjlin/public_html/course/me6091c/1130%ACx%BAa%ACw.pdf
- [28] http://www.staff.chu.edu.tw/rdoff/2006rd_result/pdf/post-1.pdf



附錄 A 玻璃碳加熱與熱壓實驗

玻璃碳材料實驗分為加熱與熱壓實驗兩種；加熱實驗流程有升溫、降溫、觀察結果等三個步驟；熱壓實驗流程則為升溫、保溫加壓、降溫、觀察結果等四個步驟，實驗流程示意圖分別如圖 A.1 和圖 A.2。

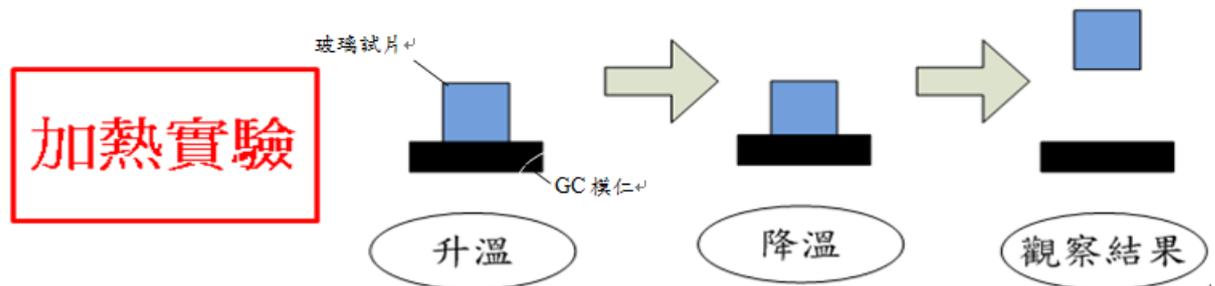


圖 A.1 玻璃碳加熱實驗流程圖

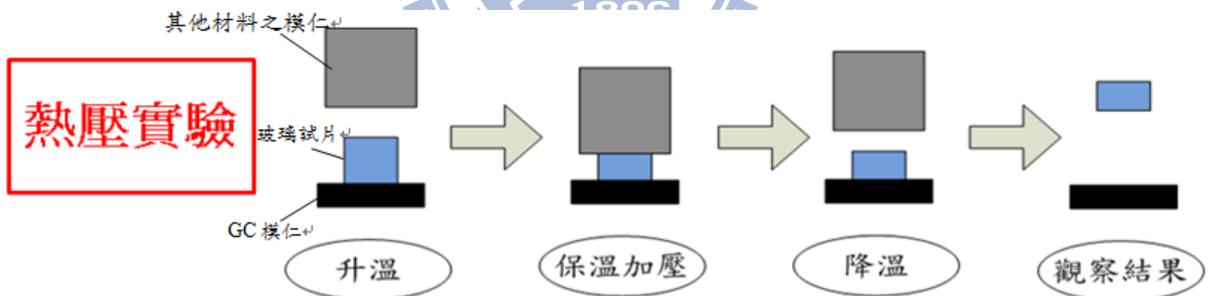


圖 A.2 玻璃碳熱壓實驗流程圖

實驗所使用模仁為 SPI 公司生產型號 SPI-Glas™ 10 之玻璃碳材料，尺寸為長寬各 10mm、高 2mm 的片狀模仁，外觀如圖 A.3，其性質如表 A.1 所示。



圖 A.3 玻璃碳外觀

表 A.1 玻璃碳的性質[25]

玻璃碳(Glassy Carbon)	
密度(g/cm ³)	1.54
最高工作溫度 (°C)	1100
開放式孔洞 (%)	0
滲透係數 (cm ² /s)	10 ⁻¹¹
維氏硬度 (HV)	340
撓曲強度(N/mm ²)	210
耐壓強度(kN/mm ²)	580
楊氏係數 (kN/mm ²)	35
熱膨脹係數 (20 - 200°C), (1/K)	3.5 x 10 ⁻⁶
熱傳導率 (30°C), (W/(K.m))	4.6

本材料實驗所使用的玻璃試片為 Ohara 公司所生產之編號 L-BAL42 玻璃原料，以下簡稱 42 玻璃，外型尺寸為直徑 8mm、高 5.5mm 上下平面拋光之玻璃圓錠，玻璃試片性質如表 A.2，外觀如圖 A.4。

表 A.2 光學玻璃 L-BAL42 材料性質表

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



圖 A.4 L-BAL42 玻璃試片外觀圖

加熱與熱壓實驗依環境氣氛則分成三個部分進行，第一部分為在大氣下將玻璃試片置於玻璃碳模仁上進行加熱實驗；第二部分為在真空下進行加熱實驗與熱壓實驗；第三部分為真空下進行熱壓實驗，並於降溫時充氮氣降溫，最後由上述三階段實驗進行探討。

(一) 大氣下加熱實驗

實驗方法為將玻璃試片置於玻璃碳模仁上直接進行加熱實驗，共進行兩次實驗，各加熱至 538°C 和 568°C，實驗結果由表 A.3 所示。

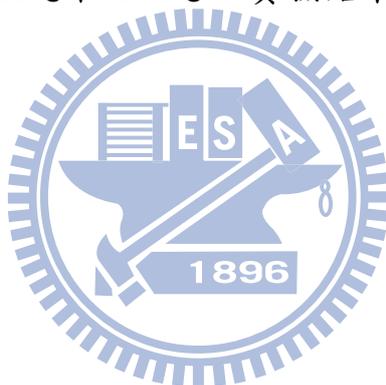
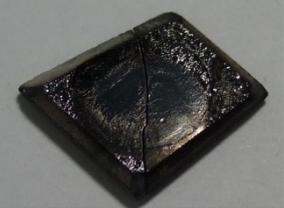
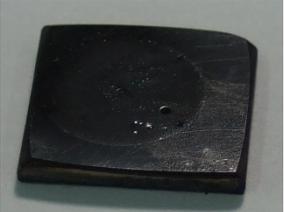


表 A.3 玻璃碳模仁和 42 玻璃試片加熱實驗結果

	加熱溫度	玻璃碳模仁	L-BAL42	氣氛
加熱實驗	568°C			大氣
加熱實驗	538°C			大氣

(二) 真空下加熱與熱壓實驗

實驗方法為將玻璃試片置於玻璃碳模仁上，進行真空中加熱與熱壓實驗，並於模仁降溫至 100°C 以下才進行填充氮氣降溫與破真空，其中兩次熱壓實驗參數如表 A.4，實驗結果如



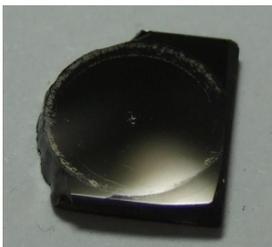
表 A.5 所示。

表 A.4 真空環境玻璃碳模仁熱壓 L-BAL42 實驗參數

玻璃材料	L-BAL42	升溫時間	15min
模仁材質	Glassy Carbon	持溫時間	8min
		壓印力(N)	1960
模造氣氛	真空	壓印速率 (N/min)	490



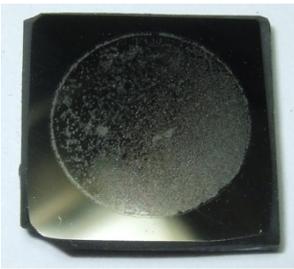
表 A.5 真空環境玻璃碳模仁熱壓 42 玻璃試片實驗結果

	加熱溫度	加壓尺寸	玻璃碳模仁	L-BAL42	氣氛
加熱實驗	556°C	0mm			真空
熱壓實驗	578°C	1.3mm			真空
熱壓實驗	568°C	1.3mm			真空

(三) 真空下加熱與熱壓實驗，並填充氮氣降溫

實驗方法為將玻璃試片置於玻璃碳模仁上，進行真空中加熱與熱壓實驗，並於模仁降溫時進行填充氮氣降溫與破真空，其中熱壓實驗參數同表 A.4，實驗結果如表 A.6 所示。

表 A.6 真空中玻璃碳模仁熱壓 42 玻璃氮氣降溫實驗

	加熱 溫度	加壓 尺寸	玻璃碳模仁	L-BAL42	氣氛
熱壓實驗	578°C	1.3mm			真空加溫 降溫至 400°C 以 下充氮氣降溫
加熱實驗	578°C	0mm			真空加溫 開始降溫即 充氮氣

由玻璃碳加熱與熱壓實驗可得以下結論：

- (1) 在大氣下加熱之玻璃碳模仁表面雖不會與玻璃試片產生反應或沾黏現象，但模仁表面在加熱後卻有氧化與劣化的情形發生。
- (2) 玻璃碳模仁在真空中加熱與熱壓實驗後表面品質比起大氣下加熱實驗後為佳，但由熱壓實驗可知，玻璃碳模仁結構在表 A.5 的實驗參數下無法負荷壓力而在邊緣處有破碎的現象發生。
- (3) 由氮氣環境降溫實驗可知，在高溫下填充氮氣降溫，玻璃碳模仁表面會與氮氣產生反應使得表面品質劣化或有沾黏現象產生。

附錄 B 熱壓實驗模仁夾具設計

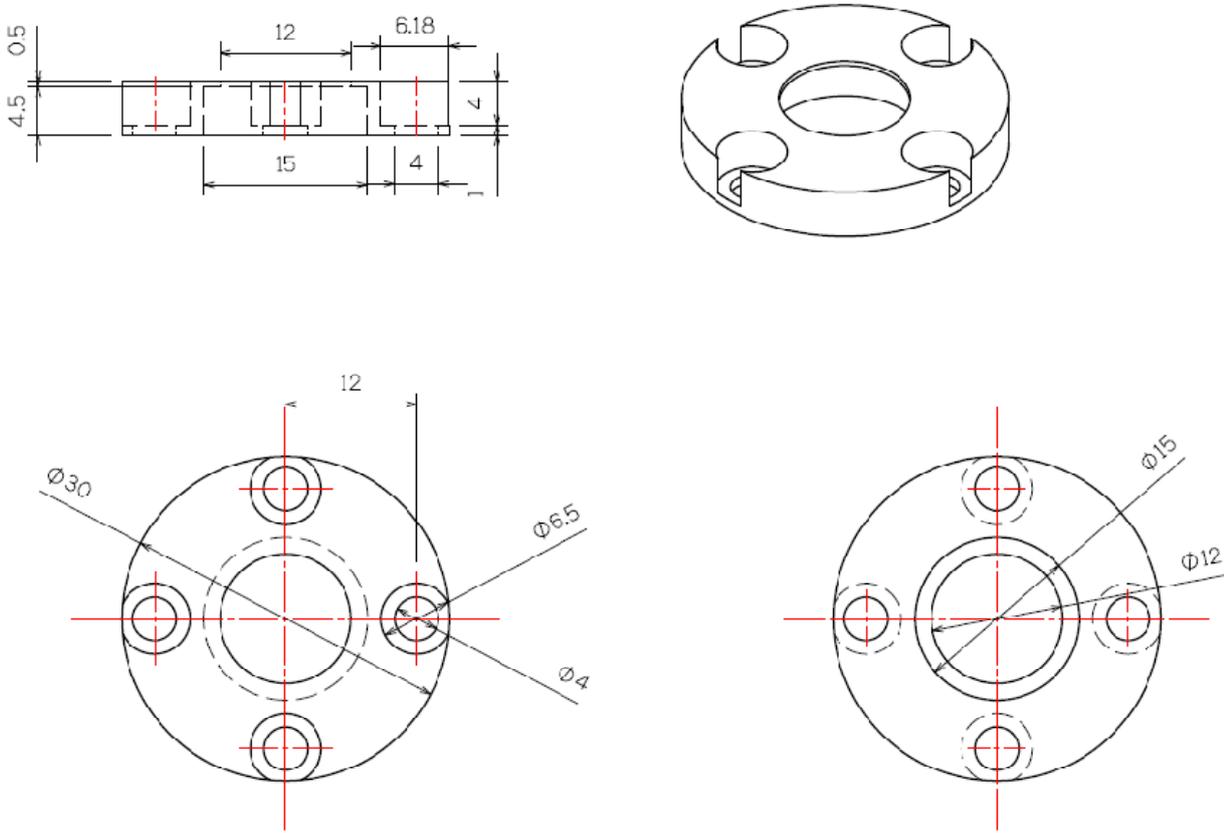


圖 B.1 微結構熱壓實驗模仁夾具尺寸圖(mm)

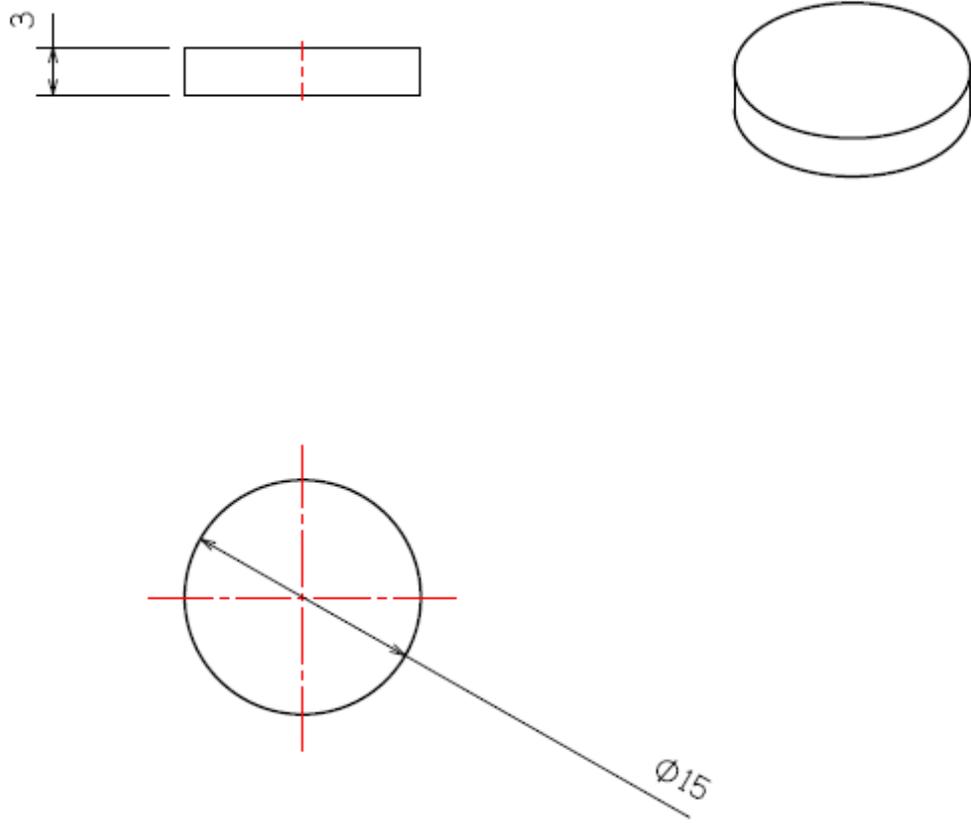


圖 B.2 微結構熱壓實驗模仁夾具-墊片尺寸圖(mm)

附錄 C 模仁剖面與白光干涉儀量測

本研究使用線切割剖面 pitch=0.25mm 之微結構模仁，再使用光學顯微鏡量測微結構尺寸，光學顯微鏡觀測如圖 C.1，將量測之數值整理後與設計值和表面粗度輪廓儀量測結果進行比較，比較結果如圖 C.2，可得出剖面量測之微結構尺寸大小介於設計值和表面粗度輪廓儀量測值，但由於使用線切割仍然會造成切割面有毛邊產生，造成剖面尺寸之誤差，因此剖面量測之數據還是有一定誤差存在，但可推測實際尺寸應介於設計值與輪廓儀量測值之間。

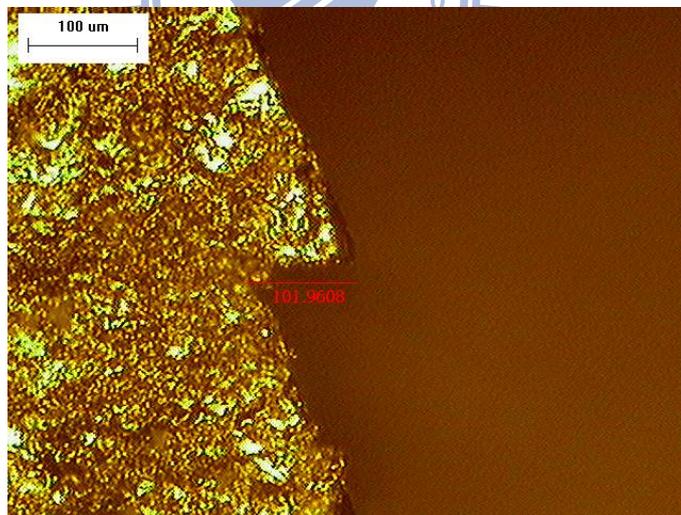


圖 C.1 線切割剖面模仁顯微鏡觀測圖

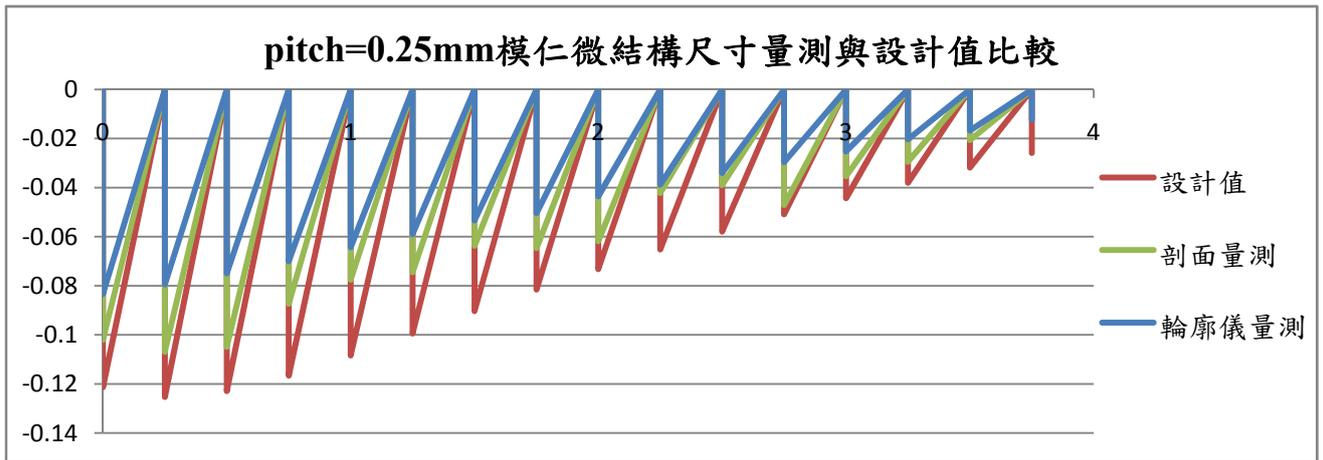


圖 C.2 剖面與輪廓儀量和設計值比較

除了使用線切割剖面量測外，本研究還嘗試使用白光干涉儀進行模仁微結構量測。白光干涉儀為一種非接觸式量測，原理為利用掃描式白光干涉待量測之表面，再經由影像處理進行三維立體形貌的呈現，適合用於非破壞性量測。但白光干涉儀有其量測極限，由於本研究所使用之 Fresnel 結構每一齒面角度皆不相同，再加上越外圈結構尺寸高度落差越大，因此在使用白光干涉儀量測 pitch=0.25mm 模仁時，僅能量測到最中間三環之 Fresnel 結構尺寸，白光干涉儀量測如圖 C.3，量測之結果如表 C.1 所示，可知最中間三環量測之數據與設計值僅相差在 $0.1 \mu\text{m}$ 以內，由此結果可知，模仁加工後尺寸應與設計值尺寸十分接近。



圖 C.3 白光干涉儀量測圖

表 C.1 白光干涉儀量測結果

	設計值(μm)	白光干涉儀量測值(μm)
第一環	2.8	2.81
第二環	8.5	8.5
第三環	14.2	14.15

附錄 D 微結構熱壓實驗參數一覽表

模仁材料: 微結構 pitch=0.25mm 之 Ni-Co 合金 表面未鍍硬膜層 玻璃材料: L-BAL42								
熱壓 溫度	升溫時 間	持溫 時間	壓印力	保壓 時間	脫模 溫度	熱壓 氣氛	加壓行 程控制	實驗結果
568°C	15.5min	30min	1960	30s	100°C	真空	無	
模仁材料: 微結構 pitch=0.25mm Ni-Co 合金 表面鍍 Pt-Ir 硬膜層(含 Cr 中介層) 玻璃材料: K-PSK100								
熱壓 溫度	升溫時 間	持溫 時間	壓印 力	保壓 時間	脫模 溫度	熱壓 氣氛	加壓行 程控制	實驗結果
440°C	5min	20min	30N	10s	150°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	50N	10s	150°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	100N	10s	150°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	100N	10s	150°C	氮氣	4.5mm	

模仁材料：微結構 pitch=0.5mm Ni-Co 合金 表面鍍 Pt-Ir 硬膜層(未含 Cr 中介層)

玻璃材料：K-PSK100

熱壓 溫度	升溫 時間	持溫 時間	壓印 力	保壓 時間	脫模 溫度	熱壓 氣氛	加壓行 程控制	實驗結果
440°C	5min	20min	30N	10s	130°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	35N	10s	130°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	50N	10s	85°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	35N	15s	130°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	50N	15s	130°C	氮氣	無	
460°C	5min	20min	30N	10s	150°C	氮氣	無	
440°C	5min	20min	35N	5s	130°C	氮氣	無	

460°C	5min	20min	50N	15s	130°C	氮氣	1mm	
460°C	5min	20min	50N	15s	130°C	氮氣	4mm	
450°C	5min	20min	50N	15s	130°C	氮氣	1mm	

