

## 第五章 球面透鏡熱壓實驗

本章節將使用第四章所加工完成的平面透鏡與模仁，並依照第三章光學玻璃平板熱壓所得到的熱壓參數，進行球面透鏡熱壓實驗。由於本實驗是屬於開模式熱壓，當壓印力越大時玻璃在模仁內部的充填性越佳，但也會使玻璃的中心厚度減小，為了使模仁的曲面可以完整轉印，且不致使中心厚度過薄，本實驗將球面透鏡之中心厚度設定為不得少於 2.5mm，球面透鏡熱壓實驗流程如圖 5-1 所示，詳細分項在本章節將有完整敘述。

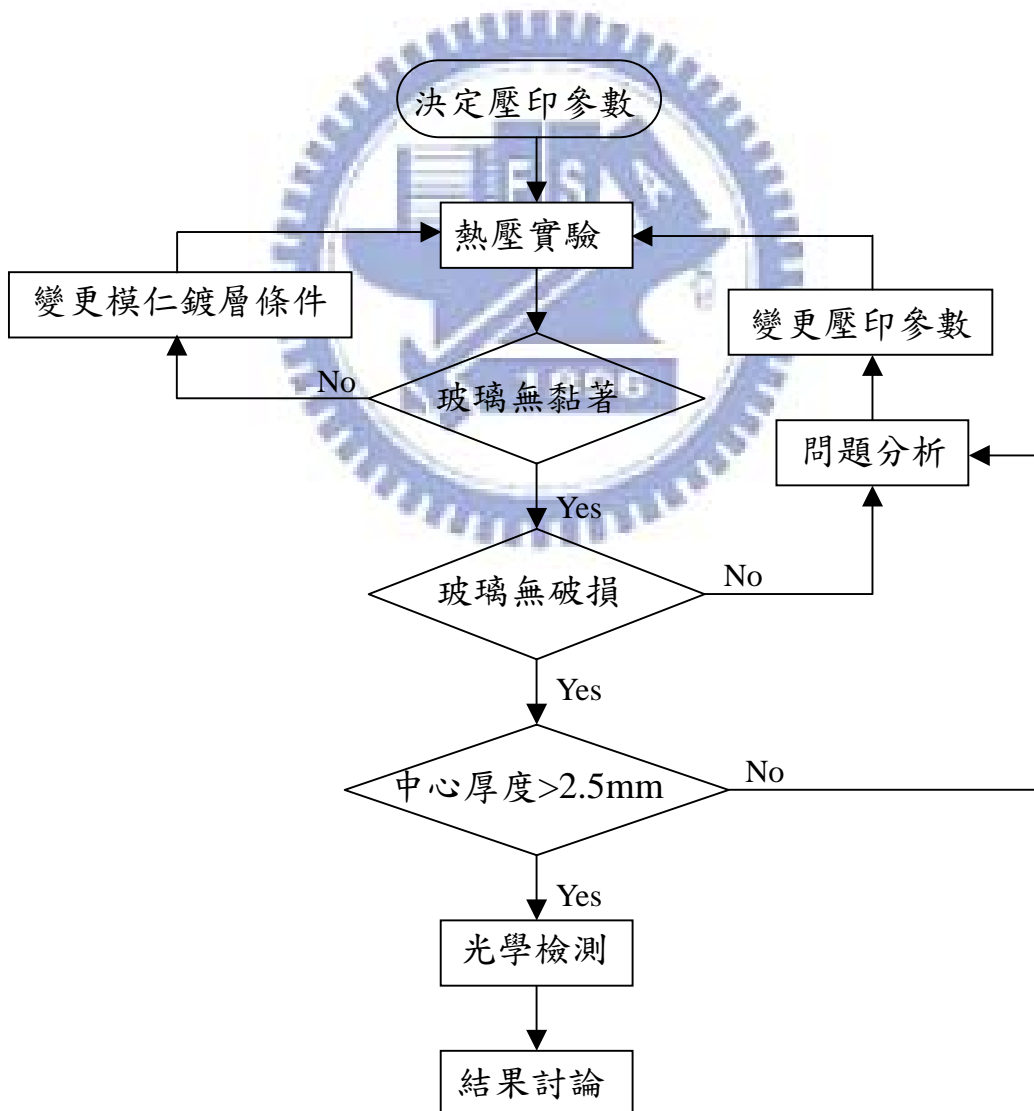


圖 5-1 球面透鏡熱壓實驗流程圖

## 5.1 模仁表面溫度測試

由於上、下模仁總厚度為 35mm，僅由上、下加熱板由底部加熱，會導致模仁表面無法達到工作溫度，故本階段另外設計加熱板，讓模仁可以嵌入加熱板內，使得模仁表面可以達到工作溫度。但是單凸球面透鏡的上、下模仁幾何外形不同，其熱傳導速率亦有差異，會造成上、下模仁之間溫度的差異，本測試之目的在於量測上、下模仁於升溫過程與降溫過程之溫度差。

為了使溫度控制更為準確，本階段除了另外設計加熱板，並且將溫度控制裝置變更控制模式，以本實驗室自行設計組裝的溫控裝置，其外觀如圖 5-2 所示，內部包含溫控表、SSR、直流電源供應器等，透過本裝置可以將溫度精度控制在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 的範圍；同時在上、下模仁的側面鑽 1mm 的孔，再將熱電耦放置於該孔，將目標溫度設定為  $490^{\circ}\text{C}$ （FCD1 平板熱壓的工作溫度），從室溫開始加熱，每隔一分鐘紀錄一次上、下模的溫度，直到上、下模仁溫度達到  $490^{\circ}\text{C}$  為止，量測結果如圖 5-3 所示，圖中實線部分升溫速率較快的是上模仁，虛線部分升溫速率較慢的是下模仁。

經由升溫測試得知，上、下模仁從室溫升溫到  $490^{\circ}\text{C}$  僅需 15 分鐘，而且在  $200^{\circ}\text{C}$  至  $450^{\circ}\text{C}$  的升溫過程中，上、下模仁的溫差在  $40^{\circ}\text{C}$  以上；由降溫測試得知，下模仁的溫降速度較慢，但從  $490^{\circ}\text{C}$  降溫到  $200^{\circ}\text{C}$  也僅需 16 分鐘，而且  $400^{\circ}\text{C}$  至  $100^{\circ}\text{C}$  的溫度範圍，上、下模仁的溫差在  $60^{\circ}\text{C}$  以上；降溫過程的溫度檢測是從  $490^{\circ}\text{C}$  降溫到下模達  $100^{\circ}\text{C}$  止，以每隔 2 分鐘紀錄一次溫度的變化，結果如圖 5-4 所示。



圖 5-2 溫控裝置外觀圖

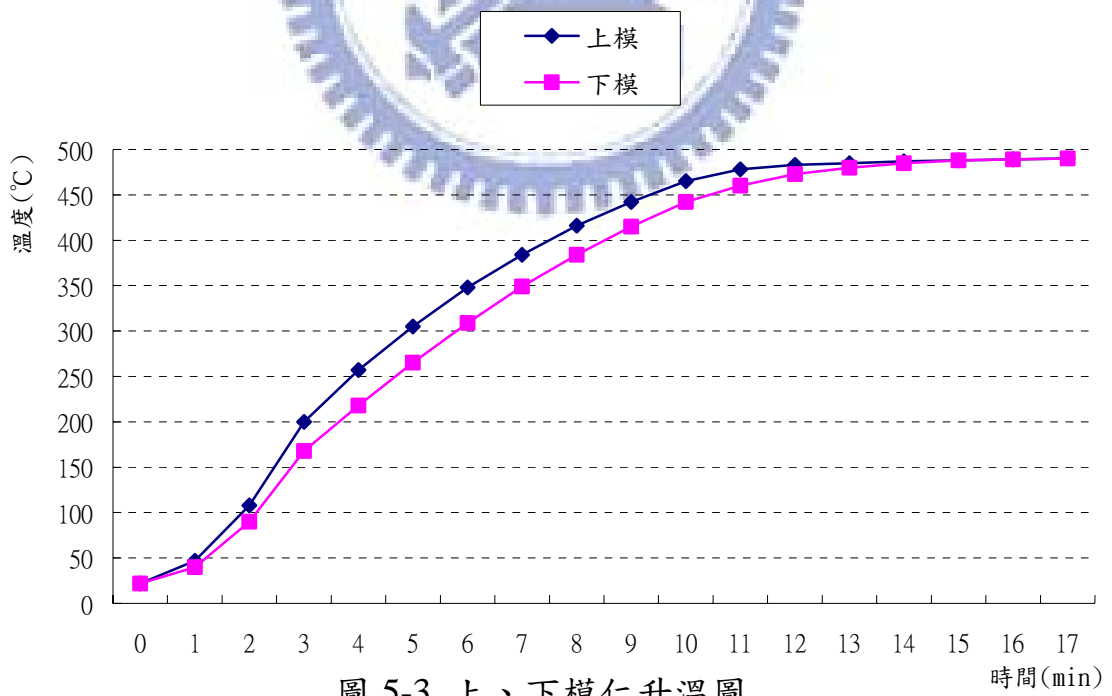


圖 5-3 上、下模仁升溫圖

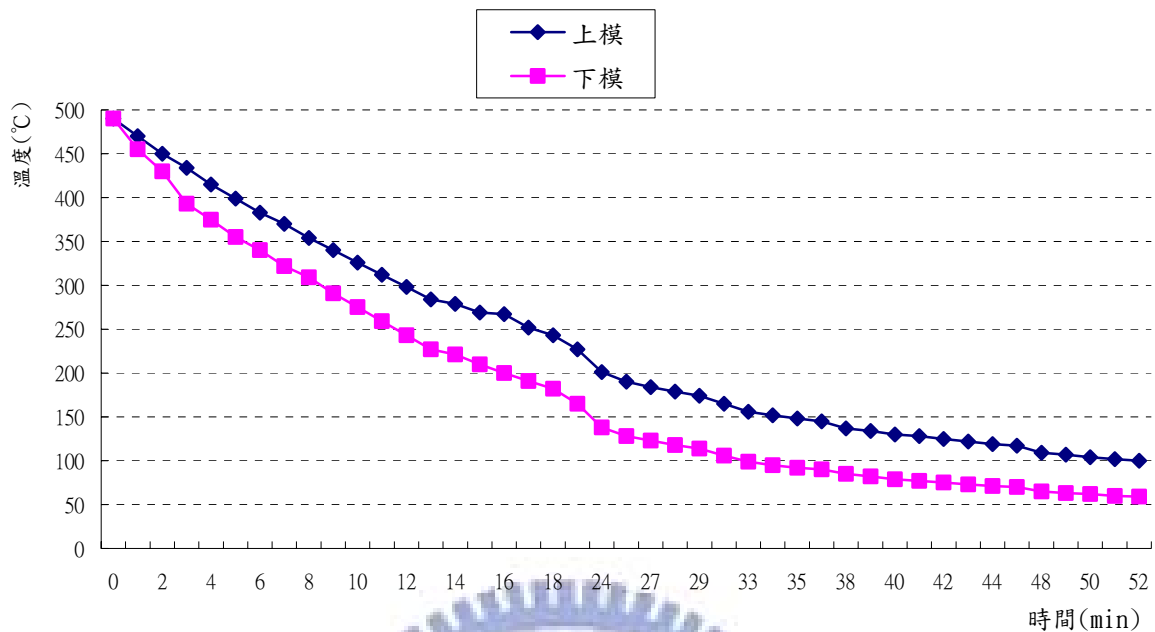


圖 5-4 上、下模仁降溫圖

在如此的升、降溫速率與上、下模仁的溫差條件下，會使玻璃鏡片內部與外部的溫度差過大，造成玻璃的破裂，如圖 5-5 所示。為了避免玻璃在升、降溫過程中破裂，本研究將以分階段升、降溫的方式來進行，在每個分段的溫度點停滯一時間，然後再進行下一溫度點的升、降溫，如圖 5-6 所示，每 50°C 持溫 20 分鐘再進行升溫或降溫，如此做法不僅可以縮短上、下模的溫差，並可延緩升與降溫的速率，使玻璃內、外的溫差縮小，防止玻璃的破裂，以下的球面透鏡熱壓實驗都將以上述分階段升、降溫的方式來進行。



圖 5-5 上、下模仁溫差造成玻璃內部破裂圖

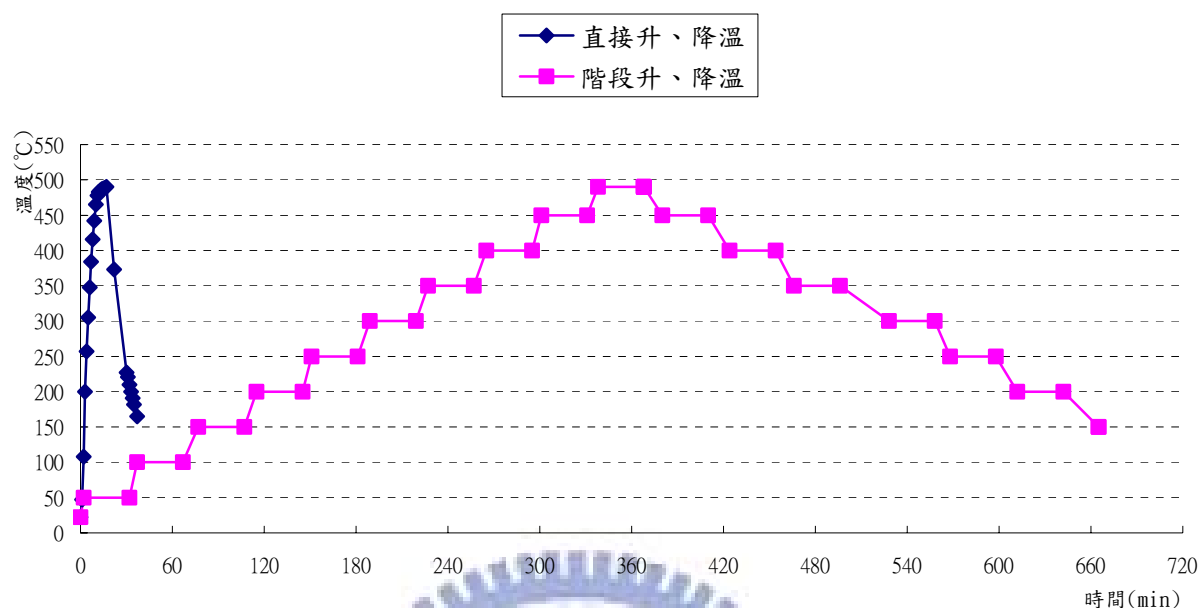


圖 5-6 分階段升、降溫與連續升、降溫比較圖

## 5.2 球面透鏡熱壓參數修整

根據平板熱壓所得到的初步結果得知，FCD1 的壓印條件為：工作溫度 490°C、預壓力 98N、壓印力 980N、保壓力 49N，由於球面透鏡之表面積與壓印成品的幾何形狀與玻璃平板熱壓不同，將壓印面積、變形量等因素列入考慮，把原先平板熱壓的參數修改如表 5-1 所示，依照此參數進行玻璃球面透鏡熱壓之初步實驗，實驗結果如圖 5-7 所示。

表 5-1 球面透鏡熱壓實驗參數初步設定表

預壓力(N)	壓印溫度(°C)	壓印力(N)	壓印力速度(N/Sec)
49	490	490	49
持溫時間(Sec)	持壓時間 (Sec)	保壓力(N)	脫模溫度(°C)
3600	120	49	160



圖 5-7 球面透鏡初步熱壓結果外觀圖

由實驗結果得知玻璃已破損，而且玻璃邊緣也有崩裂的現象，依照初步實驗的結果得知，欲完成玻璃球面透鏡的熱壓成形，若沿用初步設定的參數，是無法壓印出完整的玻璃球面透鏡，以下將依據初步實驗所觀察到的問題，包含預壓力、壓印力、壓印力速度、保壓力等逐一分項探討並透過實驗來修整球面透鏡的熱壓成形參數。

### 5.2.1 預壓力實驗

實驗過程中觀察得知，在進行預壓階段時，玻璃鏡片就產生邊角崩裂之現象，如圖 5-8 所示，根據此結果研判，在平板熱壓時，玻璃與模仁是屬於面接觸，然而在球面透鏡熱壓時，玻璃與模仁的接觸是屬點接觸，會有邊角應力集中現象，如圖 5-9 所示，且玻璃在經由磨砂、倒角、拋光等前製程後，玻璃尚有殘留應力，故在預壓的過程中會造成玻璃的破壞。



圖 5-8 玻璃鏡片邊角崩裂圖

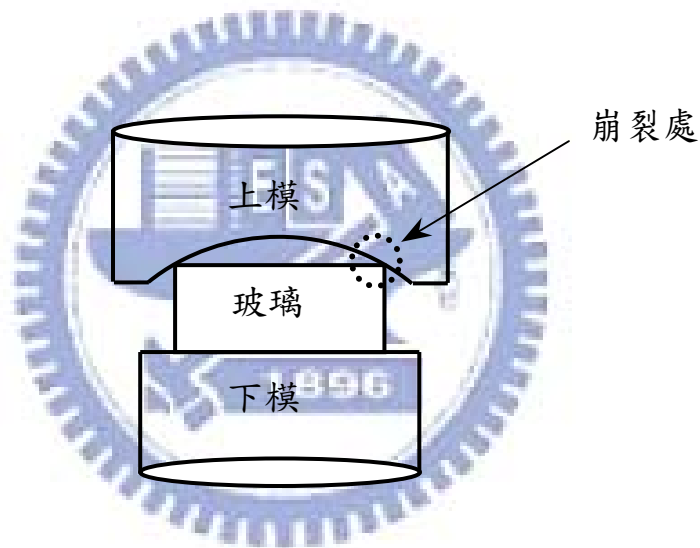


圖 5-9 預壓造成玻璃平面鏡的邊角崩裂示意圖

為了避免在預壓時造成玻璃的損壞，處理方法有二，一為將玻璃邊緣倒角，另一為降低預壓力；然而依照玻璃的變形趨勢得知，玻璃邊緣倒角過大，玻璃在壓印時會將倒角的斜面推擠至玻璃表面，使得球面透鏡的有效直徑縮小，如圖 5-10 所示；為避免有效直徑的縮小，本實驗將採用降低預壓力的方式。經由預壓力測試實驗後得知，當預壓力低於 19.6N 時，玻璃邊緣就不會有邊角崩裂的現象，將實驗的參數修改如表 5-2 所示，使用 SK3 鍍 TiAlN 的模仁，壓印後的玻璃外觀如圖 5-11 所示。

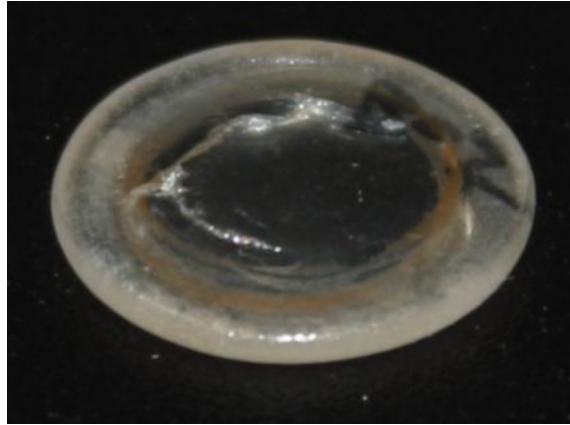


圖 5-10 倒角的斜面推擠至玻璃表面圖

表 5-2 預壓力實驗參數設定表

預壓力(N)	壓印溫度(°C)	壓印力(N)	壓印力速度(N/min)
19.6	490	490	49
持溫時間(Sec)	持壓時間(Sec)	保壓力(N)	脫模溫度(°C)
3600	120	19.6	160



圖 5-11 玻璃破裂圖



經由實驗結果得知中心厚度為僅剩 2mm，且玻璃已破損；中心厚度已低於目標厚度，研判為壓印力過大，在熱壓過程中觀察得知，玻璃在壓印過程中產生裂痕，根據實驗結果研判，造成玻璃破裂的因素為壓印速度過高。

## 5.2.2 壓印力速度實驗

將壓印力降為 392N 且將壓印力速度調整為如表 5-3 所示，再分別對玻璃進行熱壓實驗，由實驗過程中觀察得知，當壓印力速度降至 19.6N/min 時，玻璃不會在壓印過程破裂，但會在保壓降溫過程中破裂，如圖 5-12 所示。在壓印力 392N 與壓印力速度 19.6N/min 的條件下所得到的中心厚度為 2.1mm，仍比目標厚度薄。

表 5-3 壓印力速度實驗參數設定表

預壓力(N)	壓印溫度(°C)	壓印力(N)	壓印力速度(N/min)
19.6	490	392	39.2
			29.4
			19.6
持溫時間(Sec)	持壓時間(Sec)	保壓力(N)	脫模溫度(°C)
3600	120	29.4	160

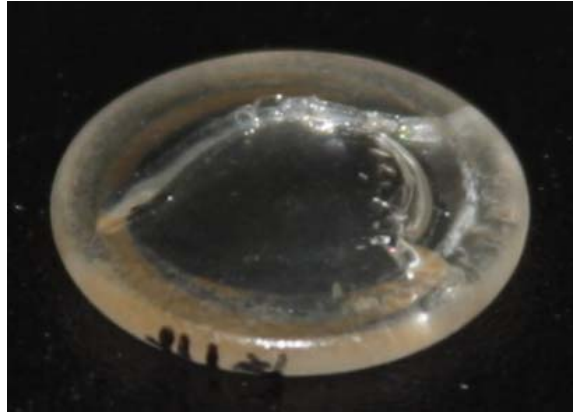


圖 5-12 保壓降溫過程中破裂

### 5.2.3 保壓力實驗

經由壓印力速度實驗發現，當壓印力速度為 19.6N/min 時，玻璃不會在壓印過程中破裂，而是在保壓降溫過程中破裂，為了確認玻璃透鏡的破裂是由保壓力所造成的，本階段將實驗參數設定如表 5-4 所示；由實驗結果得知，當保壓力降至設備的壓力下限 9.8N(1Kg) 時，玻璃仍然會破裂，如圖 5-13 所示；若在完成持壓階段後即將保壓力降至 0，則玻璃不會有破裂的現象產生，實驗結果如圖 5-14 所示，經由量測得知中心厚度為 2.14mm。

表 5-4 保壓力實驗參數設定表

預壓力(N)	壓印溫度(°C)	壓印力(N)	壓印力速度(N/min)
19.6	490	490	19.6
持溫時間(Sec)	持壓時間(Sec)	保壓力(N)	脫模溫度(°C)
3600	120	19.6	160
		9.8	
		0	490



圖 5-13 保壓力為 9.8N 之成品



圖 5-14 無保壓力之成品

#### 5.2.4 壓印力實驗

藉由保壓實驗所得到的結果可以得知，在無保壓條件下玻璃已經沒有破裂的現象，然而透鏡的中心厚度仍然無法達到目標尺寸（2.5mm），經由研判認為應是壓印力過大所致，為了使玻璃中心厚度可以達到目標尺寸，本階段將實驗參數設定如表 5-5 所示；由實驗結果觀察得知，當壓印力為 196N 時，玻璃尚無法完整完全轉印模仁的球面外形，在中心處仍殘留有圓

形的平面，且透鏡中心厚度僅剩 2.42mm，如圖 5-15 所示，由此判斷造成玻璃透鏡中心處仍殘留有圓形平面的因素為持壓時間不足。

表 5-5 壓印力實驗參數設定表

預壓力(N)	壓印溫度(°C)	壓印力(N)	壓印力速度(N/min)
19.6	490	294	19.6
		196	
持溫時間(Sec)	持壓時間(Sec)	保壓力(N)	脫模溫度(°C)
3600	120	0	490



圖 5-15 壓印力為 196N 之成品

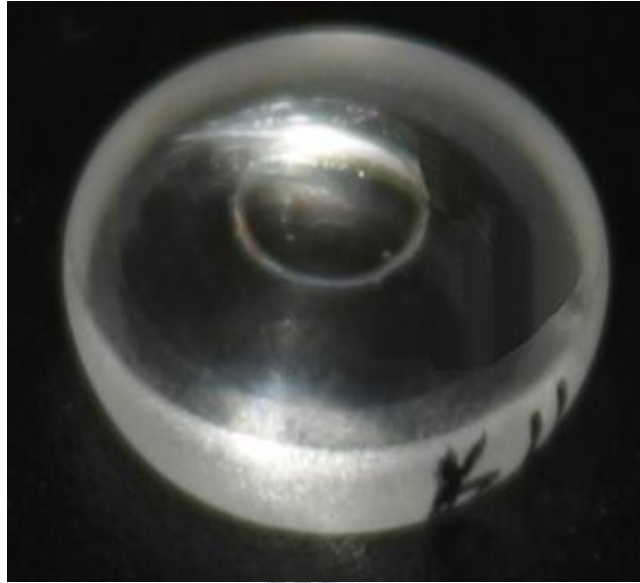


圖 5-16 壓印力為 294N 之成品

### 5.2.5 持壓時間實驗

為了驗證玻璃透鏡中心處仍殘留有圓形平面，是由於持壓時間不足所造成，本階段將持壓時間分別設定為 200、300、400 秒等，實驗參數如表 5-6 所示；在經過 400 秒的持溫實驗後發現，玻璃透鏡中心處仍殘留有圓形平面，且中心厚度已達 2.47mm，其結果如圖 5-17 所示；依照結果得知，在持壓 400 秒的時間，玻璃透鏡的中心厚度已經低於目標值，而且透鏡中心處仍殘留有圓形平面，由此結果推斷，持壓時間為 200 秒與 300 秒更加無法使玻璃在模仁內充填完全，故無須再作此兩參數的實驗。

由實驗結果觀察得知，在該溫度參數下調整持壓時間亦無法使玻璃在模仁內充填完全，故持壓時間在該溫度參數下係屬誤判，當上、下模均達 490°C 時，不僅只有玻璃的頂部會變形，玻璃的底層受到下模仁擠壓亦會變形，為使玻璃的頂部可以完整充填於上模仁，接續的實驗將以改變上、下模仁的溫度的方式進行實驗。

表 5-6 持壓時間實驗參數設定表

預壓力(N)	壓印溫度(°C)	壓印力(N)	壓印力速度(N/min)
19.6	490	196	19.6
持溫時間(Sec)	持壓時間(Sec)	保壓力(N)	脫模溫度(°C)
3600	200	0	490
	300		
	400		



圖 5-17 持壓時間 400 秒之成品

### 5.2.6 模仁溫度提升實驗

為使玻璃的頂部可以完整充填於上模仁，而形成完整的球面，本階段的實驗將以改變上、下模仁的溫度進行玻璃透鏡的充填性實驗，然而在壓印過程中欲使上、下模溫度有差異時，必須考慮到過高的溫度差過大會使

玻璃破裂，或是會使玻璃透鏡的殘留應力增加，故本實驗將上、下模仁的溫度差設定在 10°C 的溫差。

欲改變玻璃在上模仁的的充填性，其方法有二；一為上模溫度維持 490°C 而下模溫度降低，另一為下模溫度維持 490°C 而升高上模溫度；在此兩種方法的選用時，考慮到若將下模仁溫度降低時，則玻璃的底部溫度低於成形溫度，會使得玻璃透鏡頂部的外徑變大，而底部外鏡不會有所改變，故本實驗採用後者的方式進行玻璃透鏡的熱壓。

經由上述的評估因素，本實驗並不考慮將下模溫度降低，而採用將上模得壓印溫度提升至 500°C (設備的上限)，然後進行實驗，實驗參數設定如表 5-7 所示，實驗結果如圖 5-18 所示。

經由實驗果得知，當上模溫度升至 500°C 時，玻璃透鏡頂部中心處無殘留圓形平面，經由量測得知玻璃透鏡的中心為 2.7mm，已經達到目標尺寸，由此可以確定以表 5-7 的熱壓參數可以得到完整的球面透鏡，但是由於成形時間過於冗長，一次的成形時間需花費近 12 個小時，故以下將再以縮短成形時間為考量，進行縮短成形時間實驗。

表 5-7 模仁溫度提升實驗參數設定表

預壓力(N)	上模溫度(°C)	下模溫度(°C)	壓印力速度(N/min)
19.6	500	490	19.6
壓印力(N)	持溫時間(Sec)	持壓時間(Sec)	脫模溫度(°C)
196	3600	400	490



圖 5-18 模仁溫度提升實驗結果

### 5.2.7 成形時間縮短實驗

經由上述各項參數的實驗，可以得到較佳的玻璃透鏡壓印參數，在本階段將嘗試將製程時間縮短。在整個玻璃透鏡的熱壓製程中，主要花費的時間有二：一為升、降溫時間，另一為持溫時間，故本實驗將以此兩主要花費時間進行製程時間縮短實驗。

原本的升溫控制設定為每 50°C 持溫 30 分鐘，其中升溫 50°C 約花費 3-5 分鐘，再予以持溫 30 分鐘，總計每升溫 50°C 需花費 33-35 分鐘；本階段將升溫實驗參數設定為每 50°C 包含升溫與持溫共 15 分鐘，如圖 5-19 所示，可將壓印製程 12 小時縮短至 6 小時；其他壓印參數同表 5-7 所示，實驗結果如圖 5-20 所示。

經由實驗結果觀察可以得知，雖然壓印時間可以縮減一半，但是會造成玻璃在升溫過程破裂，且會使玻璃無法完整充填於上模仁，而形成玻璃中心處仍殘留有圓形平面，故此一升、降溫速度並不適用。



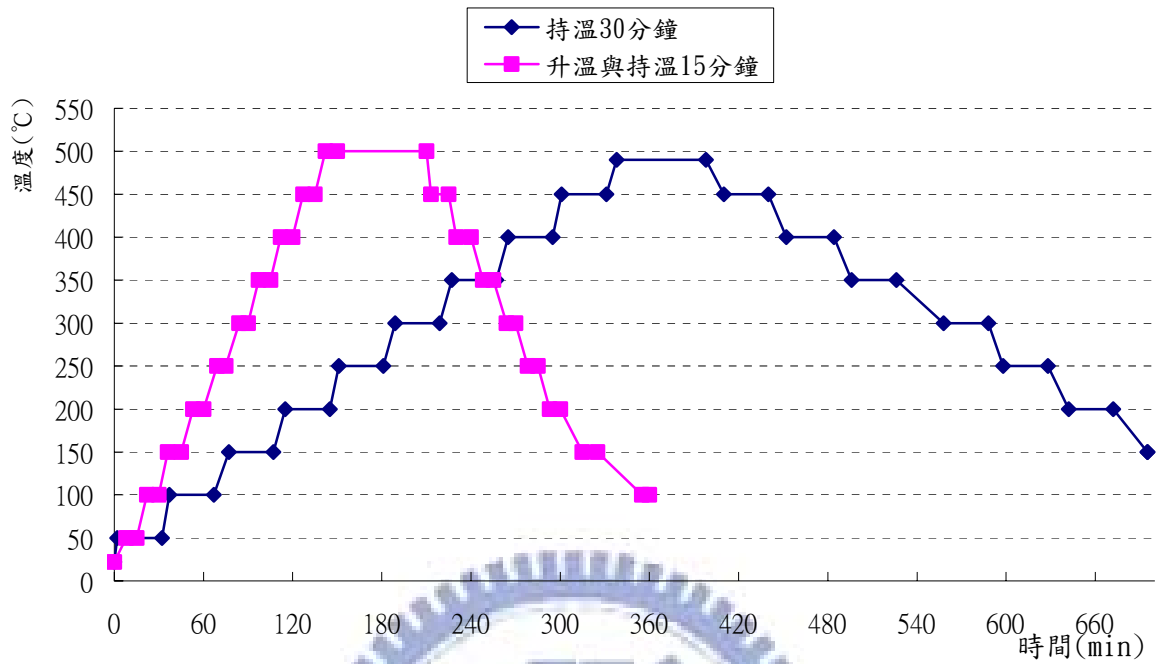


圖 5-19 升溫、持溫共 15 分鐘與持溫 30 分鐘比較圖



圖 5-20 升溫、持溫於 15 分鐘完成之實驗結果

根據實驗結果研判，升溫速度過快導致玻璃內部與外部會有溫度差，為了避免玻璃在升、降溫的過程中破損，以下將每 50°C 升溫與持溫共 20 分鐘，以同表 5-7 的壓印參數進行實驗，其壓印過程溫度-力量-時間如圖 5-21 所示，實驗結果如圖 5-22 所示。

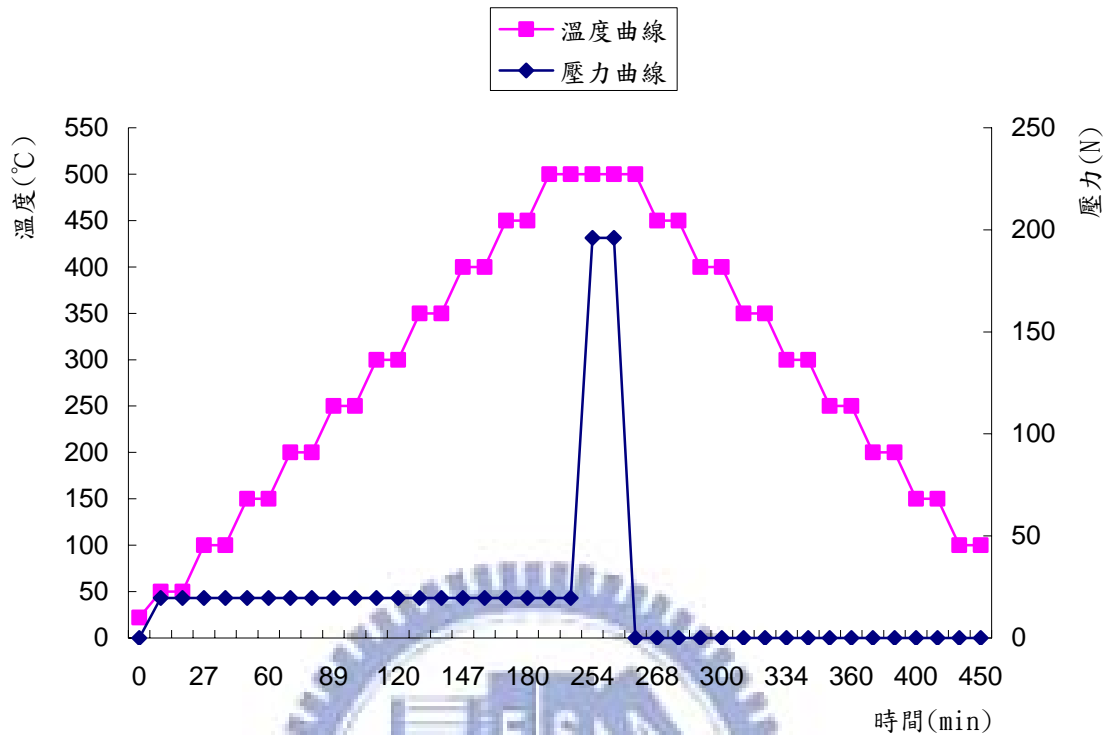


圖 5-21 球面透鏡實驗之溫度-力量-時間圖



圖 5-22 升溫、持溫於 20 分鐘完成之實驗結果

藉由縮短升、降溫實驗得知，以每 50°C 升溫與持溫共 20 分鐘的升溫、降溫速率，可以得到完整的玻璃球面透鏡，經由量測可以得知其成品的外鏡為 9.52mm、中心厚度為 2.71mm，接續的實驗將著重於持溫時間的縮短，

將原本的持溫時間 60 分鐘縮短至 20 分鐘，壓印過程溫度-力量-時間如圖 5-23 所示，其他壓印參數如表 5-8 所示，實驗結果如圖 5-24 所示。

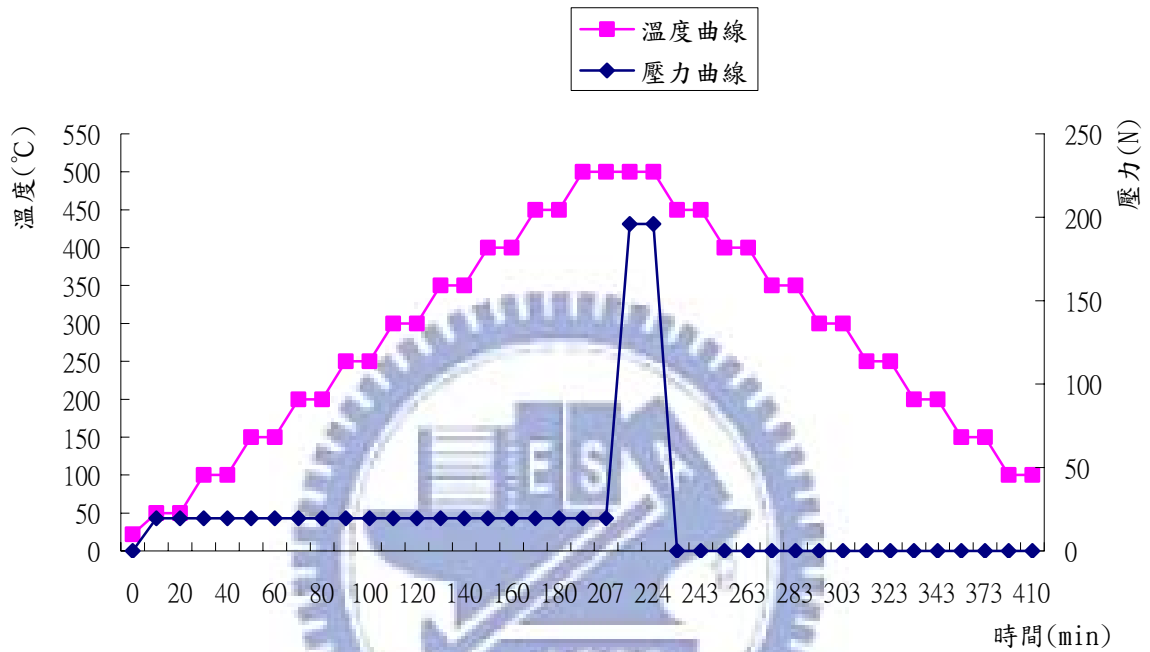


圖 5-23 縮短持溫時間實驗之溫度-力量-時間圖

表 5-8 縮短持溫時間實驗參數設定表

預壓力 (N)	上模溫度 (°C)	下模溫度 (°C)	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°C 升溫、持溫時間 (min)	
19.6	1200	400	20	



圖 5-24 縮短持溫時間之實驗結果

藉由縮短持溫實驗得知，當溫度達到  $500^{\circ}\text{C}$  時給予持溫 20 分鐘後進行壓印，可以得到完整的玻璃球面透鏡，經由量測可以得知其成品的外徑為  $9.51\text{mm}$ 、中心厚度為  $2.7\text{mm}$ ，與持溫時間 60 分鐘的結果相近；由整個成形時間縮短實驗可以得知，將成形時間從原本的 720 分鐘縮短至 410 分鐘，時間花費縮減了 43.1%，經由球面透鏡熱壓參數的修整，可以得到較佳的壓印參數，如表 5-8 所示；在完成熱壓參數的修整後，接續的實驗將以控制球面透鏡的中心厚度為主，然後進行實驗。

### 5.3 球面透鏡熱壓實驗

在完成球面透鏡熱壓參數修整後，使用其較佳的壓印參數可以得到完整無破損的玻璃球面透鏡，且中心厚度大於目標值  $2.5\text{mm}$ ，本階段將調整持壓時間，將實驗參數設定如表 5-9 所示，並探討持壓時間與中心厚度及玻璃曲率半徑之關係。

經由實驗結果得知，在無持壓時間的條件下玻璃中心處仍殘留有圓形平面，如圖 5-25 所示；在持壓時間為 600 秒的條件下，玻璃中心厚度為

2.74mm 已經比目標厚度薄，實驗結果如表 5-10 所示，其中曲率半徑是由輪廓儀所量測而得，而模仁的曲率半徑為 15.1752mm。

表 5-9 球面透鏡熱壓參數設定表

持壓時間 (Sec)	上模溫度 (°C)	下模溫度 (°C)	保壓力 (N)	壓印力 (N)
600	500	490	0	196
500				
400				
300				
200				
100				
50				
0				
壓印力速度 (N/min)				
19.6	1200	19.6	20	

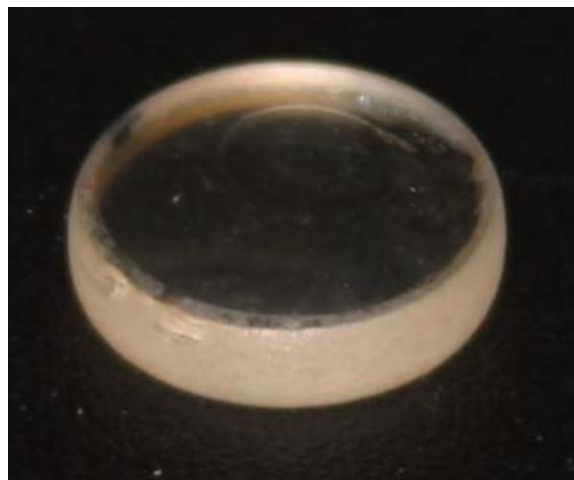


圖 5-25 無持壓時間條件下玻璃中心處仍殘留有圓形平面

表 5-10 球面透鏡熱壓實驗結果表

持壓時間 (Sec)	中心厚度 (mm)	外徑 (mm)
600	2.47	10.18
500	2.57	9.81
400	2.7	9.51
300	2.76	9.3
200	2.79	9.24
100	2.82	9.18
50	2.9	8.97



圖 5-26 玻璃球面透鏡壓印成品外觀圖

## 5.4 無電解鎳模仁球面透鏡熱壓實驗

模仁表層除了鍍 TiAlN 硬膜外，本階段實驗亦選用無電解鎳當模仁材料，進行玻璃球面透鏡熱壓，目的在與 TiAlN 硬膜的脫模性與成品的表面品質進行對照，使用無電解鎳模仁熱壓的實驗參數設定如表 5-11 所示，無電解鎳模仁熱壓實驗結果發現，無電解鎳會與玻璃黏著，使玻璃無法脫模，若施加外力強制撥離則導致鏡片破損如圖 5-27 所示，且模仁表面亦有殘留玻璃，如圖 5-28 所示。

表 5-11 使用無電解鎳模仁熱壓的實驗參數設定表

預壓力 (N)	上模溫度 (°C)	下模溫度 (°C)	保壓力 (N)	壓印力 (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°C 升溫、持溫時間 (min)	
19.6	1200	400	20	



圖 5-27 玻璃黏著於無電解鎳模仁



圖 5-28 無電解鎳模仁未壓印前（左）、壓印後（右）

經由實驗結果可以得知，無電解鎳並不適用於 FCD1 光學玻璃的熱壓成形，故無法與表層鍍 TiAlN 的模仁，所壓印出的成品表面品質進行對照，接續的檢測將僅針對表層鍍 TiAlN 的模仁所壓印出的成品。

