

## 中文摘要

本計畫將針對超音波輔助光學玻璃熱壓成形製成進行研究，預定進行全程三年之研究。第一年完成了超音波輔助玻璃熱壓成形設備之建置，利用本實驗室已有之玻璃熱壓成形機台，將超音波放大器連接於上模具；另改進加熱爐之加熱方式，利用紅外線燈管作為加熱源，縮短製程所需之時間；並且利用有限元素軟體，考慮放大器在高溫下的材料特性，設計可在高溫下使用之超音波放大器。接著利用建立之超音波設備，進行超音波輔助玻璃熱壓成形，實驗結果證明了玻璃材料在受到超音波振動之後，材料發生軟化之情形，降低成形時所需之應力。

關鍵詞：有限元素分析、超音波振動、光學玻璃、熱壓成形

## Abstract

In this research, scheduled for total three years, ultrasonic-vibration will be applied to assist the hot embossing processes of optical glasses.

In the first year, the apparatus for ultrasonic-vibration assisted hot embossing processes of optical glasses was built. The ultrasonic horn was connected to the upper die of the existing hot embossing apparatus; the heating device was improved by using infrared heaters to shorten the processing duration; finite element simulation was adopted to design the high temperature workable ultrasonic horn by considering the material properties in high temperature. Next, the ultrasonic-vibration assisted hot embossing of optical glasses experiments were performed with the built apparatus. The results demonstrated that the glasses were softened with the application of ultrasonic vibration, so the forming stresses could be reduced.

Key words: Finite element analysis, ultrasonic vibration, optical glass, hot embossing

## 一、前言與研究目的

近年來由於數位科技的發展，3C 產業快速成長，全球數位產品的需求量大增，應用於其中之光學元件供應量不足的窘境在此時即被凸顯出來；再加上目前國內亟欲提升產業技術，在此關鍵元件的成形製程上，更增添了高精度的要求。所以如何增進光學元件的產量及成形精度成為目前產學界積極研究的重點之一。

光學元件所使用的材料可分為光學玻璃與高分子材料兩大類，在成形性及可撓性方面，高分子材料具有較佳的特性，但在光學性質、抗磨耗、耐熱性以及抗潮濕方面，玻璃仍舊有其優勢存在，所以在要求高精密度的光學儀器設備中，玻璃材料仍保有高分子材料所無法完全取代的優勢，因此玻璃材料是製造光學元件的理想選擇。

在玻璃光學元件的製造技術方面，傳統光學玻璃球面及非球面鏡片藉由研磨、拋光加工成形，但耗時耗工，無法應付目前日益增大的產量需求，且無法成形微光學元件；近年來有以單點鑽石（Single Point Diamond）為刀具，對玻璃進行超精密加工，即在成形機完成玻璃球面鏡片或是光學微結構；然而超精密成形機的設備費用昂貴，且刀具成本高，目前尚未被廣用於光學元件的加工。玻璃熱壓成形技術，如圖 1 及圖 2 所示，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，包括球面透鏡、非球面透鏡等元件，皆能經由熱壓成形技術來達到批量複製的目的，因此被認為是光學元件製造中用以降低成本，提高產量之關鍵技術。

另者，近來應用超音波振動於金屬塑性成形之複合加工技術逐漸受到重視。由於超音波振動於塑性加工成形時會產生一些效應，如摩擦力的降低、材料溫度升高、材料塑流應力降低的效應及成形回彈量的降低現象，使得材料成形性獲得提高，達成傳統塑性加工無法達到之加工成形界限。本計畫中將應用超音波振動延伸應用於玻璃熱壓成形中，並預期在製程中使材料產生上述之特性，冀能以此提升玻璃之成形性，

增加玻璃熱壓成形技術應用在更複雜之光學元件的可能性。

將玻璃熱壓成形技術再向下之延伸則為玻璃微熱壓成形技術。過去由於製造技術上的限制，微光學元件多使用高分子做為材料，且元件成品的操作環境亦因材料先天上的劣勢多有所侷限；現今則可透過玻璃微熱壓成形技術，採用相較於高分子材料更能應付惡劣環境的玻璃材料來製作微光學元件。透鏡式太陽能集光器常使用菲涅爾(Fresnel)之微結構設計，將大面積的太陽能集中到一個小面積的太陽電池上，提高光的能量密度，用以增加太陽電池的發電輸出。並且，若能使用玻璃材料製造太陽能集光器，相較於其常用之高分子材料，除了具有較佳的光學性質以提升聚光效能，在優越的抗磨耗、抗腐蝕、熱穩定等特性，將使得在室外曝曬之太陽能集光器可抵抗溫度、濕度之變化以及外界侵蝕，使太陽能集光器可配合太陽電池 10 年以上的使用保證。因此本計畫最終將以太陽能集光器作為載具，以超音波輔助玻璃微熱壓成形技術進行此微光學元件之成形製造。

有此可知，玻璃熱壓成形製程為光學元件製造中用以降低成本，提高量產之關鍵技術。而應用超音波振動於塑性加工成形時會降低摩擦力、降低塑流應力及能有效達成傳統塑性加工無法達到之加工成形界限。因此本研究之目的，將結合這兩個技術，使用超音波施加於玻璃壓成形以及玻璃微熱壓成形製程之模仁，期望玻璃在熱壓成形過程中，能夠透過上述超音波輔助成形之優點，提升玻璃熱壓成形以及玻璃微熱壓成形製程之品質及效能。並且應用微熱壓成形製程之技術成形太陽能集光器，以期應用玻璃之優良性質提升集光器之能力，並證明超音波輔助熱壓成形技術可做為微光學元件量產成形之製程。

## 二、文獻探討

目前國外在玻璃熱壓成形的研究，有 Saotome 等[1]對兩種光學玻璃特定的溫度範圍條件下進行壓縮實驗，得到不同溫度下真實應力與應變率的關係，證實了該溫度區間

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；Heckele[2] 等人認為熱壓成形是適用於微結構成形的理想技術，其優點是材料流動率低，可避免由內應力引起的散射中心 (Scattering Centers) 誤差，熱壓成形是可製造出高精度、高品質、大面積的光學元件技術，由於成形步驟簡明，若能將熱壓成形過程更改為自動化成形製程，將有效的降低成本；Shishido 等[3] 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。

Zhong 等[4]，對於玻璃模造裡模仁進行熱機械特性的有限元素分析，探討模仁幾何形狀、材料，以及鍍膜層材料對於鍍膜模仁的影響；Jain 等[5] 以商用 FEM 軟體建立 2D 軸對稱模型進行分析，將成形時的玻璃視為牛頓流體 (Newtonian fluid) 且將黏度與溫度的相關性以及模仁與胚料介面的熱傳皆考慮進去，探討模造製程參數對成品品質的影響；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。

國內在玻璃熱壓成形的研究則有邱[7] 以數值方法分析玻璃鏡片壓製成形整個製程中的溫度場；游[8] 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[9] 以陣列式 V 形槽結構分別對 FCD1 及 SF2 光學玻璃材料進行微熱壓印實驗，探討製程中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探討其原因及改善方法，得知 FCD1 材料較適合應用在微熱壓成形製程，適合的壓印溫度介於轉移點與軟化點之間而接近軟化點

本實驗室的研究中，黃[10] 自行設計與製造球面透鏡的模仁，並探討不同材質與鍍膜之模仁表面的品質，並以 FCD1 光學玻璃胚料製成平面透鏡，使用實驗室自行設計之熱壓設備，藉由熱壓技術將平面透鏡壓印成球面透鏡，得到下述結論：壓印時階段式升、降溫可以避免玻璃於升、降溫過程中破損；

在此製程上，除了壓印壓力會影響填充性，持壓時間亦會明顯的影響填充性；此實驗壓印出之球面透鏡，其透鏡中心較外圍部分具有較低的殘留應力；王[11] 於後續的研究中得到以下結論：模仁在熱壓成形過程中，其轉印性良好，如能控制模仁表面品質，則可易於控制產品的精度；預形體的形狀與表面精度將影響透鏡成品的精度；硬膜層的技术將絕對影響壓印成品的結果，適當的製程參數將能提高模仁及硬膜層壽命並提升成品品質；蔡[12] 利用單軸壓縮試驗與有限元素分析的配合，證明玻璃材料在熱壓成形階段的材料模型可假設為彈-黏塑性 (elasto-viscoplastic)。

將超音波振動能量應用於材料之塑性行為研究，最早由 Blaha 與 Langenecke[13] 所提出，他們對單晶鋅試片進行拉伸試驗時，附加一超音波振動於負荷上，實驗結果發現超音波振動作用時，材料之降服應力會產生降低現象。且材料在塑性成形時，其材料塑流應力大為減少，此現象稱為 Blaha effect。

超音波應用在金屬成形已有相當發展，例如 Dam[14] 利用超音波振動進行陶瓷材料切削加工研究，探討加工速率、刀具磨耗及表面粗度。Pei[15]-[18] 提出超音波旋轉加工與平面研磨加工結合，利用旋轉超音波振動進行陶瓷材料平面磨削加工研究，使加工不再侷限於圓孔加工；並以實驗證明超音波加工材料移除的機制在脆性破壞伴隨著塑性流動。

超音波應用於光學材料之成形研究方面，羅[19] 以高分子材料進行熱壓，為了提升昇降溫率，試以超音波振動加工工件表面，所產生的熱能融化表面，使模具上之微結構能複製於表面上。研究結果顯示以超音波加熱壓印微結構確實在加溫降溫性質有極佳的表現，且能單獨加熱表面，保持其他部分溫度變化不大，有效提升熱壓成形製程的產能。超音波應用在玻璃材料的加工方面，Gan[20] 等人將超音波振動應用在鑽石車削之刀具，加工玻璃材料，結果顯示工件上的切削速度和刀具上的最大振動速度之比例將會影響其在工件上的加工深度。Egashira[21] 等人應用超音波在玻璃材料上進行微鑽孔，結果可降低所需的力量，增加刀具壽命，增加了可穿透的長度，且可形成光滑的表面。然而，目前超音波用於玻璃熱壓成

形，尚無文獻可循，因此本計畫將針對此部分進行深入的探討。

本實驗室在超音波的研究中，陳[22]以實驗與有限元素模擬之方式討論熱音波打線接合中，參數與接合強度的關係，結果振動功率、接合下壓力、結合之間的參數越大時，接合強度也越大，接合面積也越大；但當參數值加至某一範圍後，接合強度便開始減小。何[23]研究超音波來改善薄殼塑膠射出成形所遭遇的材料流動性不良之情況，結果表示超音波振動用於薄殼射出成形時，較高的模具溫度因材料的固化時間較長，超音波振動能讓成品有較大的增長量。推測此乃因超音波振動在材料固化前能降低其流動時所受的阻力。洪[24]、[25]以超音波振動抽拉與端面壓縮製程，研究超音波振動於塑性加工之摩擦影響。由其模具與工件之相對速度兩極端化的加工特性。分析比較模具與工件之相對速度對超音波振動所產生摩擦機制的影響，推論超音波振動對於其他塑性加工可能產生的摩擦影響。研究結果顯示，超音波振動在塑性加工時，模具與工件之相對速度與超音波振動方向均會影響超音波振動所產生的摩擦機制。塑性加工時，模具與工件之相對速度為零時(例如鍛造)，超音波振動方向與成形力方向相同時，超音波振動會增加介面摩擦，且會使材料溫度上升的效應較明顯。當模具與工件之相對速度不為零(例如抽製)時，超音波振動方向與工件移動方向平行時，超音波振動會降低介面摩擦力，其切線相對速度越大，所降低的摩擦力越大。塑性加工時，模具與工件之相對速度不為零時，超音波振動方向與工件移動方向垂直時，超音波振動降低介面摩擦力的效應最佳，且切線相對速度越大，所降低的摩擦力越大。但當切線相對速度為零時，降低摩擦力的效應消失。

### 三、研究方法

為了進行超音波輔助玻璃熱壓成形，須結合實驗室已有之超音波設備以及熱壓設備，以符合需求。且包括使用紅外線加熱裝置作為加熱源以加快升溫速度，縮

短製程所需之時間。由於超音波放大器需在高溫環境下作為玻璃熱壓成形之模具，但是放大器之縱向振動模態之頻率會因為溫度升高而改變，使得高溫下無法正常進行超音波之振動。因此將利用有限元素分析軟體，考慮放大器在高溫下之材料特性，設計符合高溫下可正常振動之超音波放大器。

接著利用建立之超音波設備輔助進行玻璃熱壓成形試驗，研究中將探討此因素對熱壓成形製程中製程參數及玻璃特性所造成的影響。

### 四、結果與討論

為了進行超音波玻璃熱壓成形製程，將利用已有的熱壓成形設備進行改裝。架設方式如圖 3，超音波放大器裝置於熱壓成形時之上模具。且為了進行更精確之實驗，並改善已有熱壓設備的缺點，已初步研發第二代加熱爐，外觀如圖 4。為了縮短製程時間，將使用紅外線加熱燈管作為加熱源，使用 USHIO 公司所生產工作電壓 220V、功率 500W 之紅外線燈管，架設方法如圖 5、圖 6 所示，由前、後兩燈架為主體，可組合成六邊形之加熱燈組。紅外線加熱燈管利用銅片以及外接導線，以直立的方式並聯，銅片與導線利用耐熱且絕緣的陶瓷墊片裝設在燈架上。初步共使用 17 支燈管，由此預估加熱燈組之最大可輸出之功率可達 8500W。在溫度控制上，藉由熱電偶對模仁進行感測，將訊號傳送至溫度控制器，再由溫度控制器控制功率調整器(SCR)，來控制燈管的加熱功率。

由於超音波放大器本身之材料特性將隨著溫度升高而改變，使得縱向振動模態之頻率改變，因而超音波放大器在高溫下將無法正常運作。因此計畫中針對 20k Hz 振動頻率且可在高溫下使用之超音波放大器進行設計。利用有限元素分析軟體 ABAQUS，考慮材料升溫後之 Young's modulus，以及膨脹係數，模擬縱向模態之共振頻率與溫度之關係，並調整放大器尺寸(圖 7)，使放大器在 500°C 下縱向共振模態之頻率為 20k Hz(圖 8)。

另為了評估 35k Hz 超音波震動用於輔助

玻璃熱壓成形之可能性，利用 ABAQUS 之模態疊加方法，模擬超音波放大器之振幅，振動輸入端及輸出端之位移如圖 9，表示振動之最大震幅約為 1.8 $\mu\text{m}$ 。相較於 20k Hz 之超音波振動振幅約 10 $\mu\text{m}$ ，振幅較小。因此在後續的研究中，將可嘗試比較不同振幅之超音波振動，對於輔助玻璃熱壓成形之影響。

接著利用建立之 20k Hz 超音波設備進行超音波輔助玻璃熱壓成形，玻璃材料為 F2，熱壓成形溫度為 500 $^{\circ}\text{C}$ ，超音波振動為在壓縮過程中啟動，壓縮的控制為定荷重速率 50kg/min。實驗結果由圖 10 至圖 12 顯示，在施加超音波震動的時間點第 75 秒以及結束時間點第 110 秒時，力量發生震盪，但仍然可維持荷重增加的速率。然而在這段時間內，位移增加的程度明顯大於未施加超音波震動時的情況。由此可推論，在施加超音波震動之期間，玻璃軟化使得壓縮力量降低，因此壓縮的控制以加快壓縮速率的方式以維持所設定之荷重速率。由此可證明，超音波玻璃熱壓成形的可行性，且確實可降低成形時所需的應力。

## 五、計畫成果自評

本研究達成本年度的預定進度，完成超音波設備與玻璃熱壓設備之裝設，包括紅外線加熱裝置，以及可在高溫下使用之超音波放大器；並利用超音波輔助玻璃熱壓成形，證明玻璃材料受超音波振動後軟化之情形，以及製程之可行性。將可繼續執行後續之研究。

## 六、參考文獻

[1] Yasunori Saotome, "Microformability of optical glasses for precision molding", Journal of Materials Processing Technology, 140, pp. 379-384, Sep. 2003.

[2] M. Hecke, "Hot embossing – The molding technique for plastic microstructures", Microsystem Technologies, pp. 122–124, 1998.

[3] Koro Shishido, Masao Sugiura, and Tetsuo Shoji, "Aspect of glass softening by master mold", Proceedings of SPIE, Vol. 2536, pp.

421-433, 1995.

[4] D. Zhong, G.G.W Mustoe, J.J. Moore, J. Disam, "Finite element analysis of a coating architecture for glass-molding dies", Surface and Coatings Technology, 146 –147 pp.312-317, 2001.

[5] Anurag Jain, Allen Y. Yi, "Numerical Simulation of Compression Molding of Aspherical Glass Lenses", AIP Conference Proceedings, Vol. 712(1), pp. 239-244, 10 June 2004.

[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] 邱志宏, 玻璃鏡片壓製成形過程之傳熱分析, 國立清華大學動力機械工程研究所碩士論文, 1995 年 6 月。

[8] 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。

[9] 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。

[10] 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。

[11] 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。

[12] Yu-Chung Tsai, Chinghua Hung, and Jung-Chung Hung, "Research on The Glass Material Model for the Forming Stage of the Glass Molding Process", Journal of Materials Processing Technology (SCI, EI), Vol. 201, pp. 751-754, 2008.

[13] F. Blaha, and B. Langenecker, Naturwissenschaften, 1955, v.42, pp. 556.

[14] H. Dam, P. Qusit, M. P. Schreiber, "Productivity, surface quality and tolerances in ultrasonic machining of ceramics", Journal of Materials Processing Technology, 1995, v.51, pp.358-368.

[15] Z. J. Pei, P. M. Ferreira, S. G. Kapoor and M. Haselkorn, "Rotary ultrasonic machining for face milling of ceramics", Int. J. Mach. Tools Manufacture, 1995, v.35, pp.

1033-1046.

- [16] Z. J. Pei, P. M. Ferreira, M. Haselkorn, "Plastic flow in rotary ultrasonic machining of ceramics", *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, v.48, pp.771-777.
- [17] Z. J. Pei, P. M. Ferreira, "Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining", *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, 1998, v.38, pp. 1399-1418.
- [18] Z. J. Pei, P. M. Ferreira, "An experimental investigation of rotary ultrasonic face milling", *Int. J. Mach. Tools Manufacture*, 1999, Vol.39, pp. 1327-1344.
- [19] 羅金德, *超音波加熱壓印微結構之研究*, 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文, 2002年六月。
- [20] J. Gen, X. Wang, M. Zhou, B. Ngoi and Z. Zhong, "Ultraprecision Diamond Turning of Glass with Ultrasonic Vibration", *Int J Adv Manuf Technol*, 2003, Vol.21, pp. 952-955.
- [21] K. Egashira, K. Mizutani and T. Nagao, "Ultrasonic Vibration Drilling of Microholes in Glass", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 2007, Vol.51, pp. 339-342.
- [22] 陳家旭, *打線接合之實驗與有限元素研究*, 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 2002年六月。
- [23] 何奇忠, *超音波輔助薄殼射出成形之流動性研究*, 國立交通大學機械工程研究所碩士論文, 2004年六月。
- [24] 洪榮崇, *超音波振動於鋁合金成形加工的摩擦效應研究*, 國立交通大學機械工程研究所博士論文, 2005年六月。
- [25] Jung-Chung Hung and Chinghua Hung, "The influence of ultrasonic-vibration n hot upsetting of aluminum alloy", *Ultrasonic*, Vol.43, pp. 692-698, August 2005.

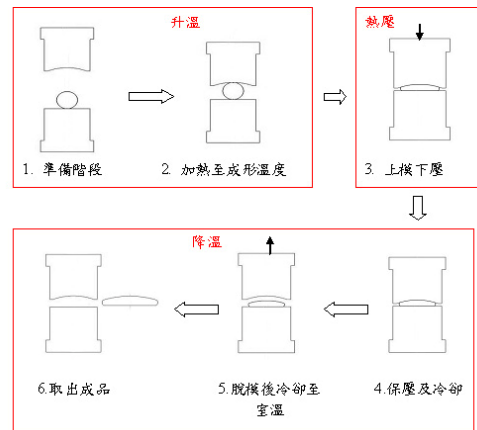


圖 1 玻璃熱壓成形技術示意圖

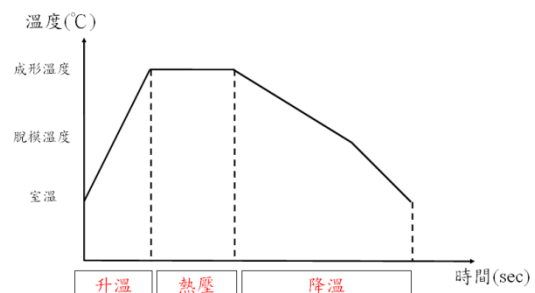


圖 2 熱壓成形技術溫度—時間關係圖



圖 3 熱壓設備外觀圖



圖 4 第二代加熱爐外觀

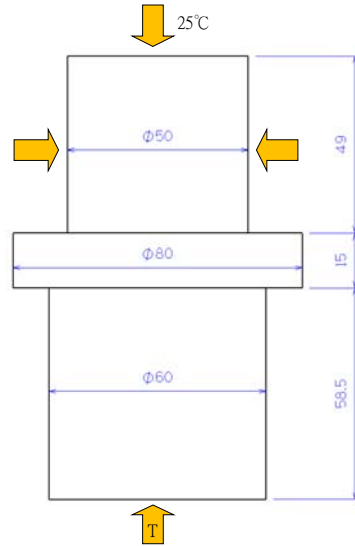


圖 7 高溫超音波放大器設計圖

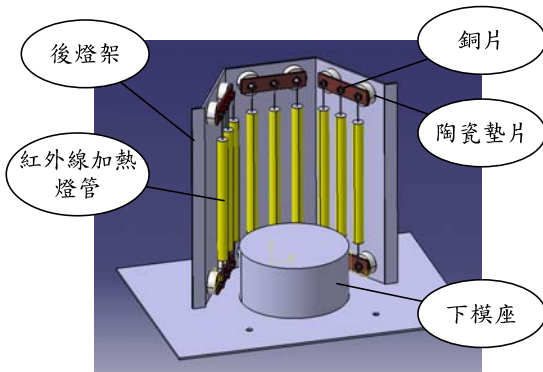


圖 5 紅外線燈管加熱裝置設計

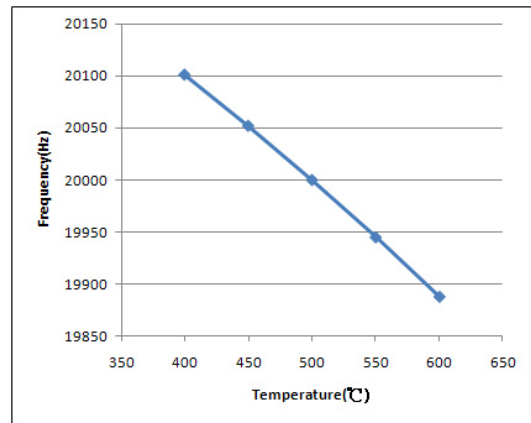


圖 8 超音波放大器縱向共振頻率-溫度關係

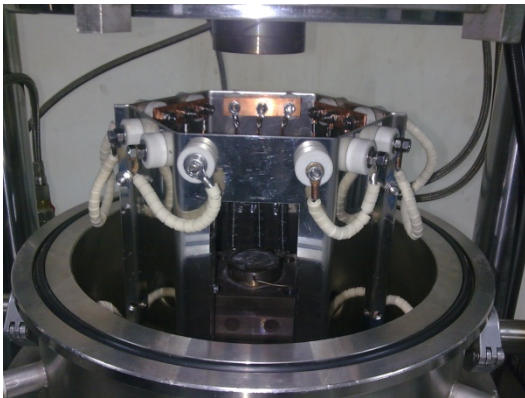


圖 6 紅外線燈管加熱裝置

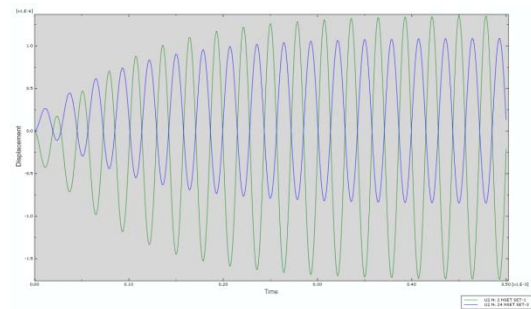


圖 9 35k Hz 超音波振動之位移

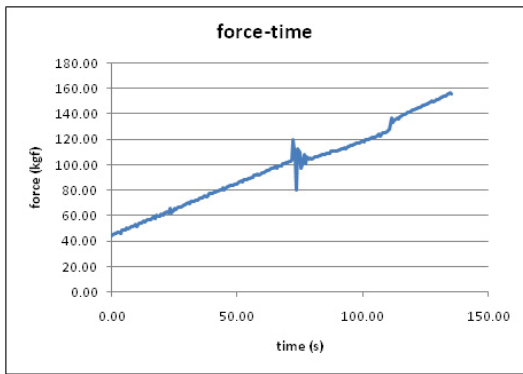


圖 10 超音波輔助玻璃熱壓成形力量-時間結果

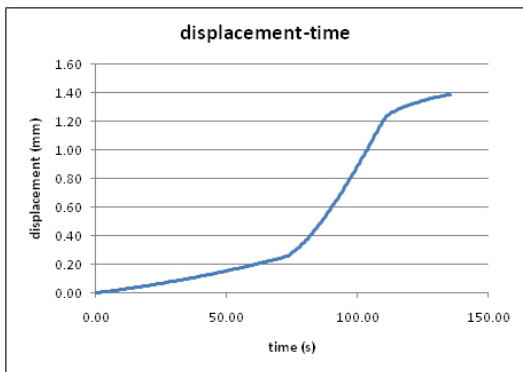


圖 11 超音波輔助玻璃熱壓成形位移-時間結果

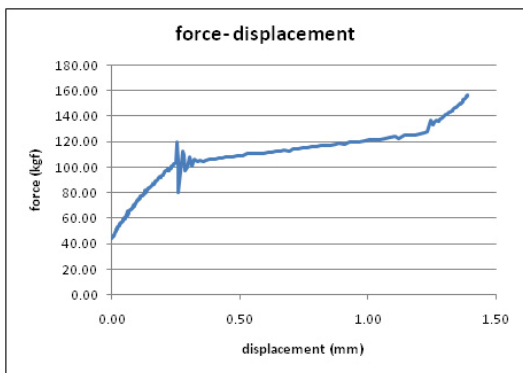


圖 12 超音波輔助玻璃熱壓成形力量-位移