

運用塑膠熱壓參數法於微型幫浦之最佳化設計

*許藝菊、鄭博元、李曉薇

南臺科技大學機械工程學系

*yichu@mail.stust.edu.tw

摘要

本研究應用熱固性高分子材料，不飽和聚酯樹脂(Unsaturated Polyester; UP)來取代電鑄鎳模仁的技術，製作一個新型的微流道模仁，再熱壓於PMMA基板上，並製作成微型幫浦。再以UP為模仁完成後，採用田口式理論分析來達到UP模仁熱壓PMMA基板的最佳化控制之製程參設計，經由田口法最佳化得到，要使UP模仁熱壓PMMA時，PMMA具有較好的尺寸轉寫保真度，其最佳參數為上板150℃、下板60℃、熱壓3分鐘、施加力量0.5公噸，可以達到最好的轉寫率；而若要保持UP模仁的耐用度則最佳參數為上板150℃、下板50℃、熱壓4分鐘、施加力量0.5公噸，可以降低UP模仁熱壓後尺寸的變化。最後，將UP模仁熱壓PMMA基板後所製作的微幫浦測其效能，其呈現在驅動電壓100 Vpp時，UP模仁之幫浦於500 Hz時則有最大流量111.2 μ l/min；固定頻率400Hz與電壓100 Vpp測試時，UP模仁熱壓之幫浦其最高背壓則為5.9 Pa，證實整個實驗結果確實可行。

關鍵詞：不飽和聚酯樹脂(UP)、模仁、田口式理論、最佳化

Using Taguchi Method to Optimize the Parameters of PMMA Hot-embossing When Manufacturing Plastic Micro-pumps

Yi-Chu Hsu, Po-Yuan Cheng, Hsiao-Wei Li

Department of Mechanical Engineering, Southern Taiwan University of Science and Technology

Abstract

A thermoset polymer material, Unsaturated Polyester (UP), was used to replace a standard nickel mold to create a new type of microfluidic master. This UP mold hot embosses the PMMA substrate and was used to make a micropump. The quality of the pump's performance was subsequently verified. First, a Taguchi design analysis was used to create a hot embossed PMMA substrate. Using a system based on the Taguchi method, it was experimentally discovered that the optimal PMMA size transformation is achieved when operation parameters of 150 °C, 60 °C, 3 minutes, and 0.5 tons for upper plate temperature, bottom plate temperature, duration and applied pressure, respectively. For best durability of the UP master, the optimum parameters are 150 °C, 50 °C, 4minutes, and 0.5 tons for upper plate temperature, bottom plate temperature, duration and applied pressure, respectively. Finally, the micropump based on this optimal parameter fabrication process has maximum flow 111.2 μ l/min when the voltage is 100 Vpp at 500 Hz. The maximum back pressure is 5.9 Pa, when the voltage 100 Vpp at 400 Hz.

Keywords: Unsaturated Polyester (UP), Master Mold, Taguchi method, Optimization

Received: Aug. 4, 2014; accepted: Dec., 2014.

Corresponding author: Y. -C. Hsu



壹、前言

近年來微機電製程的方法種類繁多，而在微流道的翻印製程上，開始將觸角深入各種不同材料上的運用研究，其中塑膠材料的使用更是深受國內外學者的使用，但舉凡國內外的塑膠材料運用在材料上的選擇較為單一，如環氧樹脂類型的塑膠材料。本研究以不同於環氧樹脂的塑膠材料，來製作微米等級的微流道模仁，並利用田口法有效的分析塑膠模仁熱壓在 PMMA(Polymethyl methacrylate)基材上的最佳參數，且成功完成壓電型蠕動式微型幫浦製作並實際的進行運作，讓塑膠材料製作微流道的研究在材料上的運用有所突破。

一、研究動機

在講求大量製造的概念下為降低成本，一般實驗室在微流道的翻印是先將矽模仁電鑄上 Ni，此時矽模仁會被犧牲，再以 Ni 模仁為第二次模仁來翻印高分子材料(PMMA)，最後，將兩片高分子材料上下板接合形成流道。然而以電鑄方式完成 Ni 模仁，需要電鑄設備、速度緩慢、且設備容易故障，對於一般實驗室具有相當地困難性[1]。因此在不使用電鑄 Ni 模仁的過程，本研究以簡單且轉印次數耐久度高的高分子塑膠材料製程來取代 Ni 模，再找出熱壓於 PMMA 基板的最佳參數，並將其應用於壓電型蠕動式幫浦，有效完成蠕動式微型幫浦的製作。

二、文獻回顧

目前對於微流道結構轉印，使用的模仁材料有環氧樹脂模(FR-1080)[3,4]、環狀烯烴共聚物模(cyclic olefin copolymer (COC)[3]、Wacker Elastosil (RT607) [4]、PDMS (Polydimethyl siloxane)[2]、印刷電路板(printed circuit board ; PCB)和 PMMA。其中以 Pei Song Chee 等人於 2013 年利用印刷電路板(PCB)的方式[5]需經 CNC 機械加工製作，道流道尺寸較大無法精準到微米等級。在上述的材料在台灣並不普遍，也不容易購得，在取得上有困難，例如：環氧樹脂模(FR-1080)、環狀烯烴共聚物模(cyclic olefin copolymer ; COC)、Wacker Elastosil RT607。而一般最常見的 PDMS，因其性質太軟，不符合作為振動薄膜式驅動流體的基材。本研究經本校化材實驗室推薦，使用一種類似於環氧樹脂的塑膠高分子材料“不飽和聚酯樹脂”來進行微流道的模仁製作。

三、不飽和聚酯樹脂(Unsaturated Polyester : UP)

Vorland 於 1894 年將二元醇和馬來酞加熱而獲得最早期的不飽和聚酯，在二次大戰初期，不飽和聚酯樹脂的應用開始普及，經過不斷改良至今，不飽和聚酯樹脂 (UP) 已成為一種良好的複合材料基材，其優點能在常溫下操作，可自由調整硬化性具有良好的機械性質、電氣性質、耐酸性，且價格低廉、取得容易等，所以工業上用途十分廣泛，大從船艇，小至鈕扣等製品，較常用在大型工藝塑膠成品[6]。

本研究利用不飽和聚酯樹脂作為微流道模仁來做使用，如圖 1。使用英全化學工業股份有限公司的不飽和聚酯樹脂(6120TA)來進行模仁製作運用。



圖1 UP微流道模仁



四、田口工程品質方法

田口式品質工程是由田口玄一博士 (Dr. Genichi Taguchi) 所提倡的，能減少許多實驗次數且可達系統最低要求，並允許某些程度被外界干擾，同時能保持品質穩定性，且對各因數自身的影響性作出合理的分析，並找出最佳品質控制的參數[7]。田口品質工程的參數設計方法是將品質特性轉換成 S/N 比 (Signal to Noise Ratio, 信號/雜訊比)，用來表示製程或產品水準及誤差因數對其品質特性影響程度。利用 S/N 比的特性可以找到變異數小且品質特性平均之最佳設計。S/N 比與損失函數兩者關係密切且均為衡量製程與品質水準的客觀指標。

望小特性 (small is better) 的 S/N 比計算公式如下：

$$\eta(S/N\text{比}) = 10 \log \frac{1}{V_e} = -10 \log V_e = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (1)$$

y_i 為品質測量值

n 為量測總數

本研究以望小特性為品質特性參數設計，首先定義截面積為熱壓實驗品質特性，影響此品質特性亦是影響熱壓的因子有：上板溫度、下板溫度、熱壓時間、施加力量，對此4項因子各設定3個變動水準(level)，故採用田口實驗4因子3水準之 $L_9(3^4)$ 的直交表，排列出9組實驗之實驗配置表。再將實驗數據依品質特性而定，計算出S/N比，以S/N比做出補助表，由補助表可由各水準的因數之比較，找出主效應因數，最後完成其田口最佳參數設計。

五、微幫浦原理與設計

塑膠蠕動式微幫浦主要是使用壓電材料，鉛鈦酸鉛 (Lead Zirconate Titanate) 致動器與塑膠微流道系統所組成，藉由PZT致動器的運作，擠壓三個流室腔體內之液體，使液體藉由推擠之方式往出口端傳送；在設計方面採用李錄豪2007年自我汲吸塑膠蠕動式微型幫浦[8]之結構設計，對於所設計之尺寸結構朝微小化與方便攜帶結合。塑膠結構部分，分為流道與致腔體室兩大結構，其中腔體室深度為 $15\mu\text{m}$ ，流道深度為 $200\mu\text{m}$ ，腔體室直徑為 7mm 。如圖2。

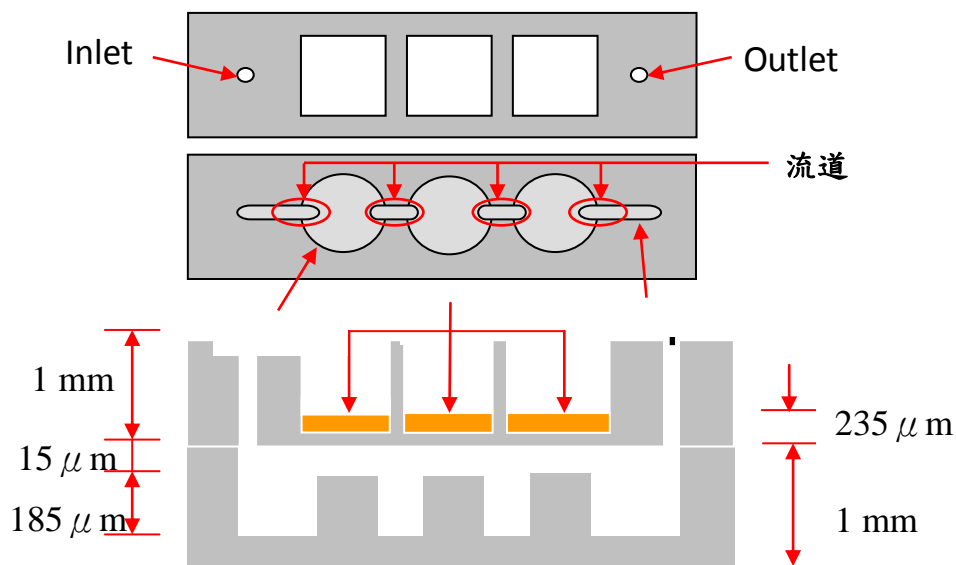


圖2 塑膠蠕動式幫浦設計結構[8]



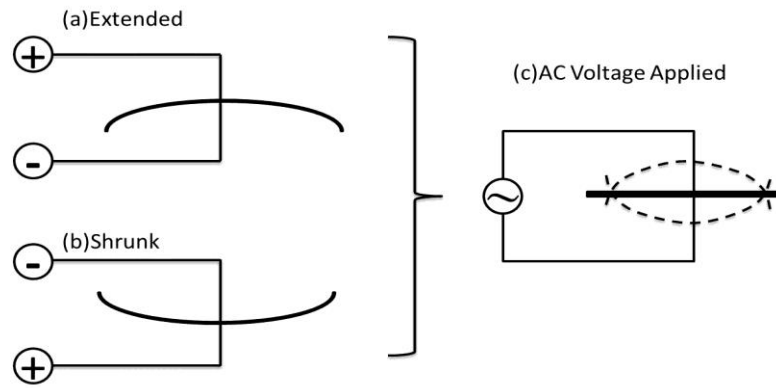


圖3 壓電致動膜施與電壓示意圖[6]

六、PZT 致動原理

壓電材料本身擁有壓電效應能將機電互相轉換的特質，一直被廣泛的應用在感測器（Sensor）與致動器（Actuator）的使用。本研究利用PZT作為一個致動器來使用。若施與PZT材料的上電極為正電壓，下電極為負電壓時，PZT會向上凸起；若施與相反的電壓於上下電極時，PZT會向下凹陷。得知PZT有此特性後，可在PZT上下電極施與一交流信號的電壓，PZT即上下來回的擺動，產生所需的動力，如圖3。

貳、實驗流程與數據呈現與討論

一、實驗流程與量測方法

本研究實驗分為兩大部份，分別為：1.熱壓製程田口法實驗與討論、2.幫浦效能討論。以雷射共軛焦顯微鏡(confocal microscope；KEYENCE, VK-X100/X200)，如圖4，來觀察其轉印微流道結構尺寸變化，量測微流道的寬和深，測量的位置如圖3.10中標示的C1、C2、C3和C4，其中C4為流室深度，其他為流道深度，在流道位置C1、C2、C3都是擷取在流道正中央做為量測位置。配合量測軟體針對所掃描出來的寬和高的數據進行量測，並在同一量測位置利用軟體功能取10個點，每點間隔20 μm ，做量測取平均值，並計算尺寸變化率，變化率公式如(1)：

$$\text{變化率(\%)} = \{(X_2 - X_1) / X_1\} \times 100 \quad (2)$$

其中 X_1 :原始尺寸

X_2 :轉印後尺寸

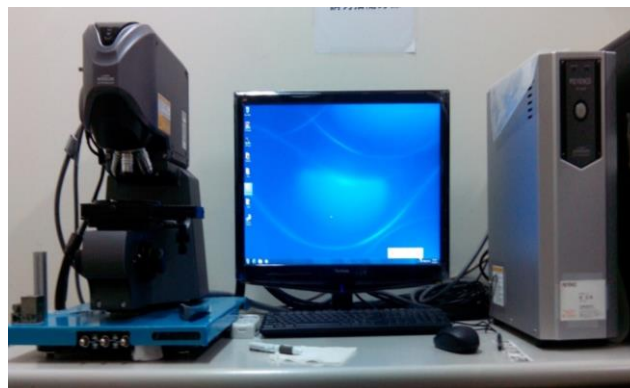


圖4 雷射共軛焦顯微鏡(confocal microscope；KEYENCE, VK-X100/X200)



二、熱壓製程田口法實驗與討論

UP模仁利用田口式(Taguchi-Method)找出UP熱壓PMMA的最佳參數，並利用接觸角來作為模仁的耐久度說明，其熱壓實驗流程，如圖5。利用田口法設計出UP模仁對PMMA的微流道熱壓參數實驗設計並遵循田口法找出最佳參數；量測部分針對UP模仁熱壓PMMA後的微流道之寬和深尺寸以雷射共軛焦顯微鏡(confocal microscope；KEYENCE, VK-X100/X200)進行量測，量測位置如圖6所示，量測位置C1、C2、C3都是擷取流道正中央位置，再利用雷射共軛焦顯微鏡分析軟體，對每個量測位置採20點，每個點間距為10 μ m做平均值量測，來得到轉印後的深度與寬度數據。

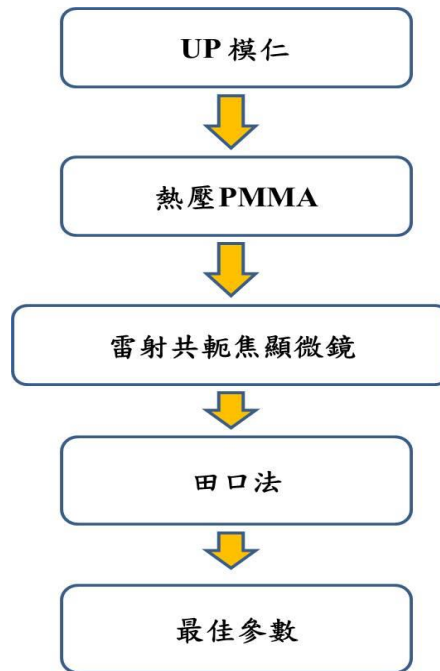


圖 5 UP 模仁田口熱壓實驗設計流程圖

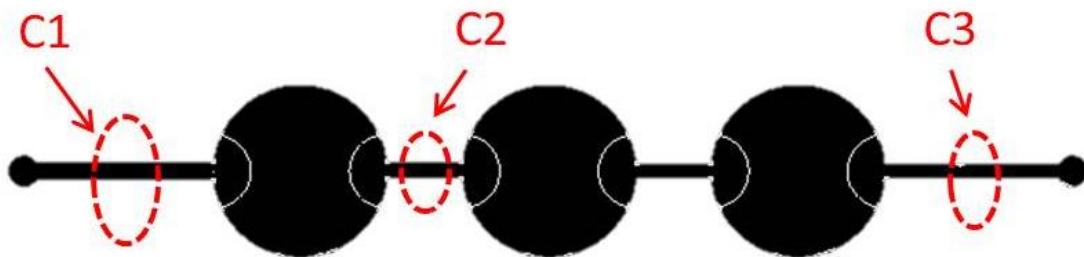


圖 6 熱壓後微流道結構量測位置

(一)UP 模仁熱壓 PMMA

UP模仁來對PMMA基板進行熱壓，其熱壓流程與Ni模仁熱壓流程相同，但不同於Ni模仁熱壓PMMA之參數，UP模仁熱壓利用田口方法作為參數設計，並找其熱壓最佳參數。

首先需建立操作因子及水準，本研究選擇的操作因子為(A)上板溫度、(B)下板溫度、(C)熱壓時間、(D)施加力量，每個操作因子有三個水準，因此選擇 $L_9(3^4)$ 直交表做為實驗的依據，而實際操作因子的水準設計值，如表1所示。



表 1 實驗中各操作因子水準設計值

	操作因子	Level 1	Level 2	Level 3
A	上板溫度 (°C)	120	140	150
B	下板溫度 (°C)	40	50	60
C	熱壓時間(min)	2	3	4
D	施加力 (ton)	0.25	0.375	0.5

利用 PMMA 轉印後的面積來看其轉印的保真度，用雷射共軛焦顯微鏡觀察到整體流道尺寸呈現梯型，故利用梯型面積公式來計算，以表 1 的實驗因子來完成田口實驗數據，並計算計算 S/N 比後完成補助表 2 與回應圖 7，從數據上顯示熱壓後 PMMA 面積的變化主效應值為 A(依據田口法公式之望小特性公式，主效果數值越大影響越大)，其次分別為 B、D、C，從補助表分析得知最適條件為 A3、B3、C2、D3，使用最佳參數為上板溫度 150°C、下板溫度 60°C、熱壓時間 3 分鐘、施加力量 0.5 公噸可以得到較佳的面積保真度。

表 2 PMMA 面積回應表

面積	Level 1	Level 2	Level 3	主效果
A	-100.5	-91.6	-81.0	19.5
B	-96.1	-89.2	-87.7	8.4
C	-92.5	-90.1	-90.5	2.4
D	-89.5	-95.0	-88.6	6.5

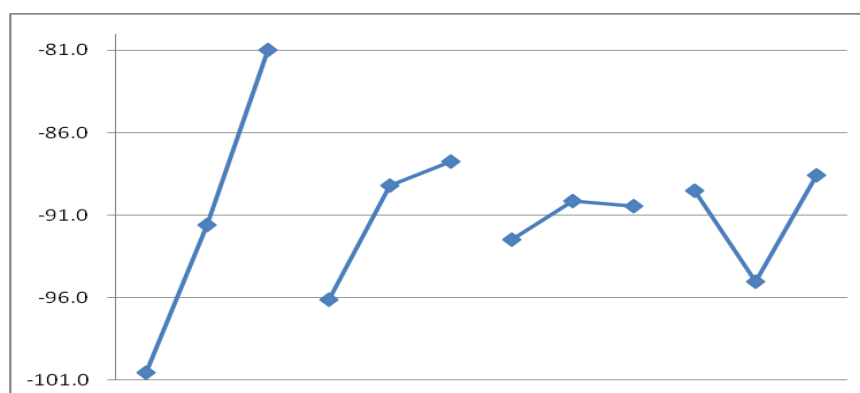


圖 7 PMMA 面積回應圖

(二)UP 模仁熱壓後的變化

在實驗過程中發現每次的熱壓對 UP 模仁本身的尺寸都有變化，透過每熱壓一次就針對 UP 模仁量測一次，量測位置如圖 6 所示，量測位置 C1、C2、C3 都是擷取流道正中央位置，一樣透過表 1 的實驗因子來進行田口方法來完成 UP 熱壓後的變化實驗數據。

針對 UP 熱壓後的變化與 PMMA 一樣利用 UP 模仁在熱壓後的面積來看其變化狀況，以表 1 的實驗因子來完成田口實驗數據，並計算計算 S/N 比後完成補助表 3 與回應圖 8，從數據上顯示熱壓後 PMMA 面積的變化主效應值為 B.溫度(主效果數值越大影響越大)，其次分別為 A、C、D，從補助表分析得知最適條件為 A3、B2、C3、D4，使用最佳參數為上板溫度 150°C、下板溫度 50°C、熱壓時間 4 分鐘、施加力量 0.5 公噸，可以減少 UP 熱壓後的面積損失。



表 3 UP 模仁熱壓後面積回應表

面積(I)	Level 1	Level 2	Level 3	主效果
A	-93.3	-81.6	-78.7	14.5
B	-94.8	-76.5	-82.4	18.3
C	-87.5	-85.3	-80.8	6.7
D	-84.5	-84.8	-84.4	0.4

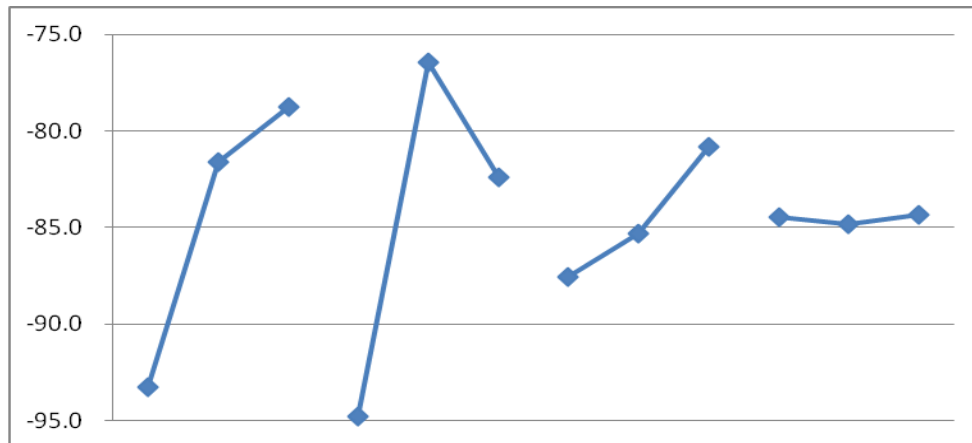


圖 8 UP 熱壓後面積變化回應圖

(三) 熱壓製程田口實驗討論

經過上述的實驗數據呈現，歸納出了表 4 田口最佳化參數總整理，由表 4 可以看出影響 PMMA 面積轉印的最大影響參數是上板溫度，這是合乎我們預計的，配合基材 PMMA 是放置於上板，PMMA 的軟化程度直接影響了尺寸轉寫的成功率，而 UP 模仁熱壓後的面積最大參數影響是下板溫度，也合乎 UP 模仁是放置於下板且需要較低溫狀態來保護 UP 模仁本身的尺寸損耗的理論。

針對 PMMA 轉寫 UP 模仁尺寸的保真度，由熱壓後 PMMA 的面積來看，其最大影響參數為上板溫度，這顯示 PMMA 的轉寫與 PMMA 放置於上板時的軟化程度有關。UP 模仁在熱壓後的面積變化，最大影響參數為下板溫度與上述相呼應，由於 UP 模仁放置於下板，對其影響在於下板的溫度決定是否讓 UP 模仁產生變形。

表 4 田口最佳化參數總整理

	最大影響參數	上板溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	下板溫度 ($^{\circ}\text{C}$)	熱壓時間 (min)	施加力 (公頓)
PMMA 面積	上板溫度	150	60	3	0.5
UP 面積	下板溫度	150	50	4	0.5

二、幫浦效能

利用田口最佳參數完成 UP 模仁熱壓的 PMMA 基板製作成微幫浦，並針對 PZT 致動器位移量、微幫浦頻率與流量測試、流量與背壓測試，來呈現微幫浦的效能。

實驗設備如圖9所示，主要分為控制與觀察量測兩部分。控制部分為電源供應器 (LPS-305)、波形



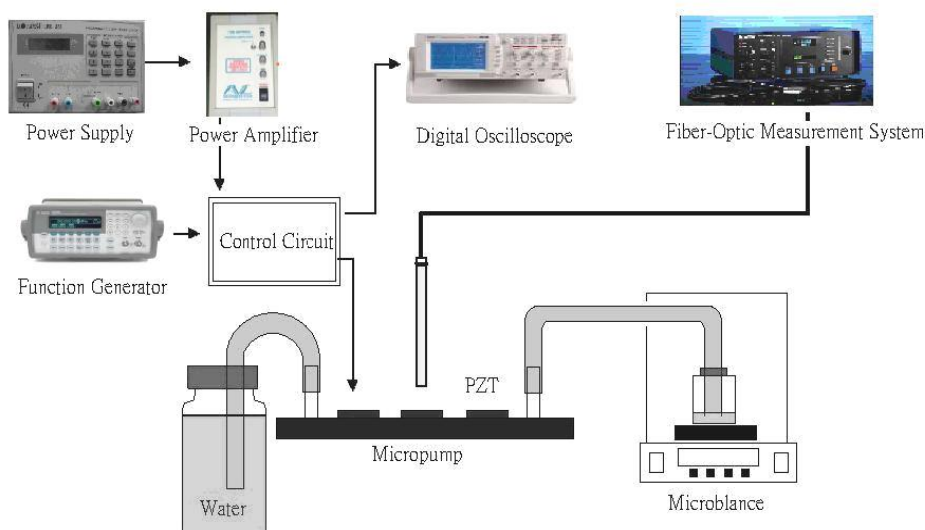


圖9 幫浦效能實驗之設備架設圖

產生器(Motech, FG 503)、電壓放大器 (Piezotronics, PCB790) 及成大電機系生命晶片實驗室所提供之四相位控制電路；量測部分則為示波器 (Tektronix, TDS2014)、光纖位移計量測儀 (MTI Instruments, MTI 2000) 與微量天秤 (BL 120S)。以電源供應器與電壓放大器提供實驗所需要的電壓控制，波形產生器提供不同的方波以控制頻率，最後都由四相位控制電路輸入制動之方形 PZT 電極，並由示波器檢視相位波形之輸出。方形 PZT 驅動產生的位移量，以光學量測方式的光纖位移計量測儀取得；流量效能量測之方式則以兩個含液體且等液面高之試瓶，當液體由入口試瓶送至出口試瓶的微量天秤內，讀取液體在單位時間內造成微量天秤的增加量則為流量。

(一) 驅動頻率與 PZT 位移量關係

蠕動式微幫浦使用方形之 PZT，並提供四相位與驅動電壓 100 Vpp 之控制進行頻率測試，頻率測試之範圍為 25 ~ 400 Hz，而其驅動液體為去離子水，實驗結果可由 11 次實驗所擷取之數據取得結果平均值並將此數據繪出，如圖 10，由實驗圖形中可發現方形 PZT 在頻率 37.5 Hz 時，有最大位移量 0.98 μm 。

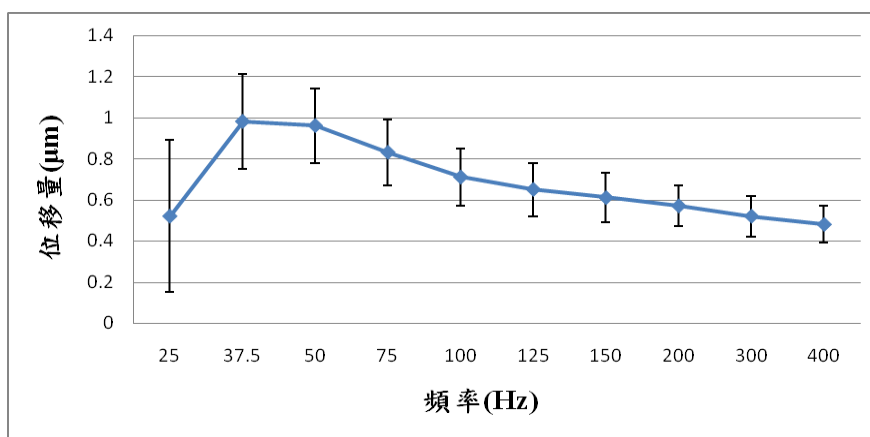


圖10 方形 PZT 頻率與位移量關係圖

(二) 驅動頻率與流量關係

提供四相位與驅動電壓 100 Vpp 進行頻率測試，頻率測試之範圍為 10 ~ 1000 Hz，驅動液體為去離子水。UP 模仁熱壓完成的 PMMA 來製作的幫浦測試，如圖 11 所示，UP 模仁的幫浦 01 在 500 Hz 時則有最大流量 111.2 $\mu\text{l}/\text{min}$ 。



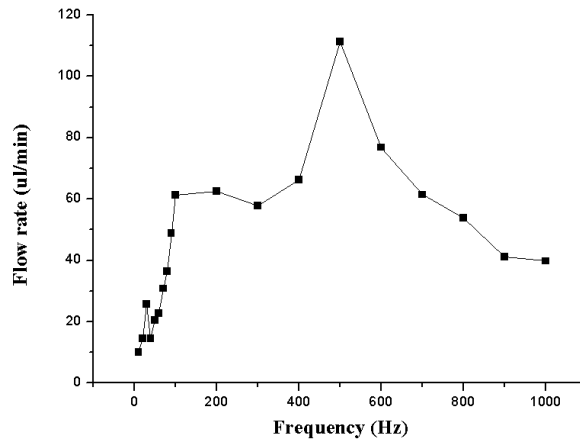


圖 11 UP 模仁熱壓於 PMMA 基板後 PMMA 基板組裝之幫浦流量測試

(三) 蠕動式幫浦背壓與流量之關係

以幫浦驅動去離子水，並以進出口端液面高度差之方式量測背壓與流量之間的關係。由圖 12 可明顯看出在 100 Vpp 時液體之流量與背壓關係，當無背壓（即進出口端液面無高度差）時，幫浦擁有最大流量，隨液面壓差之增大，幫浦之輸送之液體流量逐漸減少，至一臨界高度後即無法傳送液體，而此無液體輸送之臨界高度即為極限背壓。以固定頻率 400Hz 與電壓 100 Vpp 測試實驗所設計的兩種幫浦時，UP 模仁熱壓之幫浦其最高背壓則為 5.9 Pa。

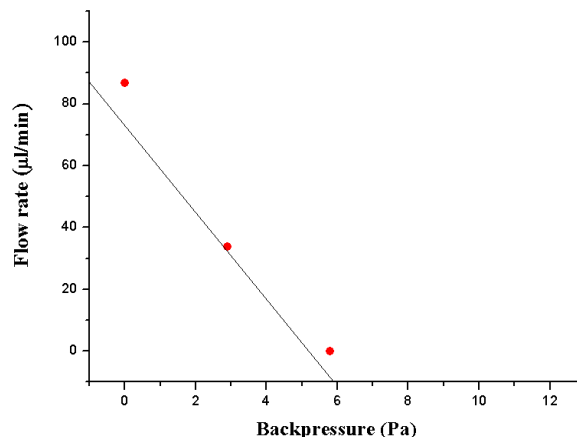


圖 12 UP 模仁熱壓於 PMMA 基板後組裝之幫浦流量與背壓關係圖

參、結論

利用不飽和聚酯樹脂(UP)微流道模仁，再熱壓於PMMA基板上，並製作成微型幫浦，整個實驗、討論與結果已於上述中完整呈現。

以田口式理論分析來達到UP模仁熱壓PMMA基板的最佳化控制之製程參設計，經由田口法分析，得到，要使UP模仁熱壓PMMA時，PMMA具有較好的尺寸轉寫保真度，其最佳參數為上板150℃、下板60℃、熱壓3分鐘、施加力量20.5公噸，可以達到最好的轉寫率；而若要保持UP模仁的耐用度則最佳參數為上板150℃、下板50℃、熱壓4分鐘、施加力量0.5公噸，可以降低UP模仁熱壓後尺寸的變化。而從兩種最大影



響參數顯示UP模仁與受壓基材PMMA的熱變形溫度對於熱壓成型時在形狀轉印上具有影響。

經由UP模仁熱壓PMMA基板後所製作的微幫浦效能呈現，在驅動電壓100 Vpp時，UP模仁之幫浦於500 Hz時則有最大流量111.2 μ l/min；固定頻率400Hz與電壓100 Vpp測試時，UP模仁熱壓之幫浦其最高背壓則為5.9 Pa。

參考文獻

- [1] 郭獻彰 (2005)。微結構熱壓成型之製程研究。大葉大學機械工程研究所碩士班，彰化。
- [2] T. Koerner, L. Brown, R. Xie and R. D. Oleschuk. (2005). Epoxy resins as stamps for hot embossing of microstructures and microfluidic channels, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 107, 632–639.
- [3] R. K. Jena, C.Y. Yue, Y. C. Lam, P. S. Tang and A. Gupta. (2012). Comparison of different molds (epoxy, polymer and silicon) for microfabrication by hot embossing technique, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 163, 233–241.
- [4] H. Feth, F. Pothof, F. Thoma, T. Schmidt, C. Mueller, F. Goldschmidtboeing and P. Woias (2013). Design, fabrication and characterization of a piezoelectrically actuated bidirectional polymer micropump, *Microsystem Technologies*, 20, 1299-1310.
- [5] P. S. Chee, R. Arsat, U. Hashim, R. A. Rahim and P. L. Leow (2013). Micropump pattern replication using printed circuit board (PCB) technology, *Materials and Manufacturing Processes*, 28(6), 702-706.
- [6] 淹山榮一郎 (1980)。不飽和聚酯樹脂：FRP用樹脂合成及應用。台南市：復漢出版社印行。
- [7] 劉克琪 (1994)。實驗設計與田口式品質工程。臺北市：華泰文化出版社。
- [8] 李錄豪 (2007)。自我汲吸塑膠蠕動式微型幫浦之研究。南臺科技大學機械工程系，台南市。

