具微細特徵PMMA板材熱壓成型特性之研究

黃振銘　潘奎佑　何明雄　林明俊*

南亞技術學院機械系

摘要

在本研究中，利用紫外光深刻模造法(UV-LIGA)製程以矽基SU-8光阻搭配微電鑄來得到用於生物晶片用途之微特徵流體平台之鎳鈷（Ni-Co）基模仁，其中微流道陣列之尺寸約30μm深、50μm寬且流道間距為250μm。然後選用1 mm厚之聚甲基丙烯酸甲酯（俗稱壓克力，PMMA）板材作為微熱壓成型之成型材料，針對不同成型條件對微流道包括寬度與深度之轉寫正確性，以3D雷射顯微鏡作一量測、分析與探討。研究結果發現，熱壓溫度與作用力為影響具微細特徵熱壓元件成型正確性之兩個重要關鍵性參數。當壓印溫度135℃時，微流道壓印深度與壓印寬度之正確性隨作用力之增大而增加且達到一飽和值。當壓印溫度140℃時，微流道壓印寬度之正確性雖隨壓印力之增大而增加，但壓印力高於21kN以上時，卻受壓印應力梯度與高溫時塑料流動性佳影響，微流道壓印寬度之正確性反而隨壓印力之增大而降低；熱壓溫度亦有類似之影響性。

關鍵字：微熱壓成型，微細特徵，轉寫正確性

*Email： lmgm@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070#6302　Fax：03-4384670

Molding Characteristics Study of Hot Embossing PMMA Substrate Designed with Micro-Featured Geometry

Jheng-Ming Huang　Kui-You Pan　Ming-Hsiung Ho

Ming-Chung Lin*

Department of Mechanical Engineering

Nanya Institute of Technology

Jhongli, Taiwan

Abstract

In this study, micro molding via hot embossing was applied to micro-featured fluidic platform used for Bio-Chip test. UV-LIGA like processes were used to prepare silicon based SU-8 photoresist followed by electroforming for making Ni-Co based stamp. The micro feature in the stamp consists of micro-channel array of 30μm in depth, 50μm in width and 250μm in pitch size. A PMMA film of 1 mm thickness was used as a hot embossing substrate. Effect of various molding conditions on the replication accuracy of micro-features was investigated. The width and depth of micro-channels were measured and analyzed. It was found that applied force and embossing temperature are the two key parameters affecting molding accuracy significantly. When embossing temperature is 135℃, the accuracies of the imprint depth increased with the applied embossing force until the associated dimensions reached saturated values. When embossing temperature is 140℃, initially, with increasing applied force, the accuracies of the imprint width increased gradually, when the applied embossing force is higher than a critical value (about 21kN), the accuracies of the imprint width decreased with the applied embossing force. The reasons can be both attributed to the gradient of

compression stress and viscosity, because at higher temperature, the polymer can flow easily. Embossing temperature shows similar influence on the accuracies of imprint depth and width as the applied force.

Key words：Micro Hot Embossing, Micro-Feature, Replication Accuracy

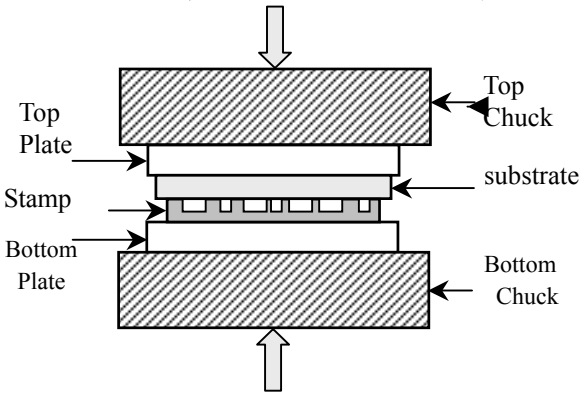
壹、前言

隨著科技的發展，包括歐美日等許多先進國家均預測並指出奈米科技(Nanotechnology)、資訊科技(Information technology)與生物科技(Biotechnology)等技術，將是繼半導體產業之後在未來10至20年間影響人類發展最重要的三大科技[1-2]。而其中在生物科技方面，伴隨著人類對於醫療技術的重視，生醫技術已成為現階段熱門的研發重點，含有微流道之生物晶片等產品將成為未來重要的市場主流。生物晶片技術的主要特點是其分析靈敏度及專一性高、分析速度快，所使用的檢測樣品及試劑少，並可經由一次實驗獲得整體性(平行化)的實驗數據。透過生物晶片之分析，具有降低分析成本，增加準確度，加速分析速度，及減少人力等優點。

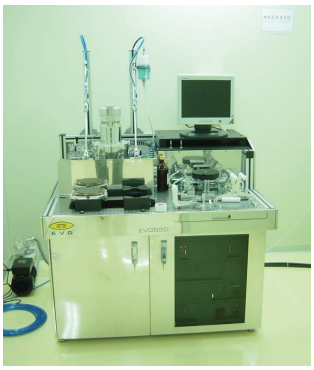
目前國外在生物晶片以及微流道製作[3]的研發已有顯著的成績且已部分市場化，但其製造成本高，使得市場普及率不如預期。在最近幾年中，許多以高分子材料為基材(Substrate)之微製造技術，例如微射出成型[4]，微鑄造成型[5-6]和微熱壓成型[7-8]等技術已發展而應用於製造生物與化學微機電產品。這是因為以高分子為基材之材質提供了廣泛的物理與化學性質（例如：低導電率和高化學穩定性），同時與金屬、陶瓷和半導體材料相比，高分子材料具有價位低、可大量生產製造和生物相容性佳等優點。Narasimhan and Papautsky [9]直接指出塑膠高分子應用在生物晶片方面的的優點，如寬廣的材料特性、生物化學的相容性、容易加工、材料取得容易且低價，因此高分子塑膠材料適合應用在生醫科技。微模造成型被認為是在微機電產業中降低生產成本，提高產能的關鍵製程，目前適於微模造技術有下列幾種成型方式：微射出成型(Micro-Injection Molding)、微熱壓成型(Hot Embossing Molding) 、微鑄造成型(Casting) 和表面微特徵射出壓縮成型(Injection-Compression Molding)等。以下僅就微熱壓成型技術[10-13]略述如下：

應用微熱壓成型技術於高分子薄膜以產生具有微特徵圖案之產品是最近發展極具潛力且非常重要之製程技術。微製造中相對較昂貴之步驟只需花費於製作模仁（Stamp），之後具有相同結構之產品，則可重複大量生產。熱壓之模仁可以是晶圓(Wafer)、玻璃、電鍍鈷鎳(Electroplated Co-Ni)模或其他具有微特徵之模仁。由於微熱壓成型技術是一種適於大量生產高分子微特徵元件的一種製程，所以漸漸的顯現其在商業上之潛能，特別是在微流體/生醫以及微光學產品方面。圖一為典型微熱壓製程的堆疊方式。微熱壓成型之基本步驟為將高分子基材(如 PC 或 PMMA)置入成型機中（圖二為本校機械系之微熱壓成型機，型號:EVG 520HE），並將其加熱至玻璃轉移溫度（Tg）之上（加熱段）。然後藉由電腦數值控制（CNC）

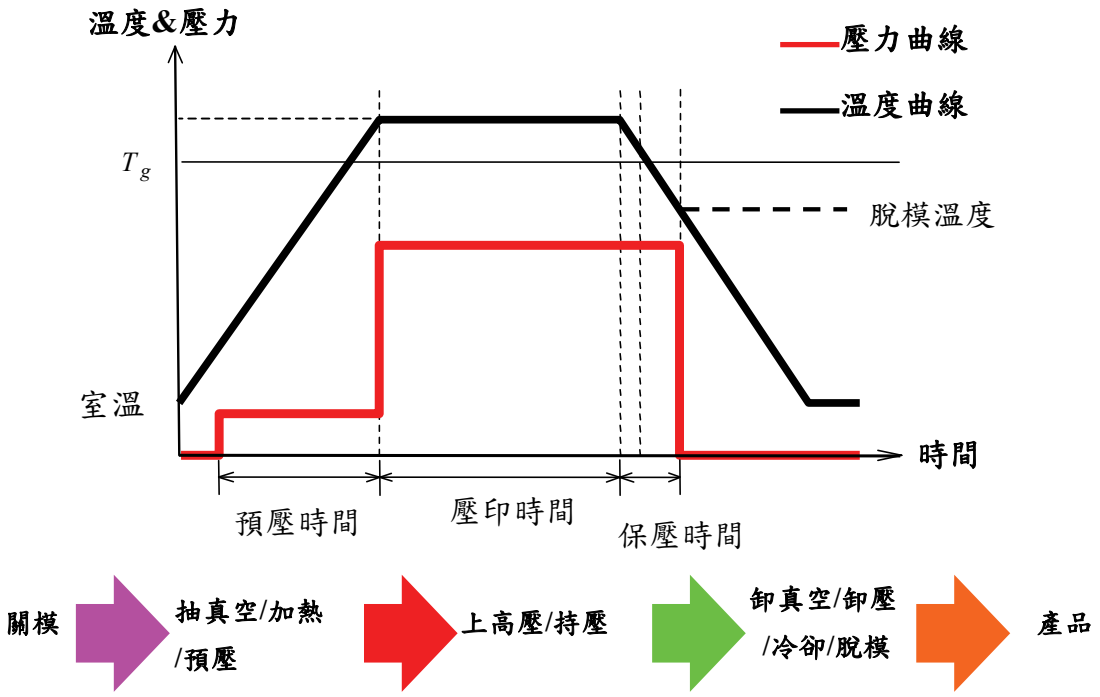
切削或深刻模造法（LIGA） 製程所製造具有微特徵之模具在真空室內壓於基材上，使模具上之圖案或微結構能完全轉印至高分子基板上而成型(Embossing)。最後，模具與基材接觸一段時間以後（持溫段），將此裝置降至玻璃轉移溫度以下（冷卻段），緊接著將高分子基材從模具中分離出來。除了上述溫度之外，在壓力設定方面，配合升溫加熱階段，會施加一定的預壓力，此階段為「預壓段」；待塑膠到達熱壓溫度時，給予一熱壓力，此階段為「加壓段」；當材料開始冷卻時，此時機器會持續保壓，是為「保壓段」，圖三為典型之微熱壓成型週期。一般而言，熱壓都必須維持工作區在真空中來進行熱壓步驟，以避免空氣殘留在微結構模穴中無法排出而造成成型缺陷。Heckele [14-15]詳細的說明微熱壓成型的特性與優點，指出使用微熱壓成型技術時因材料不需要流動長距離，所以溫度不高且熱循環小，因此減低冷卻時的翹曲及微結構表面與模仁的摩擦力，且可以成型較高深寬比與較脆弱的微結構而較不會產生殘留應力，適合光學產品，如導光板、微透鏡與生物晶片。文中亦指出微熱壓成型只需少量的融膠流動，因此特別適合以塑膠薄板為成型基材的微結構成型，並認為微熱壓製程簡單建立生產線容易，而雖然有些產品製程週期長，但認為有時是需要的，因週期較長時的冷卻速度會放慢，因此冷卻速率可以降低而減少殘留應力，再來則建議微熱壓製程要抽真空且模具要能承受熱循環與抽真空的吸力，並最好要設計逃氣孔讓空氣不會阻礙成型。然而，微熱壓成型在製程上某些地方的適用性也受到挑戰，因為讓高分子完全充填高深寬比微流道是非常困難，同時從模具中分離熱壓結構而不產生破壞亦是非常困難，所以轉寫正確性與相關參數間之關係是一相當複雜之議題。在本研究中，以紫外光深刻模造法（UV-LIGA）利用 UV 光照射於 SU-8 光阻上，然後再配合微電鑄技術來得到 Ni-Co 基生物晶片模版，作為微熱壓成型之模具使用。以 1 mm 厚之 PMMA 基材經熱壓後產生具有微特徵陣列之生物晶片裝置，而其中微流道之尺寸再以 3D 雷射顯微鏡來量測。針對作用力、熱壓溫度與熱壓時間等成型條件對微流道壓印成型的深度與寬度轉寫正確性作出一系列有系統研究。



圖一 微熱壓成型技術示意圖



圖二 本校(系)之熱壓成型機(型號 EVG 520HE)



圖三 微熱壓製程之成型週期

貳、微熱壓成型特性之力學機制理論分析

熱壓產品為 1mm 厚度之高分子圓板材，以圓柱座標（r,θ,z）為參考座標，並假設（1）熱壓成型過程中材料保持恆均溫；（2）圓板材為均質性、不可壓縮與厚度均勻之平板；（3）T>Tg 時，材料性質遵守指數律（Power Law）。則板材所受正向壓力 p 與模板處剪應力 τ_w 分別為[16]

$$p(r)=\frac{n+3}{n+1}\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^{n+1}\right]\cdot\frac{F}{A} \qquad (1)$$

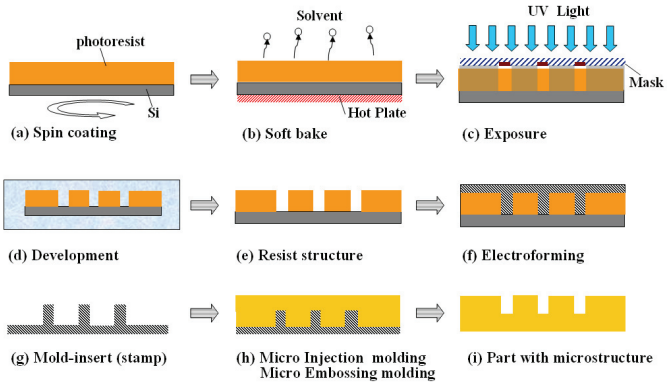
$$\tau_w(r)=\frac{n+3}{2}\cdot\frac{h}{R}\cdot\left[\frac{r}{R}\right]^{n}\cdot\frac{F}{A} \qquad (2)$$

其中 F 為壓印力(N)，R 為板材半徑，h 為板材厚度，n 為材料常數，通常小於 1。

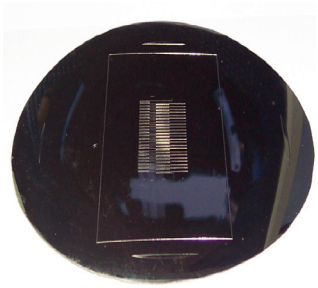
參、實驗方法

一、模版與材料

為成型具有微流道之生物晶片，以紫外光深刻模造法（UV-LIGA）利用 UV 光照射於 SU-8 光阻上，然後再配合微電鑄技術來得到 Ni-Co 基生物晶片模版(Stamp)。過程如圖四所示，而其步驟如下：(a)旋塗（Spin coating）一層厚約 30μm 之 SU-8 2035 光阻於 5 英吋之矽晶圓上；(b)將 SU-8 光阻於 95℃軟烤(Soft bake）以降低溶劑含量； (c) 以 UV 光照射覆蓋光罩之光阻；(d) 而將未曝光（Exposure）之光阻加以烘烤使其硬化；(e) 將被 UV-光曝光之光阻部份移除以形成具有微圖案之光阻結構；(f) 以 Ni-Co 合金電鑄（Electroforming）產生(g) 具微特徵陣列流道之模版（Stamp)，用於微熱壓之模版為直徑 5 英吋、厚度 0.2 mm （圖五）。基本上，在模版中之微流道尺寸約 30μm 深、50μm 寬且流道間距為 250μm。脫模角（Draft angle）約 4.9^{o} 到 6.7^{o}，可減少在脫模時模具與零件間因摩擦力或剪切力所造成之結構變形。在材料選用方面，由 Zencatec 公司生產具玻璃轉移溫度約 100℃，1 mm 厚之透明 PMMA 材料作為熱壓成型之基材。



圖四 具微特徵零件成型之過程



圖五 微熱壓用模版

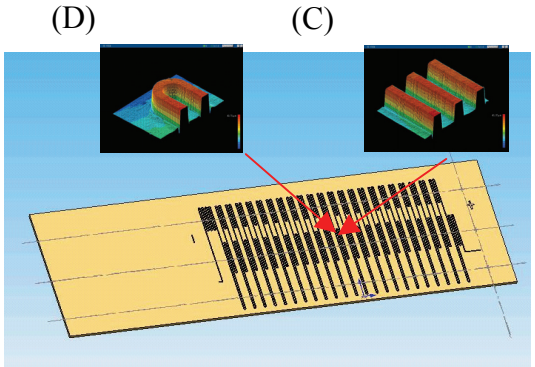
二、熱壓成型裝置

由奧地利 EVGroup 公司製造具有最大 45 kN 作用力容量與 550℃最高溫度之 EVG-520HE 微熱壓成型系統用於熱壓實驗。此系統真空度可低於 10^{-5} mbar 且完全自動與電腦控制製程；除此之外，上下 chucks 具有獨立控制溫度的能力。在熱壓開始之前，於加熱階段時一 500N 的預負荷先作用於基材上，以確保在熱壓階段時模版與高分子基材具有相同之溫度（即等溫熱壓）。在多次測試之後，基準之熱

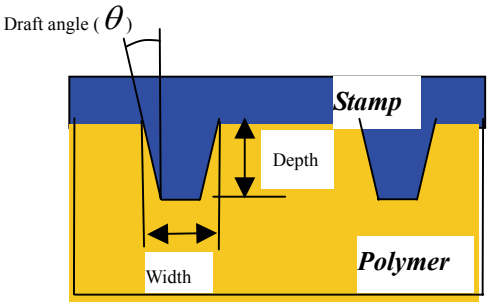
壓條件選用作用力為 21 kN（18 kN），熱壓溫度為 135℃（140℃），且熱壓時間為 6 分鐘。同時熱壓參數之熱壓溫度與作用力分別在 125、130、135、140 和 145℃與 12、15、18、21 和 24kN 改變。在熱壓之後，高分子基材仍置於腔體內等溫度降至 80℃以下時才予以脫模。所需之成型時間約在 25 至 35 分鐘之間。

三、微流道尺寸之量測

為評估成型品轉寫之正確性，針對模版選取二個不同位置（分別稱為(C)和(D)），如圖六所示，分別於位置(C)和(D)處微流道橫段面之 3D 雷射顯微影像圖。以 3D 雷射顯微鏡（最大倍率 16000 倍，日本 KEYENCE 公司）對微流道成型的深度（Depth）與寬度（Width）事先作一量測（圖七）。元件微熱壓成型脫模之後，微流道於(C)和(D)處轉寫之正確性亦作一量測並與模版尺寸作一比較。所量測微流道深度與寬度與模版之結果作比較可了解轉寫特性。每一位置量測 5 次並取平均值用以作為分析之用。



圖六 具微流道生物晶片裝置，
(C)和(D)為量測位置

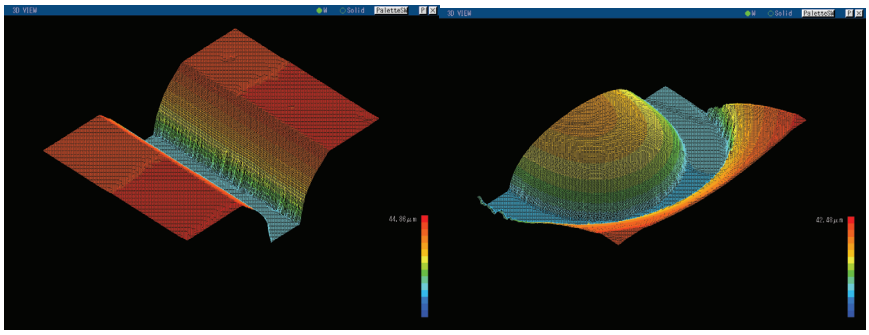


圖七 微流道之寬度、深度與脫模角

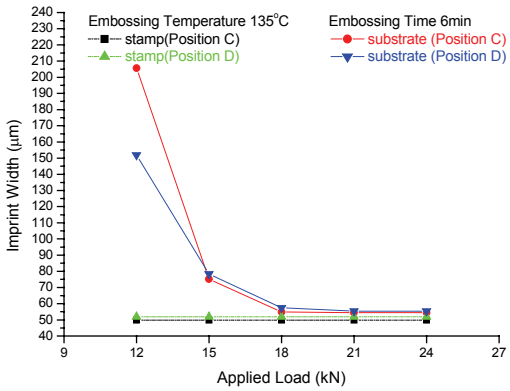
肆、結果與討論

當作用力不夠大時，高分子融膠無法大距離側向流動進入模穴中（如圖八），因此微流道壓印寬度將大於模版之寬度。圖九為固定料溫 135℃和 6 分鐘之熱壓時間情況下，熱壓作用力對微流道寬度之影響。隨著作用力之增加，壓印寬度逐漸降低，當作用力達到一臨界值 21kN 時，C 點與 D 點位置之壓印寬度皆接近模版微流道寬度（49.812μm & 51.851μm）之尺寸且誤差分別為 9.36%與 6.82%。圖十為料溫 140℃、壓印作用力 18 kN 時，C 點與 D 點位置之壓印寬度誤差分別為 9.36%

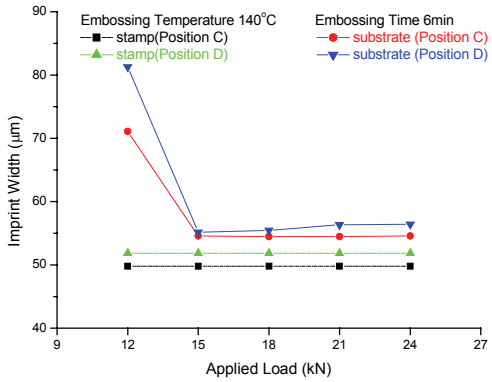
與 6.92%；當壓印作用力超過 21kN 時，隨著作用力之增加，壓印寬度誤差反而逐漸增加；當作用力 24kN 時，C 點與 D 點位置之壓印寬度誤差分別為 9.55%與 8.81%。壓印寬度誤差逐漸增加的原因是高溫時融膠的流動性增加而凸顯壓力梯度效應，印證如式（1）與式（2）所描述，圓板壓應力以工件中心點為對稱向外遞減，因此融膠會沿徑向向工件邊緣流動，造成剪應力沿徑向向外遞增。



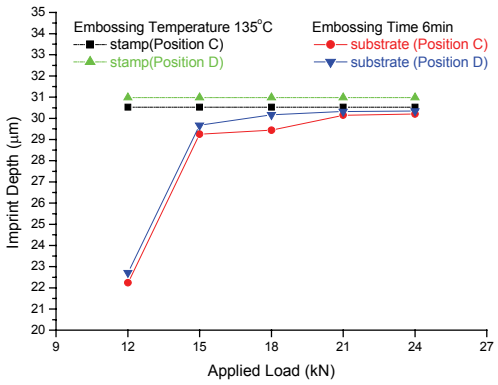
圖八 135℃/6 分鐘/12kN 之 C 位置與 D 位置之 3D 雷射顯微影像圖



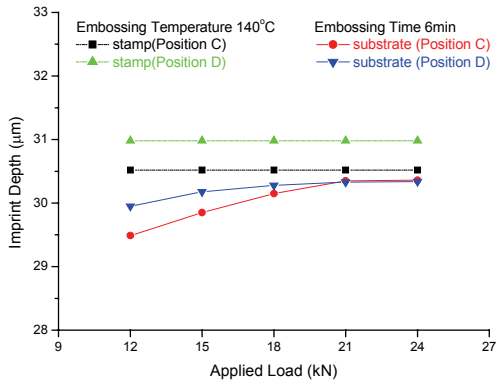
圖九 熱壓作用力對微流道壓印寬度之影響（一）



圖十 熱壓作用力對微流道壓印寬度之影響（二）



圖十一 作用力對微流道壓印深度之影響（一）

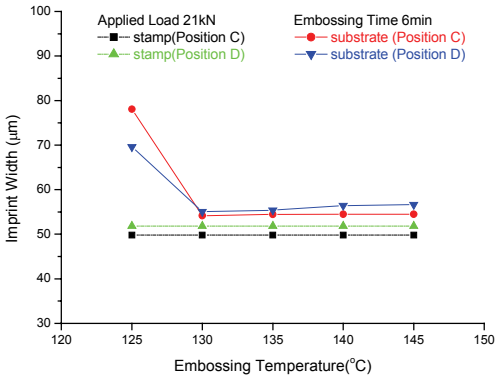


圖十二 作用力對微流道壓印深度之影響（二）

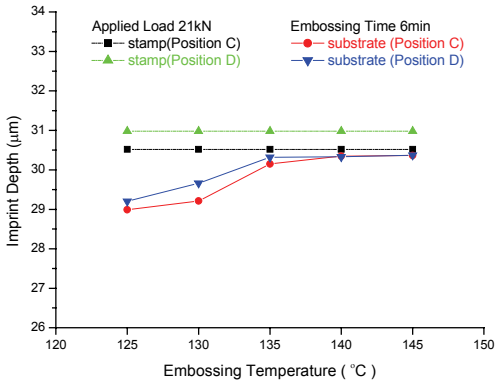
圖十一（圖十二）為在不同量測位置處之壓印深度隨作用力的變化情形，很明顯的較高之作用壓力將導致較高之轉寫正確性，同時由圖中可看出壓印深度可隨作用力增加而漸漸達到一飽和值。此飽和值在熱壓溫度為 135℃（140℃）且作用力為 21kN（18kN）時，在 C 與 D 不同量測位置可達到僅約略低於模版微流道之深度(30.52μm 與 30.98μm) 0.37μm（0.37μm）與 0.66μm（0.70μm） (誤差百分比分別為-1.21%（-1.21%） 與 -2.13%（-2.26%）)，非常接近模版微流道之深度。這其中亦可清楚看出當熱壓溫度為 135℃（140℃）、作用力為 15kN 時，於 C 與 D 不同量測位置高分子基材上流道之深度與模版之誤差約-4.16%(-2.20%)與 -4.23%（-2.58%）；而當作用力為 21kN 和 24kN 時，在 C 與 D 不同量測位置的深度誤差分別可降至僅-1.15% （-0.52%）與 -2.03%（-1.71%）左右。同時由圖九至圖十二可發現熱壓作用力對於零件之成型扮演一決定性之角色，但當作用力高於一臨界值時，則其影響漸漸變小。由實驗中可知為複製微圖案於 135℃（140℃）之 PMMA 高分子基材上，作用力必須高於 21kN（18kN）以上。不過在溫度 135℃、作用力 24kN 時，壓印深度誤差雖降低少許，但整片板片厚度有變薄現象。

從實驗過程中，發現熱壓溫度不夠高時，因 PMMA 高分子材料軟化程度不足，以至壓印時無法貼合模版而造成壓印寬度太大的情形（情形類似如圖八）；熱壓溫度對轉寫品質之研究亦於作用力固定在 21kN 時作一探討，圖十二顯示壓印寬度在不同位置處之正確性。其轉寫正確性隨溫度增加而增加，但在溫度高於 135℃（C 與 D 量測位置的轉寫誤差約 9.36%與 6.81%）時，D 量測位置轉寫誤差卻明顯越來越大（壓印溫度 145℃時，C 與 D 量測位置的轉寫誤差約 9.38% & 9.23%），造成此一現象原因亦如式（1）與式（2）所描述。探究壓印寬度誤差無法由製程參數再降低的最大原因，乃因 Ni-Co 模版與 PMMA 高分子之膨脹係數分別約為 1.28×10^{-5}/℃（20℃）與 5.5×10^{-4}/℃（120℃）；高溫時模版與材料熱脹，熱壓印成型保壓結束時溫度約 100℃，卻必須在室溫量測其轉寫正確性，因收縮量而造成成型誤差。而熱壓溫度對壓印深度之影響顯示於圖十三，其轉寫正確性隨熱壓溫度增加而上昇，其原因歸於黏度的下降，在高熱壓溫度時融膠可較容易流動而完全成型微特徵流道。在 21 kN 固定作用力下，當壓印溫度達 135℃（C 與 D 量測位置的轉寫誤差約-1.21% & -2.13%）或更高時，則可達到足夠之流道深度。雖然增加熱壓溫度可提高深度轉寫正確性，然而成型週期時間（包括保壓時間）會快速增加，同時融膠流動性增加而凸顯壓力梯度分布的效應，以致於在 D 位置微流道彎道處可觀察因溫度增加造成壓印寬度誤差有逐漸增加的情形，同時成品整體厚度有變薄的趨勢產生。另外，值得一提的是在熱壓成型時，可觀察到直線型的微流

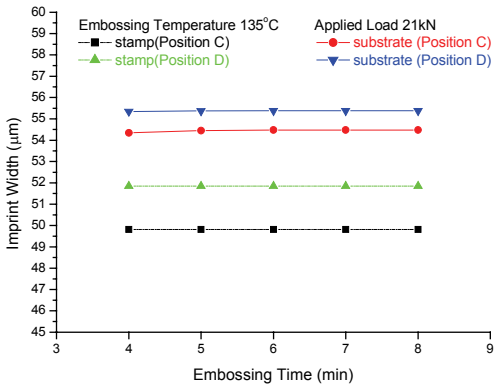
道因受圓板壓應力梯度分布影響較圓弧型微流道小，因此成型轉寫性較容易控制。



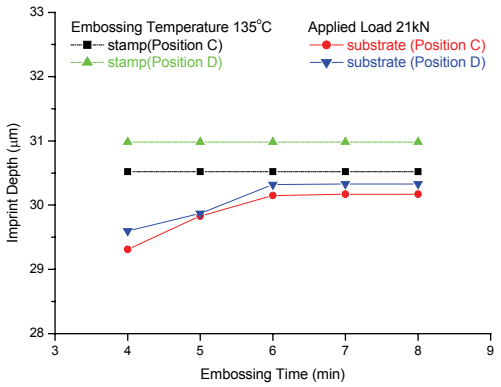
圖十二 熱壓溫度對微流道壓印寬度之影響



圖十三 熱壓溫度對微流道壓印深度之影響



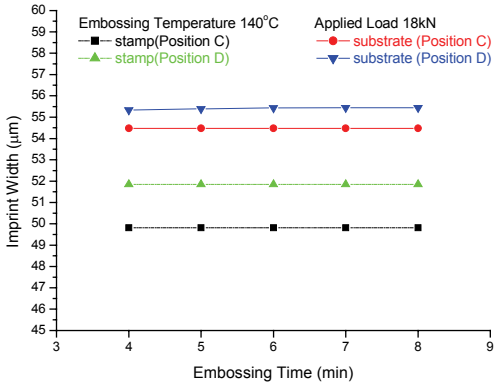
圖十四 熱壓時間對微流道壓印寬度之影響（一）

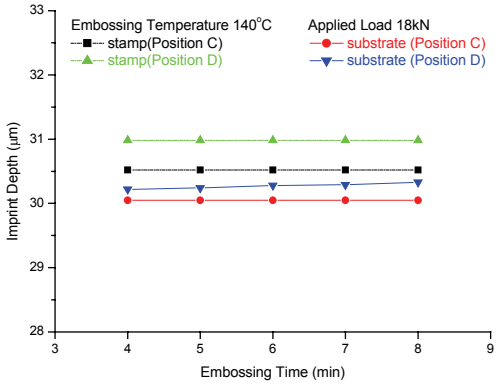


圖十五 熱壓時間對微流道壓印深度之影響（一）

圖十四與圖十五分別為在作用力 21kN 和料溫 135℃條件下，熱壓時間對於壓印寬度與壓印深度在不同位置處之影響。由圖中可明顯看出微結構在 C 與 D 點量測位置的壓印寬度受壓印時間影響較小，C 與 D 點量測位置壓印寬度誤差最大誤差分別為 9.36%與 6.92%。C 與 D 點量測位置壓印深度轉寫正確性，則皆隨時間增加而增加，C 點量測位置壓印深度的誤差由-3.96% 降至-1.15%，D 點量測位置壓印深度的誤差由-4.45%降至-2.10%，從數據結果可發現壓印時間到達六分鐘以上，壓印深度的正確性達到飽和值。圖十六與圖十七分別為在作用力 18kN 和料溫 140℃條件下，熱壓時間對於壓印寬度與壓印深度在不同位置處之影響。由圖十六與圖十七中可明顯看出微結構在作用力 18kN 和料溫 140℃條件下，C 與 D 點量測位置的壓印寬度與壓印深度受壓印時間影響不明顯，C 與 D 點量測位置壓印寬度（深度）誤差最大誤分別為 9.36%（-1.21%）與 6.93%（-2.45%）。從圖十四至圖十七可觀察得知相較於作用力 18kN 和料溫 140℃的熱壓條件，作用力 21kN 和料溫

135℃熱壓製程條件下的融膠需較長的時間使融膠流動來貼合模具而成型。





圖十六 熱壓時間對微流道壓印寬度之影響(二)　圖十七 熱壓時間對微流道壓印深度之影響(二)

由上述得知適切的增加熱壓溫度和作用力雖然可以有效的幫助融膠充填小空穴，然而，在熱壓溫度、作用力、成型週期時間與轉寫正確性之間取得一平衡點是必須加以考慮。基本上，當考慮成型週期時間時，135 ℃之熱壓溫度、21kN 至 24kN 作用力與 140 ℃之熱壓溫度、15kN 至 18 kN 作用力的製程條件皆能達到可接受之結果。當作用力與熱壓溫度分別選用 21 kN 及 135℃與 6 分鐘之熱壓時間時，可達到最佳之轉寫結果（如表一）。

表一　熱壓成型在 135℃、21kN 和 6mins 成型條件下，成品與模版之微流道幾何尺寸

		模版 (μm)	微熱壓	
			成品 (μm)	誤差 (%)
位置 (C)	寬度	49.81	54.47	+9.36
	深度	30.52	30.15	-1.21
位置 (D)	寬度	51.85	55.39	+6.83
	深度	30.98	30.32	-2.13

伍、結論

本研究中，利用 Ni-Co 基模版以微熱壓成型方式來對運用於生醫檢測用之微特徵元件之成型作一探討。不同成型條件對微特徵轉寫正確性包括寬度與深度，以 3D 顯微鏡量測作分析與探討，微流道量測結果並與模版之尺寸作一比較。針對生物晶片中微流道轉寫之正確性，由量測與觀察結果，可得到如下之結論：

1. 在熱壓成型中，熱壓作用力與熱壓溫度二者皆會明顯影響微特徵轉寫之正確性；選用可成型的較低熱壓溫度，可藉由增加熱壓作用力以增加微特徵轉寫的

正確性；若選用可成型的較高熱壓溫度，則可使用相對較低的熱壓作用力來達到微特徵轉寫的正確性，且作用力超過某一極限值後，因壓力梯度效應反而會降低微特徵轉寫的正確性。

2. 壓印深度隨作用力增加而增加，達到臨界值後（21kN）影響變小，C 與 D 量測位置的深度略小於模版微流道深度（30.52μm 和 30.98μm）-1.21%與-2.13%（135℃、6mins 和 21kN）。壓印深度亦隨壓印溫度增加而達到飽和值（140℃、6mins 和 21kN），C 與 D 量測位置的深度略低於模版微流道深度-0.56%與-2.10%。
3. 在 135℃和 6mins 成型條件下，成品與模版之微流道幾何尺寸 C 與 D 量測點，壓印寬度之正確性會隨作用力增加而增加，並於達到極限值 21kN 時，誤差值約 9.36%與 6.82%。在 140℃和 6mins 成型條件下，同時在可成型條件下，在 D 量測點最初壓印寬度之正確性亦會隨作用力增加而增加（作用力 15kN 時，誤差 6.36%）；但當作用力超過 21kN 時，因作用壓力梯度影響，誤差值又會增加（作用力 24kN 時，誤差 8.81%）。
4. 在作用力 21kN 可成型條件下於 C 與 D 量測點，最初壓印寬度之正確性會隨壓印溫度增加而增加（130℃時，誤差為 8.77%和 6.18%）；當溫度超過 140℃時，因融膠黏度降低，流動性增加與壓應力梯度的加成影響，壓印寬度的誤差值又增加（壓印溫度 145℃時，誤差 9.38%和 9.23%）。這也是選擇壓印溫度參數時，對轉寫正確性的影響必須詳加考慮之處。
5. 從實驗結果得知，當熱壓印時間為 6 分鐘時，135 ℃之熱壓溫度、21kN 至 24 kN 作用力與 140 ℃之熱壓溫度、15kN 至 18 kN 作用力的製程條件皆能達到寬度壓印誤差小於 6.81%的可接受結果。

陸、參考文獻

1. P. S. Anton, R. Silberglitt, and J. Schneider, The Global Technology Revolution, National Defense Research Institute, Santa Monica, USA. (2001).
2. R. W. Siegel, E. Hu, and M. C. Roco, Nanostructure Science and Technology, a Worldwide Study, National Science and Technology Council, USA. (1999).
3. R. M. Mcormick, R. J. Nelson, M. G. Alonso, and D. J. Benvegnu, Anal. Chem., Vol.69, p.2626 (1997).
4. M. J. Madou, Fundamentals of Micro fabrication, 2nd Ed., CRC Press, New York, (2002).

5. T. Hanemann, M. Heckele and Piotter, Polymer New, Vol.25, pp.224-229 (2000).
6. D. C. Duffy, M. C. Donald, J. C. Schueller and G. M. Whitesides, Anal. Chem., Vol.70, p.4974 (1998).
7. M. T. Gale, Micro-Optics Elements, system and Applications, p.169 (1997).
8. M. U. Kopp, H. J. Crabtree and A. Manz, Current Opinion in Chem. Biol., Vol 1, p. 410 (1997).
9. J. Narasimhan and I. Papautsky, "Polymer embossing tools for rapid prototyping of plastic micro-fluidic devices, " Journal of Micromechanics and Micro-engineering, Vol.14, pp.96-103 (2004).
10. H. Schift, C. David, M. Gabriel, J. Gobrecht, L.J. Heyderman, W. Kaiser, S. Köppel and L.Scandella, "Nanoreplication in polymers using hot embossing and injection molding", Micro and Nano engineering MNE'99, Rome, Italy, Sept. 22-24, to be published in Microelectronic Engineering. (2000).
11. H. Schift, R.W. Jaszewski, C. David and J. Gobrecht, "Nano-structuring of polymers and fabrication of interdigitated electrodes by hot embossing lithography", Microelectronic Engineering, Vol.46, pp.121-124 (1999).
12. R. W. Jaszewski, H. Schift, B. Schnyder, A. Schneuwly and P. Gröning "The deposition on anti-adhesive ultra-thin Teflon-like films and their interaction with polymers during hot embossing", Applied Surface Science, Vol.143, pp.301-308 (1999).
13. R. W. Jaszewski, H. Schift, J. Gobrecht and P. Smith, "Hot embossing in polymers as a direct way to pattern resist ", Microelectronic Engineering 41/42, pp.575-578 (1998).
14. M. Heckele and W.K. Schomburg, "Review on micro molding of thermoplastic polymers," Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.14, pp.R1-R14 (2004).
15. M. Heckele, "Hot embossing - A flexible and successful replication technology for polymer MEMS," Proceedings of SPIE on Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems II, Vol.5345, pp.108-117 (2004).
16. C. R. Lin, R. H. Chen and C. Hung, "Preventing Non-Uniform Shrinkage in Open-Die Hot embossing of PMMA Microstructure", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 140, pp.173-178 (2003).