高分子薄板之微熱壓成型的模擬分析

林明俊 機械系

摘要

本計劃運用有限元素法的理論來模擬分析高分子材料在熱壓過程中的成型行為。研究中,針對PMMA板材進行相關的材料實驗以獲得其流變特性,進而建立材料資料庫與 而後以建立之材料資料庫與有限元素分析模型進行PMMA微流道之熱壓模擬。模擬時採 用可同時考慮作用力及溫度效應的非線性黏彈性有限元素軟體LS-DYNA,有效地模擬出 在熱壓過程中高分子材料的流動情形以及建立以壓印溫度及壓印作用力為參數的成型視 窗。研究結果證實,此有限元素模組能準確的模擬PMMA以熱壓製程成型微流道結構時 的行為。本研究除了探討高分子熱壓製程且歸納出其關鍵參數的影響特性外,也建立了 橡膠態高分子的材料特性蒐集實驗方式及有限元素應用於微流道熱壓印行為的模式,相 關研究成果將可運用於其他工作溫度高於玻璃轉移溫度的高分子材料與製程。

關鍵字:有限元素法,非線性黏彈性,玻璃轉移溫度

Abstract

This study adopted the finite element method (FEM) to analyze the molding behaviors of polymer PMMA. During the research procedures, a series of material property experiments are performed to determine the rheological characteristics of PMMA. The finite element material database is built using material properties from experiments. Subsequently, a simulation model of PMMA hot embossed micro-channels is constructed. The proposed simulation model is used to predict the applied embossing forces in various temperatures on the products. The nonlinear viscoelastic material model which depends on working pressure and temperature incorporated into FEM code LS-DYNA, and successfully simulated the flow situation of PMMA and the optimal molding window taking applied force and embossing temperature as parameters in hot embossing process. The results verify the FEM module that can accurately simulate the deformation behaviors of micro-channels structure in hot embossing process. This study besides sums up influence of key parameters in hot embossing process for the fabrication of micro-channels within a polymer substrate, the experimental methods for collecting the material characteristics of semi-molten polymers and the finite element material model established in this study also can be applied in any processes involving working temperatures exceeding glass transition temperature.

Keywords: Finite Element, Nonlinear Viscoelastic, Glass Transition Temperature

壹、 前言

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。同時,已有許多具微 特徵之模仁,包括微透鏡、微溝槽等[1]報導出來。微熱壓成型之基本步驟為將高分子基 材(如PMMA)置入成型機中,並將其加熱至玻璃轉移溫度之上(加熱段)。然後藉由CNC 切削或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」,圖一為典型 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。至於熱壓壓力的大小、熱壓溫度 的高低以及熱壓時間的長短,則需視微結構的尺度大小和深寬比,以及塑膠材料的種類 而定。通常微結構越細所需的壓力越大,深寬比越大則需要的熱壓時間就越長。在冷卻 過程中,保壓力量的大小和變化狀況會影響塑膠材料的收縮(shrinkage)特性,對於微結構 成型品是否會產生缺陷以及尺寸精度的控制至為重要。微熱壓之技術重點在於因受熱軟 化而與模具接觸配合而成型、製造成型循環的過程中加熱必須均勻、成型壓力要求高, 速度控制、冷卻系統搭配要求均勻性,以防止翹曲變形而產生結構上破壞。大面積微結 構轉寫則以微熱壓成型方式製作最具優勢,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。

相較於射出成型技術,微熱壓成型法在微結構轉寫上顯得較有一些成型上的優勢, 微熱壓成型具有相對操作簡單與對微小特徵具有高度正確轉寫性。同時在微熱壓中,高 分子材料從基材進入微結構中僅流動非常小之距離,因此導入之殘留應力較小。另外, 微熱壓中高分子之成型溫度週期較小,因此可降低冷卻過程中之收縮。所以以微熱壓成 型技術製作塑膠微結構等許多相關技術及應用相繼的被發表出來[2-5]。Heckele [6-7]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流動距離短,所以較不 會產生殘留應力而適合光學產品,如導光板、微透鏡與生物晶片,且因為材料不需要流 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,所以微熱壓成型可以成型較高深寬比與較脆弱的微結構。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。

98-508

對微熱壓成型而言,現已證明尺寸小到6nm之洞皆可被轉寫(replication)出,但隨 著結構愈小,模仁(stamp)幾何造型愈趨複雜,瞭解在鑄模成型與脫膜間的高分子材料 流動行為也愈趨重要,高分子材料在模穴中的流動,如圖二所示。當高分子材料被模仁 與基材擠壓時,將承受一擠壓流,先從邊緣沿著中心移動並逐漸填滿結構,填充過程中, 高分子如同經歷一大剪應力被擠入模穴 [8]。不同模仁結構會有不同的充填效果,如模仁 為類之光柵週期性結構,空隙的填充會受限於結構密度或是結構間的距離的影響,如圖 三(a)的距離S1所限制。若為一大面積且少數有圖案之區域,這時材料流動多由邊緣為主, 在中間的空隙部分的擠壓流可以忽略,此壓印過程中之有效壓力區域會落在圖案結構之 邊緣與模仁之邊界,如圖三(b)距離S2所示。

由於壓印過程的充填狀況目前無法直接量測或觀察,所以僅能就壓印完成後的形狀 作探討,因此很難從實驗得到能讓模穴恰好完全充填的最佳製程參數(溫度與作用力)。 以作用力而言,過大的壓力在冷卻過程中,將使模具邊緣產生應力集中,造成材料破壞 [9];但壓力太小又會因拘束不足而使轉印效果變差。

在有限元素分析中,對於材料性質的描述將是分析準確與否的重要關鍵,而關於高 分子材料機械性質之理論分析早在1940年就已開始進行材料本質方程的研究,其中以橡 膠彈性理論最受注目。橡膠類高分子材料之彈性效應,是由於分子問之作用力及分子鏈 間之糾纏(Entanglement)所造成,所以可以產生極大的變形,且展現非線性彈性效應。1958 年Treloar[10]學者首先依據高斯統計學原理,配合高分子鏈的特性,導出Neo-Hookean應 變能函數。並以簡單拉伸、剪切應變及雙軸拉伸試驗求得材料之應力應變關係,實驗結 果當材料主應變軸之伸張比小於2.2時,該函數可以精確的描述高分子的非線性彈性行 為,同時也奠定以應變能函數描述高分子材料機械性質的基礎。Mooney[11]及Rivlin[12] 等學者在1940-1950年期間以Cauchy應變張量的第一與第二不變量表示成Mooney-Rivlin 型式通式,為一恆溫,不可壓縮,均質性材料。由於以Cauchy應變張量的第一與第二不 變量表示之應變能函數的參數無法由實驗數據直接得到,所以Ogden[13]學者在1972年提 出以應變主軸拉伸比指數型式建立應變能函數來描述SBR材料。並與Treloar的實驗作比 較,當材料在等雙軸拉伸之伸張比7的範圍內皆可適用。Maerker[14]等學者在1974年實驗 發現黏彈性流體在雙向拉伸之流變行為中,當材料變形速率夠快時,流體之應力成長效 應較應力鬆弛為大,此時黏性效應可忽略。此研究解釋,以橡膠彈性理論的應變能函數 去描述具有黏彈性的高分子之變形所引起的質疑。簡單的說熱壓成型時由於材料變形的 速率夠快,使得黏性效應的影響不大而可以忽略。Yoshihilko Hirai [15]等人在2001年提出 利用橡膠彈性體來模擬高分子在奈米微熱壓期間的變形。透過模擬與實驗得到不同壓 力、不同模仁深寬比、不同高分子初始膜厚,在經過熱壓後所產生的充填率、剩餘膜厚。 所以該方法是可以做為調整製程參數很好的依據。Yoshihiko Hirai [9]等人在2003年運用電 腦模擬證明奈米壓印過程高分子的破壞主要是由於(a)冷卻過程過大的壓力將使模仁轉角 處產生應力集中,造成材料破壞。(b)模仁與高分子熱膨脹係數不同,當降溫速度過快時 在模具側邊造成的應變集中將使高分子破壞。故建議在冷卻與脫模的過程讓冷卻速度放 慢,當溫度低於Tg瞬間便將壓力釋放。如此不但可避免高分子破壞的問題,更可成功壓

98-509

印出狹長的微結構。C.R. Lin 等人[16]在2002年提出以電腦模擬微熱壓成型過程壓力分佈 與時間的關係,並證明PMMA在半熔融態下於熱壓時存在非線性彈性的性質。首先運用 大應變、不可壓縮與非線性的HYPERELASTIC指令模擬壓力由零至設定值這段靜態、加 壓期間PMMA的變形行為。隨後以VISCOELASTIC指令模擬PMMA在保壓期間壓力分佈 與時間的關係,並以實驗驗證。Y. J. Juang[17]等人在2002年提出以流變學的角度模擬高 分子半、熔融狀態下的材料特性,並與實驗相驗證得到Non-isothermal的熱壓方式可以得 到比isothermal的方式更佳的轉印效果。其中Non-isothermal的熱壓方式像以200℃高溫的 模具壓入25℃的高分子內,由於高溫的模具將使接觸到的高分子因加溫而軟化,同時加 壓的結果,將使高分子沿模穴邊流入。而Isothermal的熱壓方式像以140℃的模具壓入同 為140℃的高分子。此方式將使高分子與模具邊緣間存在些許空隙,特別是在棋穴裡的轉 角處,所以轉印效果較差。

因此本計劃先進行高分子材料的流變性質試驗,包括完成厚度1mmPMMA板材之各 種溫度下的壓縮應力-應變試驗、應力鬆弛試驗、潛變試驗與比熱係數量測,並完成PMMA 板材的熱傳導係數量測、建立DMA黏度係數曲線與鎳鈷電鑄板模具之膨脹係數曲線。並 採用可同時考慮作用力及溫度效應的非線性黏彈性有限元素軟體LS-DYNA,構建適當的 有限元素法分析模組,將所進行的高分子材料性質曲線與流變特性結果歸納分析並建立 成模擬軟體的資料庫;再由高分子材料的流變性質曲線推論熱壓材料成型之溫度範圍, 並以溫度為微熱壓成型技術的參數模組來進行電腦模擬分析,探討在不同溫度下,不同 壓印寬度、模穴數目與間距距離的模仁結構所壓印後的充填狀況與複寫成效,並推論其 成型作用力。最後並與透過微熱壓成型實驗得到的成品複寫性,與模擬分析結果做比對 後進一步得到高分子欲完全充填所需的最佳微熱壓成型參數與熱壓過程中高分子充填的 流動行為。經由本研究的進行,將能建立一套有系統的電腦輔助分析方法,可正確獲得 建議的最佳成型參數,如此即可有效的減少實驗的次數,並可利用實驗進一步改善轉印 效果,對成本經濟與產品品質的考量,都有很大的助益。本計劃研究流程如圖四。

貳、 材料性質試驗

一. 實驗材料

PMMA又稱壓克力樹脂,在本論文中所使用的PMMA材料為Zencatec 公司所生產,厚度2mm,熱變形溫度約100 $^{\circ}$,熱膨脹係數6.0×10⁻⁵cm/cm $^{\circ}$ 。

二. 材料性質試驗

2.1 PMMA圓形板材壓縮試驗

本試驗利用MTS810拉伸試驗機進行各種溫度下PMMA圓板材料壓縮試驗,以取得相關的應力應變曲線圖,如圖五。試驗中試片(specimen)規格直徑70mm、壓縮位移速度 1mm/min、壓縮位移1.1mm與試驗溫度範圍是50至160℃。各溫度下的應力應變曲線在50 ℃~130℃下顯示類似趨勢,皆隨著溫度增加而材料彈性模數(modulus)隨之降低;當溫度 高於140℃的應力應變曲線,其材料彈性模數隨著溫度增加而降低的趨勢更為明顯。

2.2 PMMA圓形板材鬆弛 (relaxation) 試驗與潛變 (creep) 試驗

高分子材料容易產生潛變(creep),尤其是在高溫情況下此現象尤為顯著。為了獲得 熱壓成型過程中,時間與溫度參數的影響,於是先將試片加熱至試驗溫度,然後將應變 量(strain)值固定來測量應力(stress)隨時間改變的應力鬆弛試驗與將應力值固定來測 量應變隨時間改變的潛變試驗。

本研究利用MTS810材料拉伸試驗機與複式加溫爐進行初始力(initial force)為 15kN、20kN與25kN在100℃~150℃各種溫度下的PMMA圓板材料之應力鬆弛試驗;以及 固定力25kN在100℃~150℃各種溫度下的PMMA圓板材料之潛變試驗,相關試片規格直 徑70mm、壓縮位移速度1mm/min、鬆弛應變範圍10.1%至20.4%與鬆弛時間360秒及潛變 應變範圍14.2%至49.8%與潛變時間600秒。

由圖六可得到材料應力在各初始力試驗條件下變化的趨勢類似,在溫度100℃條件 下,因PMMA試片接近固體材料,因此應力鬆弛與潛變的情形變化輕微;隨著溫度升高, 應力鬆弛情形愈明顯,當溫度高於140℃條件以後,應力鬆弛的情況尤為明顯,在試驗開 始作用的前50秒,應力鬆弛非常的快速且隨著作用力增加應力鬆弛的變化愈大。圖七顯 示潛變試驗與應力鬆弛試驗類似的情形。彈性模數在溫度高於140℃條件下,衰減的情況 尤為明顯,在150℃時,開始作用的前100秒,彈性模數數值衰減快速。

從以上應力鬆弛試驗與潛變試驗得知在PMMA壓印過程中,溫度、作用力量與時間 是影響製程的三大參數,在試驗作用的前300秒,變化非常明顯,因此不能忽略潛變效應 與應力鬆弛效應對製程之影響。

2.3 PMMA圓形板材DMA(Dynamic Mechanical Analyzer)試驗

動態機械測試在於量測材料受正弦或其它周期性應力時之變形(deformation)。在這 測試中,決定材料之動態模數(dynamic modulus)和損耗模數(loss modulus)、機械阻尼 (mechanical damping)或內部摩擦(internal friction)。模數指示材料之勁度(stiffness),它可 能是剪力、拉伸或彎曲模數,全視實驗儀器而定。而機械阻尼(內部摩擦)則顯示材料在變 形過程中所散失能量之多寡。

本試驗使用Perkin Elmer DMA 7e,測試振幅固定在5 μm、溫度範圍32℃~200℃、升 溫速度5℃/min與頻率1 Hz 下測試,記錄並分析相關資料。由圖八得知PMMA約102℃ 時,出現動態模數E'急遽降低變化的轉折點,是為玻璃轉化溫度Tg點,意味其勁度 (stiffness)在Tg點有快速減少的變化。在113.7℃時,出現內部摩擦tan δ= E"/E'=1,顯示 材料在此溫度已有顯著變形存在,隨後溫度增加而內部摩擦tan δ大於1,當溫度高於約140 ℃後,tan δ略大於1且趨於穩定,儲存於PMMA變形的彈性能量低於變形轉換成熱能散失 的能量,對熱壓印製程而言,是良好的壓印溫度。

2.4 PMMA圓形板材比熱係數

比熱係數是使用Perkin Elmer Pyris 1 DSC (differential scanning calorimetry, DSC)測 量。內通氮氣在30℃持溫3分鐘,再從30℃以10℃/min 的速率升溫至300℃,最後在300 ℃持溫3分鐘。量測結果如圖九,溫度量測範圍從31.01℃至197.8℃,比熱值在120℃至150 ℃之間約2J/g℃。

2.5 PMMA熱傳導係數

熱傳導係數分析儀係提供材料樣品在一個固定功率的熱源條件下,量測樣品將熱源 傳導出去的能力。當物體和外界的溫度不一致時,就會產生熱轉換的情形,熱量的傳播 方式主要包括傳導(conduction)、對流(convection)及輻射(radiation)。當物質的兩端存在於 不同溫度下時,平均熱能會由高溫傳向低溫,熱傳導速率的計算如下所示:

熱傳導速率
$$dQ/dt = K \bullet A(T_H - T_I)/d$$
 (2.1)

$$Q$$
:熱能(J) A :截面積(m²)

t:時間(s)
$$T_H - T_L$$
:溫度差 (°C)

K:熱傳導係數(W/m℃) d:物質厚度(m)

熱傳導係數是使用HOT DISK TPS2500測量瞬間態,量測結果熱傳導係數約0.3858 W/mK (25℃)。

2.6 模具Ni-Co材料線膨脹係數試驗

一般而言,塑膠材料之熱應變約為金屬材料的5至12倍,因此在設計成型模具時,必 須考慮到塑膠與模具由成型溫度降至常溫因冷卻收縮不同比率而產生之寬裕量。本試驗 使用Perkin Elmer DMA 7e,測試靜力值(static force)10mN、溫度範圍由34.62℃至200.28 ℃,頻率1 Hz 下測試,量測結果如圖十,Ni-Co材料線膨脹係數約1.2×10⁻⁵/℃。

三. 微流道熱壓印模擬分析

本計劃以PMMA圓型板材的微流道熱壓印製程為模擬分析對象,探討在壓印過程中 融膠充填模具的流動狀態,並配合本研究試驗所建立的材料性質資料庫,來求各壓印溫 度下所需的壓印作用力數值及觀察熱壓印過程中,熔膠充填模穴之情形;並由熱壓印實 驗獲得的數據,驗證分析模型的正確性。由於實際的壓印過程無法直接觀察或量測融膠 的充填狀況,因此利用模擬方式能夠對熱壓製程有更深入的了解,也可對於熱壓製程中 的模具設計與製程參數之改善提供正確的方向。

3.1 導論

微流道熱壓印成型是以模仁(stamp)在溫度高於玻璃轉換溫度(Glass transition temperature, Tg)下,施以高壓將軟化的高分子材料壓入模穴中。微流道熱壓印在模擬分析上目前存在許多困難,敘述如下:

- 微觀力學理論方面的發展尚未成熟,目前市售的工程分析軟體的運算邏輯皆有網格 須在1µm尺寸以上的限制。
- 2. 對整個微流道壓印的模型做模擬分析時,網格若切割的過疏(大於5µm),易產生網 格穿透之情形;網格切的愈細,雖可提升運算之精確度,卻也因此佔用更多的記憶 體而耗用較多的運算時間,除了無法達到藉由模擬分析的結果來輔助熱壓印製程的 目的外,甚至會超過一般電腦及工作站的負荷,造成無法收歛的情形。
- 目前國內外的文獻幾乎皆採用常溫下測試的材料性質對熱壓製程做模擬分析。然而 對微流道熱壓印製程而言,壓印不是在室溫下進行,因此須先取得壓印溫度下的材 料性質資料庫來進行模擬分析。

對熱壓印製程的有限元素分析而言,如此應變大的材料變形,網格的品質是很重要 的課題。因此在分析之規劃上,將模型之材料性質、元素種類、邊界條件等,進行與實 際試驗條件相符之設定,並將模型細部做適度與合理之簡化,將有助計算效率之提升。 基於以上的考量,本文選用非線性運算能力強的LS DYNA工程應用軟體,並藉由前述之 材料試驗所得到的PMMA圓板材料壓縮應力應變性質建立資料庫,由Hypermesh軟體構建 分析模型並細分其網格,完成邊界設定且產生Input File(*.k或*.dyn),然後再由LSDYNA 求解器(solver)運算,最後由LS_PREPOST讀取輸出之ACII文字結果檔,繪出應力圖、應 變圖、位移圖與反作用力曲線,並且動態展現位移與應力分布及位移與應變分布之關係。

3.2 材料性質設定

在材料常數設定方面,因為分析時的限制,所以Ni-Co模具版模擬分析的部分參數與 實際的參數不同,密度原本應該是8900kg/m³,但換算出來的質量太小而無法分析,因此 設定為10¹⁰ kg/m³,PMMA則為1180 kg/m³。Ni-Co模具版的彈性模數要配合接觸時網格的 穿透行為,所以設定同PMMA一樣為3000Mpa,也因Ni-Co模具為剛體(rigid body)不變 形,所以不影響強度;浦松比的設定Ni-Co模具版為0.28,PMMA為0.35。本研究中PMMA 板材壓縮之應力應變材料曲線是採用本文所測試之壓縮應力應變特性曲線,如圖十一所 示。在材料性質設定條件方面,PMMA材料選取分段線性塑性 (MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY)與選用片段固態(SECTION_SOLID)性 質,並且依序輸入不同溫度下的應力應變曲線數值。

3.3 熱壓印之時間與位移曲線

Ni-Co模具版移動的自由度僅在y方向給於強制位移,例如30µm,位移-時間曲線如圖

十二。

3.4 接觸問題

各模組進行微熱壓模擬分析時,Ni-Co模具版為剛體,不考慮厚度;Ni-Co模具版與 PMMA 板 材 的 接 觸 元 素 的 設 定 是 使 用 面 對 面 接 觸 成 型 演 算 法 (contact forming surface to surface),。摩擦係數兩者皆設定為0.35。

3.5 圓板在壓印過程中的徑向壓力分布

本研究先模擬整個1mm厚度、半徑35mm的PMMA圓板在壓印時的徑向壓力分布情 形。因PMMA圓板對稱,故取1/4模型分析,網格尺寸與分析元素為邊長0.5mm的正立方 體,壓印溫度140℃、壓印作用力18kN,邊界條件假設壓印版上下兩側之材料固定無流動 與板材圓周邊緣無拘束。壓印過程中,板材徑向壓力分布的模擬結果如圖十三與圖十四, 板材上的壓力值隨半徑的增加呈現遞減現象,圓板中心點是最大壓力值6.5131MPa,約為 平均壓力值4.6772 MPa之1.393倍;距離圓中心處17.5mm的壓力值為6.0984MPa,約為平 均壓力值之1.304倍。在半徑大於25mm時,壓力值迅速衰減,在半徑30mm與35mm的壓 力值分別為2.5372MPa與0.71996MPa。此模擬結果驗證徑向上的壓力分布為距離圓板中 心點愈近壓力值愈大。

3.6 微流道壓印的有限元素模型

分析模型包含Ni-Co模具版與PMMA圓型成型材料,如圖十五所示。其中Ni-Co模具 版上電鑄有複雜的微流道圖型,流道寬度約50μm,流道深度約30μm,流道間距有250μm、 750μm與1250μm,如圖十六。由於網格數的限制,無法對整個模型做細部模擬分析,因 此將模型分析的區域依成型性質劃分成1個流道、2個流道、4個流道、5個流道與8個流道 等區塊,如圖十七。

基本假設如下:

- 1. Ni-Co電鑄模具版變形量很小,可以忽略。
- 2. PMMA板材為均質之材料。
- 3. 壓印過程中,力量的分布集中於微流道成型區。
- 由於本文實驗中的壓印圖案皆在板材半徑17.5mm範圍內,最大壓力值的變化約為
 6.4%。模擬分析微流道壓印時,可假設為同一流道區塊受力平均且皆相同。
- 5. 忽略圓弧型流道之受力。
- 6. 壓印過程中, PMMA熔膠僅在垂直於流道方向流動。
- PMMA板材壓印表面下層材料不受壓印作用力影響,取板材厚度的30%為模擬分析模型。

有限元素網格分割為Ni-Co電鑄模具版在2D平面上建立網格。在PMMA板材建立六

面體網格,網格邊長2μm,模擬分析模型厚度取0.3mm、縱深取0.1mm,寬度依照不同流 道區塊(間距)決定(如圖十八),並依對稱條件取一半圖案做為模擬分析模型。

3.6.1 邊界條件

執行熱壓印製程時,因假設PMMA融膠僅在垂直於流道方向流動,且各模型區塊依 對稱條件取一半圖案做為模擬分析模型。因此,在考量PMMA板材溫度愈高,材料愈容 易流動而會造成成品邊緣明顯薄化與整體面積變大的情況下,分別以底部鎖定(fix)及 四周的邊界均設定為鎖定之100%拘束條件、各模型區塊之非對稱面的單一外側邊界95% 拘束、92.5%拘束與90%拘束(底部與其它邊界均設定為鎖定(fix))等四種邊界條件下進 行模擬分析。

3.7 微流道壓印模擬結果

由各溫度各模型區塊模擬所獲得之結果,可觀察到隨著溫度愈高融膠較容易流動而 較快充填流道角落,成型寬度轉寫性的正確性隨之提升,如圖十九。從模擬分析結果可 得到各區塊之壓印作用力隨流道數目增加而增加,其壓印作用力增加的主要原因在於流 道數目增加進而提升向下壓印時的阻力與融膠充填流動的拘束力。從各溫度各流道區塊 熔膠的充填情形,可以觀察到在流道角落附近的應變隨溫度的增高而增加,其原因乃是 溫度愈高融膠較容易流動而較快充填流道角落,在壓印位移的末期行程因拘束力增加而 使得流道附近的應力應變與整個模塊的總作用力快速上升。而模擬分析所獲得的壓印作 用力會隨著邊界拘束情形的降低而降低,其原因乃是在壓印過程中因拘束力降低使得流 道附近的應力應變與整個模塊的總作用力下降。

從模擬分析可得到同一邊界拘束條件下,熱壓印作用力隨溫度升高而降低的比例也 增加,原因乃在於高溫時材料軟化,彈性模數下降快速。另外亦可觀察獲得隨邊界拘束 條件比例的降低,熱壓印作用力隨溫度升高而降低的比例也增加。

從圖二十可得到在溫度140℃下的實驗理想的壓印值(18kN)介於邊界90.0%拘束至 92.5%拘束所分析的總壓印作用力值之間且較接近92.5%的拘束條件。在邊界92.5%拘束的 分析中,模擬分析獲得的總壓印作用力數值與溫度135℃下實驗理想的壓印值(21kN)相差 約-11.17%,與溫度140℃下實驗理想的壓印值相差約2.59%。在邊界90.0%拘束的分析中, 模擬分析獲得的總壓印作用力數值與溫度135℃下實驗理想的壓印值相差約-19.42%,與 溫度140℃下實驗理想的壓印值相差約7.38%。在本論文中所採用的是開放模 (open die) 的壓印製程,壓印時可藉由微流道圖案外圍的材料形成的拘束力來阻礙成型圖案因壓印 初期所擠壓的融膠向外流動,而增加微流道的複寫性,但溫度愈高融膠愈容易流動的因 素,會致使整體成品厚度變薄與面積變大,因此邊界100%拘束的分析適合推論成型溫度 較低時之壓印作用力,至於較高溫時的壓印則需以邊界部分拘束開放的方式來推論其壓 印作用力。 從PMMA壓縮試驗的應力應變曲線、潛變曲線、應力鬆弛曲線與DMA試驗所獲得的 曲線可觀察良好的壓印溫度約140℃。由模擬各溫度的總壓印作用力、應力應變圖與融膠 充填之情形,可推論壓印作用力約21000N至17000N,與實驗值較佳參數之壓印溫度140 ℃、壓印作用力18000N及壓印溫度135℃、壓印作用力21000N兩組數據接近。

肆、 結果與討論

以有限元素法模擬分析壓印製程中各溫度的壓印作用力,觀察壓印位移-壓印作用力 變化圖與各溫度下之融膠應力應變圖的結果,可得到如下之結論:

- 1. 圓型板材上熱壓時的壓力值隨半徑的增加呈現遞減現象。
- 2. 相同成型面積,微流道的間距愈小(即微流道愈密集),所需的熱壓印力愈大。
- 溫度愈高融膠較容易流動而較快充填流道角落,成型寬度轉寫性的正確性隨之提升,與實驗結果相符合。
- 同一邊界拘束條件下,高溫時材料軟化,彈性模數下降快速導致熱壓印作用力隨溫 度升高而降低的比例也增加。
- 在開放模(open die)的壓印製程中,較高溫時的壓印需以邊界部分拘束開放的方式 來推論其壓印作用力。

伍、 結論

微熱壓成型技術因為具有製程簡單、模具便宜、成型精度高、可成型面積大、可成 型高深寬比微結構、可以批次生產、材料便宜等優點,提供微熱壓成型技術在工業上生 產發展的潛力,也因此本論文以微熱壓成型技術來成型生物晶片微流道系統,並且研究 其成型的特性,藉以推廣至其他產品的熱壓製程。而微熱壓成型技術是一向較新的成型 技術,但在為結構壓印模型的模擬分析上所佔用的運算時間較長,希望有更好的模型、 簡化模型或運算的軟硬體設備,來縮短分析的時間,達到模擬分析之爭取時間效率的目 的。



圖一 微熱壓製程之成型週期



圖二 模穴填充時高分子流動之表示圖



(a) 具週期性圖案之模仁



(b) 大面積且少數有圖案之模仁



圖三 不同幾何形狀之模仁在熱壓過程中高分子流動圖(續)

圖四 本計劃研究流程



圖五 PMMA圓板材料壓縮試驗的應力應變曲線圖



(a)初始力 15kN 之應力曲線



(b)初始力 20kN 之應力曲線



(c)初始力 25kN 之應力曲線

圖六 鬆弛試驗曲線



圖九 PMMA之比熱曲線圖





圖十 Ni-Co模具材料之線膨脹係數

圖十一 熱壓印製程模擬分析之PMMA材料性質的應力-應變曲線



圖十二 熱壓印模擬分析製程Ni-Co模具版之位移-時間曲線



圖十三 140℃、18kN壓印條件下徑向位置之壓力分布圖



圖十四 140℃、18kN壓印條件下徑向位置之壓力曲線圖



圖十五 熱壓成型之模擬分析模型



圖十六 Ni-Co模具版之微流道圖案



圖十七 熱壓印製程之模擬分析模型區塊



(e) 8 流道 2 維分析模型





圖十九 各溫度熱壓印下二流道區塊模擬分析之熔膠應力應變圖(邊界100%拘束)



圖二十 模擬分析之熱壓印作用力值與實驗熱壓印力值之比較

参考文獻

- 1. X. C. Shan, R. Maeda, and Y. Murakoshi, "Micro Hot Embossing for Replication of Microstructures", Jpn. J. Appl. Phys. Part I, Vol.42, NO6B, pp.3859-3862(2003).
- 2. A. Gerlach, G. Knebel, A. E. Guber and M. Heckele, "Disposable 96 channel plastic microfluidic array", Greiner bio-one.
- 3. H. Becker, U. Heim, "Hot embossing as a method for the fabrication of Polymer high aspect ratio structures", Sensors and Actuators A-Physical, Vol.83, pp.130-135(2000).
- 4. X. J. Shen, L. W. Pan, L. Lin, "Microplastic embossing process: experimental and theoretical characterizations", Sensors and Actuators A: Physical, Vol.97-98, pp.428-433(2002).
- 5. H. D. Bauer, "Polymer waveguide devices with passive pigtailing: an application of LIGA technology", Synthetic Metal, 115 (2000).
- 6. M. Heckele, and W. K. Schomburg, "Review on micro molding of thermoplastic polymers", Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol.14, pp.R1-R14(2004).
- 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).
- 8. L. J Heyderman, H. Schift, C. David, J. Gobrecht, and T. Schweizer, "Flow behavior of thin polymer films used for hot embossing lithography," Microelectronic Engineering, Vol.54, pp.229-245 (2000).
- 9. Y. Hirai, S. Yoshida, and N. Takagi, "Defect analysis on thermal nanoimprint lithography", Journal of Vacuum Science Technology B, Vol.21, issue 6, pp.2765-2770 (2003).
- 10. L. R. G Tredoar, "The physics of rubber elasticity", Oxford University Press, (1958).
- M. Mooney, "A Theory of large elastic deformation", Journal of Applied Physics Vol.11, p.582 (1940).
- 12. R. S. Philos., "Large elastic deformation of isotropic materials", VI. Further Results in the

Theory of Torsion, Shear and Flexure Ser., A.242, p.173(1949).

- R. W. Ogden, "Large deformation isotropic elasticity on the correlation of theory and experiment for compressible rubberlike solids", Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Vol.328, pp.567-583 (1972).
- 14. J. M. Maerker, and W. R. Schowalter, "Biaxial extension of an elastic liquid", rheological Acta, Vol.13, pp.627-638(1974).
- 15. Y. Hirai, M. Fujiwara, T. Okuno, and Y. Tanaka, "Study of resist deformation in nanoimprint lithography", J. Vac. Sci. Technol. B 16(6), pp.2811-2815(2001).
- 16. C. R. Lin, R. H. Chen and C. Hung, "The characterization and finite element analysis of a polymer under hot pressing", The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.20, pp.230-235(2002).
- Y. J. Juang, L. J. Lee, and K. W. Koelling, "Hot embossing in microfabrication. Part II: Rheological characterization and process analysis, Polymer engineering science, Vol.42, pp.551-566(2004).