

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 熱壓成形微結構的收縮特性研究

### A Study on the Shrinkage Property of Hot Embossed Microstructures

計畫編號：NSC 90-2212-E-009-035

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：陳仁浩 國立交通大學機械工程學系

計畫參與人員：劉安誠、林威宇 國立交通大學機械所

#### 一、中文摘要

本計畫探討熱壓加工條件與加工過程中材料的壓力分佈、剪應變率分佈、剪應力等狀態參數之間的關係，以及加工中的這些力學狀態對於成形微結構的尺寸及相對位置的收縮特性的影響。透過詳細的理論分析與實驗配合，其結果可以做為模具設計及選擇製程參數的參考。

本計畫依據開放式加壓變形流動理論的基礎，發展出一個適合於熱壓加工時的壓力分佈及成品收縮的理論模態。在理論分析上，利用微元素的力平衡解析來推導出材料的壓力分佈及剪應變率、剪應力分佈，並根據材料壓力-比容-溫度特性預測微結構尺寸及相對位置的收縮率。在實驗分析上，分成兩部分：（一）熱壓過程中的壓力分佈量測，（二）成形微結構陣列的收縮率特性分析。本計畫除了探討熱壓微結構的收縮特性外，同時也檢討如何來控制不均勻收縮的方法，可作為設計微結構模具及選擇最佳熱壓參數之參考。

**關鍵詞：**微結構，熱壓，收縮，模具設計

#### Abstract

This project investigated the relationships between hot embossing conditions and the pressure distribution of materials, the distribution of shear strain rate, shear stress during processing. Additionally, the dynamical effect of these parameters on the shrinkage characteristics of the size and relative positions of microstructures were studied as well. The results, based on the

combination of theoretical analyses and experiments, should help to control the shrinkage rate of microstructure effectively and serves as the reference for mold design and processing conditions.

This project, according to the basis of open-compressed deformation principle, developed a theoretical model, which is able to predict the pressure distribution and shrinkage rate during hot embossing. In theoretical analysis, the force balance analysis of microelements was performed to derive the pressure distribution of materials and the distribution of shear stress. In addition, the shrinkage rate of microstructure size and relative positions were also calculated based on the pressure - specific volume - temperature characteristics of material. On the other hand, experiments include: (1) The measuring of pressure distribution during hot embossing; (2) analysis of the shrinkage characteristics of embossed microstructure array.

**Keywords:** microstructures, hot embossing, shrinkage, mold design

#### 二、緣由與目的

熱壓加工是製作塑膠微結構的主要方法之一，近年為因應微機電系統的高度積體化之需求，由基本的熱壓加工又衍生發展出可用以製作積層微結構的對模熱壓製程。當利用對模熱壓以製作積層微結構時又可分為兩種方式：其一為在覆有一層聚合物厚膜的積體電路板或具有其他微結構的基板上，對準位置後直接熱壓做出新

的一層微結構；另一則為先以熱壓加工在單純的聚合物厚膜上做出微結構後將其取下，再對準黏合至備妥的積體電路板或另一具有微結構的基板之上。然而，無論是哪一種形式的熱壓加工，基本上都存在有生產性低與收縮率不易精確掌控的問題。其中，收縮率不穩定會造成微結構間相對位置的誤差，不僅使微結構熱壓加工無法大面積化，亦會導致積層微結構製作之失敗，因此直接地間接地都會影響到其加工品質與生產效率。本研究室數年來與工研院、國科會精密儀器中心、同步輻射中心等單位合作，持續進行微結構熱壓加工之研究，包括積體化導線架衝頭之 LIGA 微結構消失模、錐狀微結構陣列光學平板、微圓柱陣列板以及高深寬比微孔陣列模仁等的製作研發，已累積相當的經驗與成果。根據這些實際的心得，亦深深覺得成形品收縮率的均勻控制乃是有關微結構熱壓加工品質提升、應用面擴展、模具設計以及生產自動化的最大的關鍵。

有鑑於此，本計畫決定針對微結構的收縮率與加工過程中材料的壓力、溫度等狀態參數以及熱壓加工條件之間的關係，結合理論分析與實驗驗證進行深入的探討，以徹底瞭解熱壓微結構的收縮性，並研究出避免不均勻收縮的方法。其成果對於提升熱壓微結構的尺寸精度及相對位置精度、製程自動化、大面積化加工、以及微結構積層化有重大的幫助。

### 三、結果與討論

#### 1. 成形品外觀缺陷

以矽晶模仁熱壓之成形品，微結構表面較平順，如圖 1 所示，而鍍金屬模仁所熱壓出來之微結構表面則有孔洞與波紋的產生，如圖 2 所示，不過進一步觀察電鑄所得之鍍金屬模仁，亦可發現結構表面有孔洞與波紋的產生，因此推論孔洞與波紋的產生是在電鑄過程產生，而熱壓成形法則能精確的轉印模仁上微結構之特徵。

在成形品之相同部位，因壓印壓力值的不同，微結構的充填程度也不一樣，如圖 3 所示，是以 1 MPa 之壓印壓力成形 1mm 厚之 PMMA 時，位於成形品中央之微結構，

發現頂端部分可能因為壓力不足或充填時間不夠而未能充填完成，更進一步觀察，亦可發現其頂端部分疑是因為表面張力作用而呈現圓弧狀。圖 4 所示則是以 10 MPa 之壓印壓力成形 1mm 厚之 PMMA 時，位於成形品中央之微結構。

比較製品各部分之微結構成形特性發現，製品邊緣之微結構會因為在冷卻過程中，模仁與成形品之收縮率不同而造成傾倒、滑移或斷裂現象。如圖 5 所示之傾倒現象，一般皆發生在較具韌性之材料上，如 PC；而如圖 6 所示之滑移現象與斷裂現象則是較常發生在脆性材料上，如 PMMA。此外，製品邊緣之微結構也會因為壓力不足而造成未充填完成之現象，亦如圖 6 所示。又觀察成形品在各角度之收縮與破壞現象，發現皆呈方向性分佈，此乃是因為所採用之成形材料為不定形高分子材料所致。

#### 2. 收縮率分佈

##### 2.1 製程參數對收縮率分佈之影響

有關壓印壓力對製品徑向上收縮量分佈之影響，實驗結果如圖 7 所示。在 1 MPa、10 MPa、20 MPa 等三種不同的壓印壓力中，以 1 MPa 之壓印壓力熱壓所得成形品之收縮量最大，在最邊緣(離中心 24mm)處之收縮量約為 140  $\mu\text{m}$ ，等於 2.8 個微結構寬度。而以 10 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，在 24mm 處之收縮量約為 120  $\mu\text{m}$ 。以 20 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，在 24mm 處之收縮量則約為 100  $\mu\text{m}$ 。此外，委託廠商以商用熱壓機熱壓 PVC 所得之成形品，在 24mm 處之收縮量僅約為 35mm。

圖 8 所示為分別以 1 MPa、10 MPa、20 MPa 等三種壓印壓力熱壓之成形品收縮率分佈情形。發現在製品中心到邊緣中，靠中心三分之二部分的收縮率大約維持在定值，而靠外圍三分之一部份，收縮率則有增加之趨勢，且在大壓印壓力時較明顯。以 1 MPa 之壓印壓力所得到之成形品收縮率最大，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.57%，到 24mm 處之收縮率則達 0.62%。而以 10 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.47

%，到 24mm 處之收縮率則達 0.61%。以 20 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.38%，到 24mm 處之收縮率則達 0.54%。此外，委託廠商以商用熱壓機熱壓 PVC 所得之成形品，整個徑向上之收縮率皆約為 0.13%。

觀察以 1 MPa、5 MPa、10 MPa 等三種保壓壓力熱壓之成形品收縮率分佈情形。發現在製品中心到邊緣中，靠中心三分之二部分的收縮率亦大約維持在定值，而靠外圍三分之一部份，收縮率亦有增加之趨勢。以 1 MPa 之保壓壓力所得到之成形品收縮率最大，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.56%，到 24mm 處之收縮率則達 0.67%。而以 5 MPa 之保壓壓力熱壓所得之成形品，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.52%，到 24mm 處之收縮率則達 0.62%。以 10 MPa 之保壓壓力熱壓所得之成形品，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.47%，到 24mm 處之收縮率則達 0.61%。

## 2.2 成形材料對收縮率分佈之影響

關於成形材料對收縮率分佈之影響方面，則以成形材料種類、成形材料厚度與模仁配置方式等來探討各因素對製品收縮率分佈之影響。

材料種類方面，除了使用 PMMA 外，亦使用 PC 為成形材料，並以對收縮率分佈影響較大之壓印壓力參數來探討收縮率分佈情形。其所得之收縮量變化結果，以 1 MPa 之壓印壓力熱壓 PC 試片所得之收縮量在離中心 24mm 處之收縮量約為 160  $\mu$ m。而以 10 MPa 與 20 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，在 24mm 處之收縮量分別約為 145  $\mu$ m 與 135  $\mu$ m。另可以發現以 1 MPa 熱壓所得之收縮率，靠中心三分之二部分平均收縮率約為 0.67%，在 24mm 處之收縮率則達 0.71%。以 10 MPa 之壓印壓力熱壓之成形品，在靠中心三分之二部分收縮率約為 0.59%，在 24mm 處之收縮率則達 0.76%。而以 20 MPa 之壓印壓力熱壓之成形品，在靠中心三分之二部分收縮率約為 0.54%，在 24mm 處之收縮率則達 0.67%。

模仁配置方法方面，先前所得之結果皆以矽膠作為模仁之襯墊，以緩和與平衡壓力之影響，達到較均勻之成形性。若不以

矽膠為襯墊所熱壓之成形品的收縮率分佈情形，其中以 1 MPa 之壓印壓力所得之成形品的收縮量最大，24mm 處之收縮量約為 115  $\mu$ m。而以 10 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，在 24mm 處之收縮量約為 89  $\mu$ m。以 20 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，在 24mm 處之收縮量則約為 73  $\mu$ m。收縮量比墊矽膠熱壓所得之結果約少 25mm 至 30mm 不等。至於以 1 MPa 熱壓所得之成形品收縮率則介於 0.46% 至 0.5% 之間。以 10 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.35%，到 24mm 處之收縮率則達 0.42%。以 20 MPa 之壓印壓力熱壓所得之成形品，靠中心三分之二部分收縮率約為 0.27%，到 24mm 處之收縮率則達 0.39%。收縮率相較於墊矽膠者明顯下降，但是，亦可以發現收縮率分佈較不均勻，尤其當壓印壓力越大時越明顯。

成形材料厚度之影響方面，以 250  $\mu$ m 厚之 PC 試片進行壓印壓力之影響實驗。發現高壓印壓力時，在徑向上三分之二至四分之三處之收縮率有驟降再上升之趨勢。由於趨勢與以厚度為 1mm 之成形材料熱壓時不相同，因此，分別再對壓印溫度、下壓速度、壓印時間進行收縮率分佈之探討，結果亦呈現收縮率在徑向上三分之二至四分之三處先驟降再上升之趨勢。至於各種壓印溫度、下壓速度或壓印時間等參數之影響則不如有墊矽膠時那麼一致，唯趨勢大致相同，推測此現象應該與熱壓時壓力分佈不平均有關。

## 五、參考文獻

- [1] E. W. Becher, W. Ehrfeld, P. Hagmann, A. Maner and D. Munchmeyer, *Microelectronic Engineering*, **4**, pp. 35-56, 1986.
- [2] M. Harmening, W. Bacher, P. Bley, A. El-Kholi, H. Kalb, B. Kowanz, W. Menz, A. Michel and J. Mohr, *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 202-207, 1992.
- [3] W. bacher, W. Menz and J. Mohr, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. **42**(5), pp. 431-441, 1995.
- [4] H. Guckel, K. J. Skrobis, T. R. Christenson, J. Klein, S. Han, B. Choi and G. Lovell, *Proceedings of the IEEE Micro Electro Mechanical Systems*, pp. 74-79, 1991.
- [5] A. Bruno Frazier and Mark G. Allen, *Proceedings*

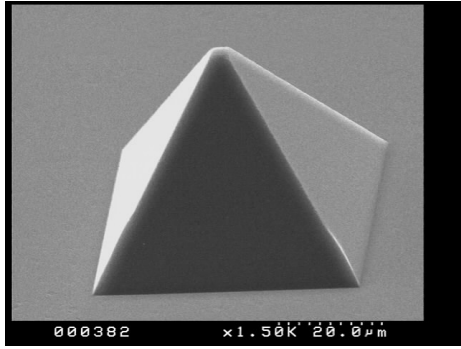


圖 1 矽質模仁熱壓成形品 SEM 照片

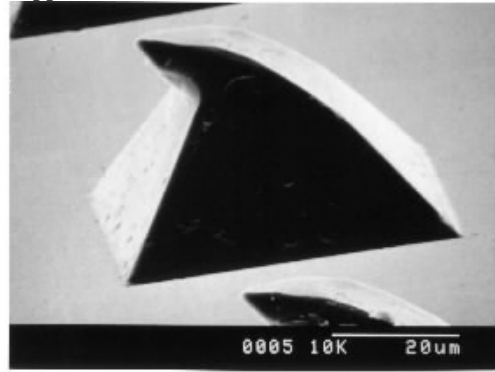


圖 5 成形品邊緣微結構之傾倒現象 (材質 PC, 厚度  $250\mu\text{m}$ , 壓印壓力  $10\text{MPa}$ )

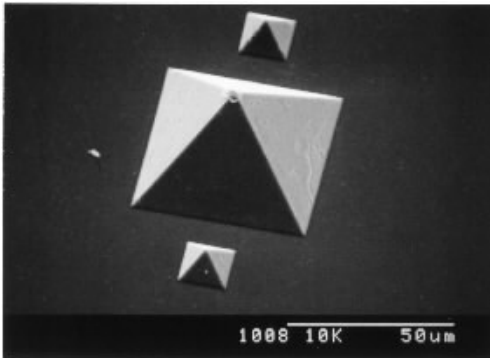


圖 2 鎳金屬模仁熱壓成形品 SEM 照片

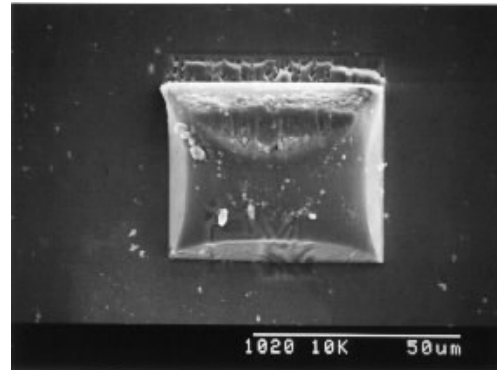


圖 6 成形品邊緣微結構充填不完全與滑移現象 (材質 PMMA, 厚度  $1\text{mm}$ , 壓印壓力  $1\text{MPa}$ )

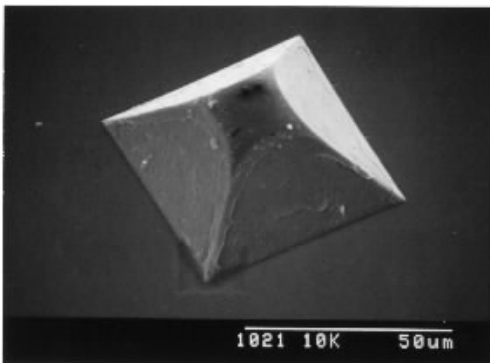


圖 3 以  $1\text{MPa}$  壓印壓力成形所得之微結構 (位於成形品中央)

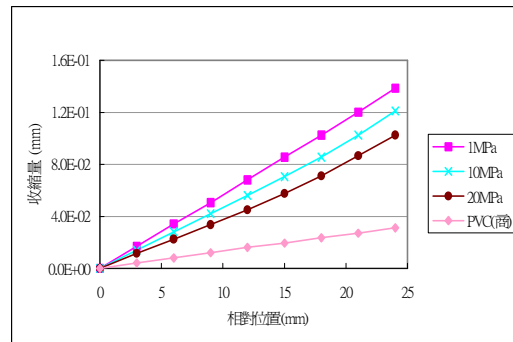


圖 7 厚度為  $1\text{mm}$  的 PMMA 之壓印壓力對收縮量變化之影響 (墊矽膠)

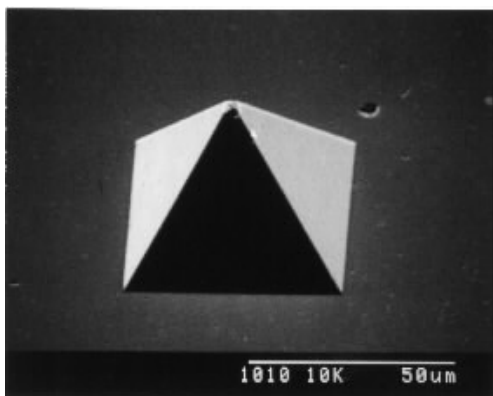


圖 4 以  $10\text{MPa}$  壓印壓力成形所得之微結構 (位於成形品中央)

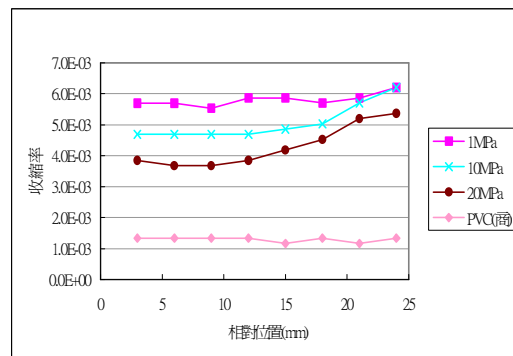


圖 8 厚度為  $1\text{mm}$  的 PMMA 之壓印壓力對收縮率分佈之影響 (墊矽膠)

