

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

智慧型金屬板材成形CAE軟體之開發與整合研究(2/3)-子計劃二

金屬板材深引伸耳緣成形製程之分析

Analysis of earing in deep drawing process of metal sheet

計畫編號：NSC 90-2212-E-032-012

執行期限：89年8月1日至92年7月31日

第二年：90年8月1日至91年7月31日

主持人：李經綸 副教授 淡江大學機械工程學系
共同主持人：盧永華 副教授 國立宜蘭技術學院機械工程學系
計劃參與人員：李章詠 淡江大學機械工程研究所碩士班
計劃參與人員：于國光 淡江大學機械工程研究所碩士班
E-mail: chinglun@mail.tku.edu.tw

一、中文摘要

本計畫採用Prandtl-Reuss之塑流法則(flow rule)和Hill的異向性降伏準則，結合有限變形理論，及ULF(Updated Lagrangian Formulation)的觀念，建立一增量型彈塑性大變形的三維有限元素分析模式，用以模擬圓杯之深引伸成形製程。最後配合圓杯的深引伸板金成形實驗，設計一組引伸模具、圓柱沖頭及壓料板，於油壓成形機上加以實驗，並將有限元素分析所得之結果與實驗結果作比較，以驗證本計畫所發展的彈塑性三維有限元素分析程式之可靠性。

關鍵字：深引伸、有限元素、耳緣、彈塑性

Abstract

A methodology for formulating an elasto-plastic large deformation finite element model, which based on the Prandtl-Reuss flow rule, Hill's anisotropic yield criterion, and updated Lagrangian formulation, is developed to simulate the deep drawing process of cylindrical cup. A set of drawing die, cylindrical punch, and blank holder, are designed for experiments. The experiments are set on the hydraulic forming machine to simulate the deep drawing process of metal sheet. The simulation and experimental results are compared to verify the reliability about the

development of elasto-plastic three-dimensional finite element program in this project.

Keywords： deep drawing, finite element, earing, elasto-plastic

二、緣由與目的

於圓杯引伸成形製程中所使用的原料為帶狀的金屬薄板，而板片是經由軋軋加工生產而得，因此導致異向性殘存於原始料片中。若拉伸試片取自與軋軋平行的方向，將比取自與軋軋方向垂直之拉伸試片具有較高的強度，此乃材料異向性的因素所造成。成形加工時，異向性將會影響材料不均勻的流動，導致圓杯開口端不平整的外緣，此缺陷即所謂的耳緣(earing)。即使板片經由交叉軋軋以儘量減少異向性，但是杯緣仍是很少平整，發生的原因可能是由於模具或沖頭不規則的外形、不均勻的潤滑、不均勻的板片厚度或模具與沖頭未中心對正所引起。因此為了探討材料異向性對圓杯深引伸成形所造成的影響，將建立一套三維有限元素分析之電腦輔助模擬程式以預測耳緣的外形、圓杯應力及應變的分佈，以及圓杯厚度的變化，為本研究計畫主要的目的之一。

板金成形製程分析在計算方法上已有數十年的發展，尤其是在理論公式及數值技術的範疇上完成了力學分析，然而對金屬機械性質的細節仍未有長足的進展。實

際上，即使板金在機械加工的製程後顯示異向性，但是在許多的有限元素模擬上仍將材料假設為等向性。雖然有部份致力於異向性的研究，但是多數仍侷限於平面異向性的探討，既使如此這方面的研究仍然不多。Lin等[1]即以分析異向性材料的杯引伸來決定耳緣與機械異向性間的關係。Chung與Shah[2]則以平面異向性金屬進行圓杯引伸試驗，並以有限元素模擬耳緣輪廓、圓杯高度及圓杯厚度之輪廓。Jung等[3]則以平面異向性板金的深引伸模擬，瞭解壓料板外緣牽引力的分佈與邊界條件及料片厚度分佈的發展有直接的影響。Chen與Sowerby[4]於杯引伸製程中以平面應變法發展理想的板片形狀，並預測耳緣外形。Chung等[5]使用理想成形設計理論、有限元素分析及實驗來發展最佳化板片外形設計。Zaky等[6]於深引伸製程，提出無耳緣圓杯最佳化異向性板片外形之研究。

本年度之計畫目的，乃應用彈塑性增量理論有限元素法發展一套模擬金屬板材引伸成形製程的三維數值模擬程式，並考慮材料異向性對深引伸成形製程之影響。並以ULF(updated Lagrangian formulation)為材料之構成方程式，在解析的過程中是以沖頭位移為計算增量，並配合元素的降伏條件、工件與工具的接觸或脫離、最大應變及旋轉等增量的限制，來決定每一計算步驟的位移增量。工件與工具之間的摩擦處理係採用庫倫摩擦定律。藉由有限元素分析的數值模擬可得到引伸過程中之完整變形歷程，如各成形階段之變形圖，沖頭負載與沖頭位移之關係，工件的厚度分佈及圓杯之耳緣高度分佈等，並完成實驗及量測設備之建立與模具之製作及實驗，最後將所發展程式之耳緣分析結果與實驗數據作比較。

三、基本理論

在金屬板材成形製程中，將彈塑性理論偶合入有限元素法時，經由虛功原理推導之updated Lagrangian formulation可由下式表示

$$\int_V \{(\dot{t}_{ij} - 2\dot{t}_{ik}D_{kj})uD_{ij} + \dot{t}_{jk}L_{ik}uL_{ij}\}dV \quad (1)$$

$$= \int_{S_i} \dot{t}_i u v_i dS$$

其中 $\dot{t}_{ij} = \dot{t}_{ij} - W_{ik}\dot{t}_{kj} + \dot{t}_{ik}W_{kj}$ ，式中之 \dot{t}_{ij} 為 Cauchy 應力之 Jaumann 微分， W_{ij} 為旋轉張量， D_{ij} 為應變率張量， L_{ij} 為速度梯度張量， V 和 S_i 為材料體積和外力曲面。 $u \in \epsilon_i$ 和 i_i 分別為虛速度和單位面積表面力之變化率張量。

組合成有限元素法之基本型式如下所示

$$[K]\{\Delta u\} = \{\Delta F\} \quad (2)$$

四、實驗與數值分析

圖(一)為本計畫所建立之實驗設備的整體系統配置圖，包含一部五十噸的液壓板金成形機、量測及控制系統資料擷取器、個人電腦及VIEWDAC資料擷取套裝軟體。其操作原理如下所述：(1)將主壓缸及緩衝缸負載感測器之輸出線路連接到 KEITHLEY 500A 資料擷取器中，可將液壓缸壓力的類比訊號轉換為數位訊號輸入個人電腦。(2)主壓缸及緩衝缸之位移可藉由光學尺的線路，透過電纜線連接於個人電腦的 RS-232 埠位，以便隨時記錄位移變化。(3)上述液壓缸負載與位移的數據，皆可透過 VIEWDAC 資料擷取套裝軟體即時顯示，並記錄於個人電腦的檔案中。(4)將所有實驗數據透過網路傳輸到工作站上，可進行實驗數據與有限元素法數值分析結果之比較。

為驗證有限元素模擬及電腦程式的可靠性，故於液壓板金成形機上完成圓杯深引伸成形實驗，藉以比較實驗與數值解析的結果。圓杯深引伸成形實驗的模具如圖(二)所示，其模具之幾何尺寸及配置如圖(三)所示，而實驗的主要程序敘述如下：

(1)先以線切割機裁出直徑125.0mm的料片，並於電子顯微鏡上觀察料片之金相組織，以了解金屬板片在軋軋時的壓延方向，可作為日後觀察材料異向性導致耳緣及其成長方向的參考。(2)將模具安裝於液

壓成形機上，並以厚薄規量測沖頭與模具間隙，以確認模具軸線同心。(3)將料片置於壓料板上，並以游標卡尺確認料片置於中心點上。(4)將間隔環放置在料片的外圍及壓料板的上方。(5)壓料板上升，並保持緩衝缸壓力為50Kg/cm²。(6)執行電腦程式並使沖頭以1.2mm/sec的平均速度將料片引伸成形。(7)經由個人電腦及資料擷取設備記錄主壓缸行程與負載之關係。(8)將不同的料片重複實驗步驟1至7。(9)使用量床量測工件耳緣之幾何尺寸。

本實驗所用的料片是由中國鋼鐵股份有限公司所提供，並委託中鋼冶金實驗組依JIS規範進行料片的拉伸實驗，以獲取材料之參數，並利用最小平方法求得鋼板之應力-應變特性曲線方程式

$$\sigma = 514.734(0.006309 + \bar{\nu}_p)^{0.227} \text{ MPa} \quad (3)$$

其餘材料參數如下所示：

料片原始厚度： $t=1.00\text{mm}$

降伏應力： $\sigma_y=163.00\text{MPa}$

楊氏係數： $E=2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$

柏以松比： $\nu=0.3$

Lankford 值： $r_0=2.04, r_{45}=1.3, r_{90}=2.16$

分析時先以I-DEAS軟體建構出沖頭、模具、壓料板及板片之幾何外形，再經過I-DEAS之Simulation模組產生有限元素網格資料，如節點座標與編號及元素編號等，再將資料輸入本計畫所發展的有限元素程式進行分析，最後產生所模擬的板金深引伸成形之沖頭負載與沖頭位移之關係、成形後工件厚度的變化及成形之歷程等結果。

圖(四)、圖(五)與圖(六)分別為深引伸耳緣成形之應力分佈圖、應變分佈圖與厚度分佈圖，圖中之左側為四分之一圓形料片上視圖，而右側為四分之一圓形料片於Z軸旋轉45度後之正視圖，圖中顯示在杯口端緣部分受到的應力與應變較大，而在圓杯底部的應力與應變較小。厚度的分佈，會因成形後圓周方向的收縮應力，以致從杯底底部向杯口端緣部分逐漸地增加。

五、結果與討論

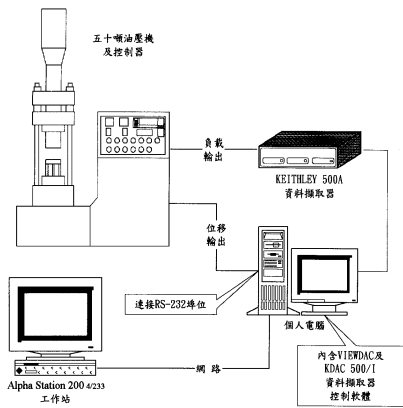
本計畫已如期完成實驗與量測設備之

安裝及測試，並製作一組圓杯深引伸成形模具，進行數值模擬結果與實驗之比較與分析。電腦數值模擬與深引伸成形實驗之沖頭負載與沖頭衝程關係如圖(七)所示，成形卸載後工件最終之耳緣外形如圖(八)所示，故可驗證本CAE軟體得確實模擬板金成形之製程。然而數值分析所需之時間頗長，因此下個年度的計畫，將針對分析效率的提昇進行改善，例如採用平行運算技術改善本程式的運算效率，以期望本程式能達泛用型CAE分析軟體之目標。

六、參考文獻

- [1] Lin, D. W., D. Daniel and J. J. Jonas, "Simulation of Earing in Textured Material," *Materials Science and Engineering*, pp.161-170 (1991).
- [2] Chung, K. and K. Shah, "Finite Element Simulation of Sheet Metal Forming for Planar Anisotropic Metals," *International Journal of Plasticity*, Vol. 8, pp. 453-476 (1992).
- [3] Jung, D. W., I. S. Song and D. Y. Yang, "An Improved Method for the Application of Blank-Holding Force Considering the Sheet Thickness in the Deep-Drawing Simulation of Planar Anisotropic Sheet," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 52, pp.472-488 (1995).
- [4] Chen, X. and R. Sowerby, "Blank Development and the Prediction of Earing in Cup Drawing," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 38, No.5, pp. 509- 516 (1996).
- [5] Chung, K., F. Barlat, J. C. Brem, D. J. Lege and O. Richmond, "Blank Shape Design for a Planar Anisotropic Sheet Based on Ideal Forming Design Theory and FEM Analysis," *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 39, No.1, pp. 105- 120 (1997).
- [6] Zaky, A. M., A. B. Nassr and M. G. El-Sebaie, "Optimum Blank Shape of Cylindrical Cups in Deep Drawing of Anisotropic Sheet Metals," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 76, pp.203-211 (1998).

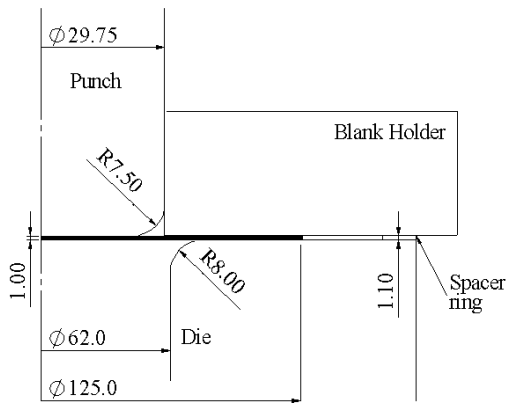
七、圖表



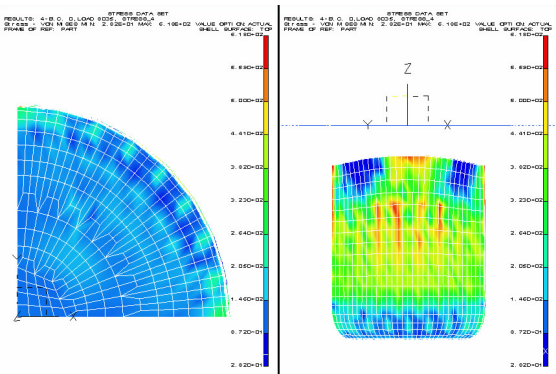
圖(一)：實驗設備整體系統配置圖



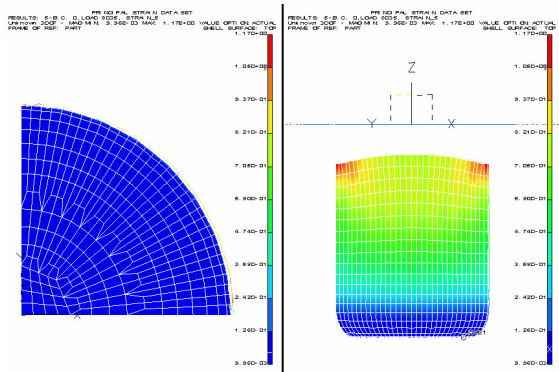
圖(二)：實驗模具圖



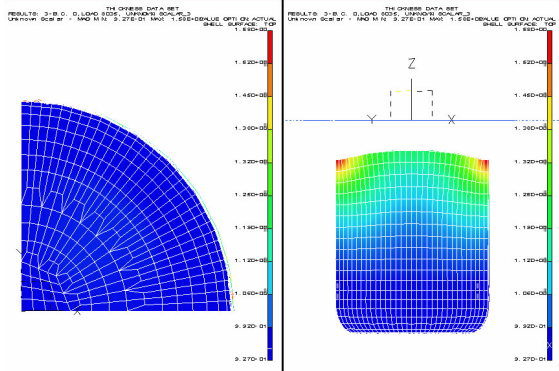
圖(三)：深引伸耳緣成形之模具幾何尺寸



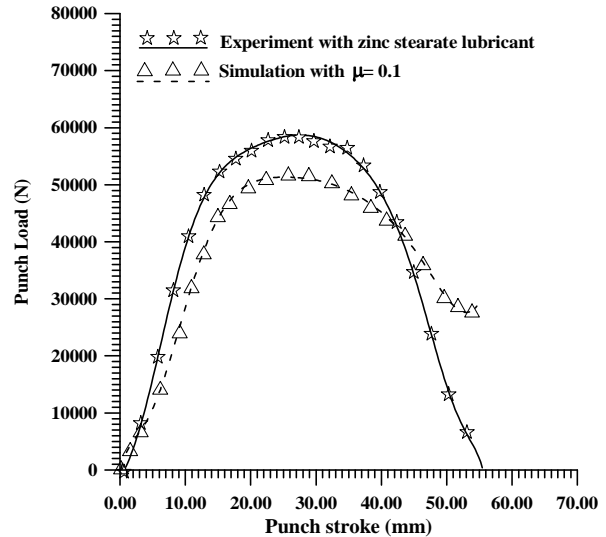
圖(四)：深引伸耳緣成形之應力分佈圖



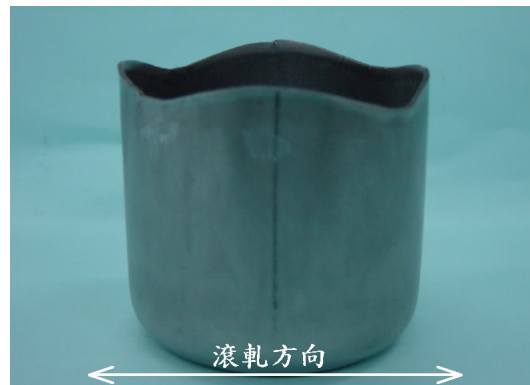
圖(五)：深引伸耳緣成形之應變分佈圖



圖(六)：深引伸耳緣成形之厚度分佈圖



圖(七)：深引伸耳緣成形模擬與實驗之沖頭負荷與衝程關係之比較



圖(八)：深引伸耳緣成形之照片