

異向性板材方杯引伸最佳化料片之研究

盧永華¹ 蔡毅璋²

1. 國立宜蘭技術學院機械工程系副教授

2. 國立宜蘭技術學院機械工程系學生

摘 要

當金屬板片被引伸成不規則稜柱杯時，通常使用試誤法來求得最佳化料片的外形。然而，試誤法的不確定性必須經由一連串的料片外形修正，以獲得最佳化料片的外形。此舉造成了生產時間及製造成本之浪費。本文發展一套「流線法」(Stream Line Method)理論，係將材料異向性視為勢能源項並疊加入勢能流場之概念。利用此理論可有效地用來預測不規則稜柱杯引伸時最佳化料片的外形。由「流線法」計算方杯引伸時，所得最佳化料片輪廓，顯示材料異向性在預測最佳化料片外形上有其重要的影響。為驗證理論之正確性，本文亦設計一組方杯引伸模具，於板金成形機上實驗。由最佳化料片在引伸製程中，方杯端緣顯示出均勻的平整性，以及引伸杯高度的量測均顯示理論與實驗之結果相當吻合。

關鍵詞：最佳料片、方杯引伸、異向性、流線法

A Study of Optimum blank of Square drawing of Anisotropic Sheet Metals

Yuung-Hwa Lu¹ , Yi-Wei Tsai²

1.Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, National I-Lan Institute of Technology

2.Student, Department of Mechanical Engineering, National I-Lan Institute of Technology

Abstract

When sheet-metal is drawn to be an irregular prismatic cup, trial and error methods are usually used to obtain the optimum blank shape. However, the uncertainty of the trial and error methods mean that they require sequential modification of the blank to obtain the optimum shape. It causes the waste of the production time and the cost of manufacture. Hence, This paper develops a Stream Line Method (SLM) theory to superimpose material anisotropic property as a “sink” to the potential field. A prediction of the optimal blank in irregular prismatic cup drawing will be obtained efficiently from this theory. From the optimum blank contours calculated by SLM for the square cup, it showed that material anisotropic property has significant influence in the prediction of the optimum blank shape. As a verification of the theory, an experiment of square cup drawing was conducted on sheet-metal foming machine. From the profile of the square cup and measured cup height results, it showed good agreement between experiment and theoretical prediction.

Key Words : Optimum blank, Square Cup Drawing, Anisotropic, Stream Line Method

一、前言

現今國內工業正面臨資本密集，技術升級之轉換階段，如何提高生產力，提昇製造及確保產品的品質水準，實為目前之最重要課題，而於生產技術方面，對製程之認識與了解，更佔有極重要的地位，故金屬成形製造分析理論與技術之建立，乃勢之所趨，不可避免。

金屬成形製造中，不規則多邊形引伸所佔比例相當高，因此如何降低製程時之二次加工，以及節省材料成本，均為業界及學者努力的目標，而最佳化料片之設計與預測，即為值得深入探討之課題。以往 Almetoglu et al. [1]利用壓料板之夾持力討論過，然而為求得最佳化料片尺寸，FEM 須作多次之模擬方可獲得，另外 Kaiwai et al. [2]曾採用滑移線場法 (SLF) 來預測多邊形沖頭之料片尺寸，但亦僅適用於無應變硬化之材料。Karima [3]亦採用修飾過之滑移線場法求得複雜形狀之料片。另一方面，Liu 和 Sowerby [4]則提出勢能流 (potential flow) 理論，來預測多邊形沖頭抽製之理想料片形狀，並利用邊界元素法 (BEM) 予以解析，並獲得良好結果。

本文將延伸勢能流理論，發展一套流線法 (Stream Line Method) 程式，將不規則多邊形引伸時，於等勢能線 (equipotential contour) 間之領域 (domain) 的異向性造成之勢能密度變化視為常數後，從多邊形沖頭邊界依次向外疊代，將可求得引伸深度到達時，所須之最佳化料片形狀。並且研發一套用 FORTRAN 語言所寫的預測最佳化料片程式，預測材料在平面應變及異向性所得到的料片形狀。由此程式計算方杯引伸時所得最佳化料片輪廓，顯示材料異向性在預測最佳化料片之外形上有極重要的影響。同時為求理論之驗證，本文設計了一組方杯引伸模具，於板金成形機上實驗。利用油壓成型機及 A-D 轉換軟體，針對由流線法程式所求得之最佳化料片形狀，在 CNC 線切割機上加以切割後，置於成型機上予以實驗，由最佳化料片在引伸製程中，方杯端緣顯示出均勻的平整性，以及引伸杯高度量測均顯示理論與實際的結果相當吻合，獲得一般化之修正公式。最後再配合 3D 板材成型 CAE 軟體，分析最佳化料片引伸成形時之 FEM 分析，除驗證實驗結果外，亦利用此 CAE 軟體來判斷及修正流線法所得之最佳化料片形狀，以減少嘗試錯誤法次數，並將所得結果，提供給業界參考。

二、基本理論

對一不可壓縮的固體而言，其連續方程式為：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\mathbf{e}_z$$

(1)

其中 u 、 v 分別為在 x 及 y 方向之速度分量 (如圖 1)。 $x-y$ 平面與定義為 z 軸向之引伸方向互相垂直。假設材料在凸緣的流動可合理的比擬為由勢能場 (potential field) 所描述的理想流。則可藉此勢能場將方程式(1)改寫如下：

$$\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial y^2} = -\mathbf{e}_z$$

(2)

其中

$$u = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial x}$$

(3)

及

$$v = \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial y}$$

(4)

於平面應變杯引伸時，其應變率 \mathbf{e}_z 將等於零，則上述方程式即改為 Laplace 方程式。若非平面應變杯引伸時，應變率 \mathbf{e}_z 的存在將於方程式(2)中產生非齊性項。在平面應力引伸時，導致應變率 \mathbf{e}_z 變化之主要因素為金屬板片的平面異向性。因此，為了將異向性特質整合到方程式(2)中，故考慮任意沖頭外形的引伸問題 (如圖 2)。

Γ_1 和 Γ_2 分別表示在速度勢能均佈時的內外邊界。一線段元素在極座標中，從初始位置 (r, \mathbf{q}) 經過時間區間 dt 後，移動到新的座標位置 $(r-dr, \mathbf{q}-d\mathbf{q})$ 。顯然此線段元素會被兩相鄰的流線所侷限著。若旋向、局部曲率半徑 \mathbf{r} 及角度 $d\mathbf{w}$ 在微小時間區間內之變化不大時，則主應變率 \mathbf{e}_z 可被估算如下

$$\mathbf{e}_z = \frac{\mathbf{r}}{\mathbf{r}} = -\frac{|q|}{\mathbf{r}}$$

(5)

其中 q 為與板片邊界互相正交的速度分量，即

$$|q| = \left| \frac{\partial}{\partial n} \right|$$

(6)

其中 n 為單位法向量。於方程式(6)中， q 值正負號的決定，與運動的方向及材料的位置有關。此外，當輪廓線為外凸時 \mathbf{r} 定義為正值，反之若為內凹時 \mathbf{r} 定義為負值。由於

$$R_{I+90} = \frac{\mathbf{e}_1}{\mathbf{e}_z} = -\frac{\mathbf{e}_1}{(\mathbf{e}_1 + \mathbf{e}_2)}$$

(7)

其中 R_{I+90} 乃是在張力試驗下，與圖 2 中之 I 相互正交所量測出之參數 R 值。因此，可得

$$\mathbf{e}_1 = -\frac{R_{I+90}}{1 + R_{I+90}} \mathbf{e}_2$$

(8)

及

$$\mathbf{e}_z = -\frac{1}{1 + R_{I+90}} \mathbf{e}_2$$

(9)

將方程式(5)和(9)代入方程式(2)後，在考慮金屬板片異向性的條件下可推導出柏以松(Poisson)方程式如下

$$\nabla^2 \mathbf{f} = -\frac{|q|}{r(1 + R_{I+90})}$$

(10)

或

$$\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial n^2} = -\frac{|q|}{r(1 + R_{I+90})}$$

(11)

從 Hill 的異向性塑性原理可知，材料元素的 R 值與板片輥軋方向的角度 I 有關，並可以 R_0 、 R_{45} 及 R_{90} 表示如下：

$$R_I = \frac{R_0 R_{90} \cos^2(2I) + [R_{45}(R_0 + R_{90}) \sin^2(2I)]}{2(R_0 \sin^2 I + R_{90} \cos^2 I)}$$

(12)

而方程式(11)亦可以正交異向性參數來取代：

$$\bar{R} = \frac{(R_0 + R_{90} + 2R_{45})}{4}$$

(13)

則

$$\frac{\partial^2 \mathbf{f}}{\partial n^2} = -\frac{|q|}{r(1 + \bar{R})}$$

(14)

流線法(stream line method)，簡稱「SLM」，是將方程式(11)或(14)作積分。至於由流線和等位線所組成之區域 D 內的質量必須要平衡。因此，參考圖 3 可知，在 ij 及 kl 邊上的速度分別為 q_1 和 q_2 ，並假設在微小面積 $ijkl$ 中的源項強度 f 為常數值，則

$$\int_s \frac{\partial q}{\partial n} ds = \int_D f dD$$

(15)

其中 s 為區域 D 的邊界。將上式積分後，可得

$$q_1 s_1 - q_2 s_2 = fa$$

(16)

其中 a 為區域 D 之面積， s_1 和 s_2 分別為 ij 及 kl 的邊長。

三、方杯引伸之最佳化料片與實驗

3.1 流線法求多邊形稜柱杯最佳料片之步驟

利用流線法理論，則在多邊形稜柱杯引伸時，所須之最佳化料片將可經由向外疊代求得，其解析之步驟如下：

- (1) 首先設定參數值為疊代次數 1000 次及沖頭每次向下前進 0.02mm。
- (2) 定座標平面，將方杯沖頭輪廓外形作內外側均 80 等分，求得其座標值。
- (3) 如圖 4 所示，由 a、b、c、d 四點連成一四邊形，其中 \overline{ab} 、 \overline{cd} 分別與料片流動方向垂直，而四邊形面積則為考慮異向性時之勢能源(source)。
- (4) 利用下列理論式求得 \overline{ab} 邊之速度 q_2 。

$$q_1 s_1 - q_2 s_2 = fa$$
- (5) 疊代 1000 步後，求出沖頭沖程達 20 mm 時所須之最佳化料片外形如圖 5 所示

3.2 實驗設備與原理

本文以方杯引伸製程的實驗，來驗證「流線法」的理論與電腦程式之正確性。圖 6 為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、KEITHLEY 500A 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。

模具組件則包括有方形沖頭、沖模、壓料板及間隔環，其中，間隔環不僅在板片與壓料板間提供了 0.1mm 的間隙外，亦同時降低因摩擦效應所產生的影響。圖 7 所示為實驗之組合圖。圖 8 分別顯示實驗時所用之沖頭與沖模尺寸。而實驗所使用的材料為中國鋼鐵股份有限公司所提供的 JIS G3141 SPCCEN-SD (DDQ) 極低碳伸引伸鋼料板，板片厚度為 1.0mm，異向性材料參數 R_{0° 、 R_{45° 、 R_{90° ，分別為 2.39、2.53 及 3.34，則可計算出來正交異向性 \bar{R} 為 2.70。經由上述實驗設備與模具，其實驗程序敘述如下

- (1) 首先將金屬板料以線切割機依圖 5 所預測之最佳化料片外形下料。
- (2) 將模具仔細地組裝在液壓成形機上，且沖頭與沖模均藉由其模具上的刻化線作中心校正。
- (3) 在料片、沖頭及沖模表面均勻地塗抹一層硬脂酸鋅粉 [$Zn(C_{18}H_{35}O_2)$] 薄膜，不僅可減少金屬板片與模具接觸面間的摩擦，更可增加模具的壽命。
- (4) 將壓料板的壓力設定為 50Kg/cm^2 ，沖頭速度設定為 2.0mm/sec 。
- (5) 經由資料擷取設備記錄沖頭衝程對沖頭負載的關係及時間，並使用雷射印表機將沖頭衝程對沖頭負載的關係輸出。

四、有限元素法分析

由於 ANSYS 5.6 所提供模型之建構，係由點、線、面體之下向上建構法，以及體、面、線、點之上向下建構法，並無參數式建構法，因此本文採用 Pro/E 軟體中的 Surface 指令，依照所設計模具之尺寸，建構出沖頭、壓料板、母模及最佳化料片的 3-D 實體模型。之後將它們 Export 成為 IGES 檔，匯入於 ANSYS 之中。由於模具為對稱關係，因此每部份只擷取 1/4 來作分析。

由於方杯引伸是屬於大變形之彈 - 塑性有限元素分析。所以我們使用適用於 LS-DYNA 的 SHELL163 殼元素作為元素進行分析。

SHELL163 包含了四個節點，其具有彎曲及薄膜特性。與平面同方向及法線方向之負載皆可承受。此元素上的節點各具有 12 個自由度，分別是：在 X、Y、Z 方向上的位移、速度及加速度，還有在 X、Y、Z 軸上的旋轉。

另外，剛性矩陣則採用 Belytschko-Wong-Chiang 所提出的理論，因為它可以有效、正確解決 warping 問題。而對於其他參數，我們設定形狀因子為 5/6、積分點為 3 點、元素厚度在四個點上均為 1mm。

在模型分割方面，沖頭分割 740 個元素 835 個節點、壓料板分割 100 個元素 120 個節點、料片分割為 1200 個元素 1260 個節點、母模分割 230 個元素 285 個節點。分別如圖 9 至圖 12 所示。

網格分割後，設定材料參數如下

浦松比 (Poisson's ratio) = 0.3

密度 (Density) $DENS=8.0 \times 10^{-4} \text{ kg/mm}^3$

料片之楊氏係數 $E=2.1 \times 10^5 \text{ Mpa}$

引伸過程中，由於材料呈塑性變形，在應力 - 應變曲線中屬於非線性，故材料在此時的曲線必須用數個線段連結成一曲線。線段的求法為先設定應變點再帶入下列公式之中，算出其應力值。本文抓取 9 個應變點，並求出應力值，構成表 1。

$$=516.54 (0.00639 + \frac{\epsilon}{p})^{0.232}$$

其邊界條件如圖 13 所示。其中，雙箭號為旋轉拘束，單箭號為位移拘束。在 X 軸上的節點為 X 和 Z 方向旋轉拘束，Y 方向為位移拘束；Y 軸上的節點為 Y 和 Z 方向旋轉拘束，X 方向為位移拘束。

五、結果與討論

本節係將所求得之最佳化料片做方杯引伸之有限元素法模擬，同時將其數值與實驗之結果比較，以驗證本文所建立之多邊形稜柱杯引伸之最佳化料片程式之可信度及準確性。

5.1 模擬之料片變形履歷

圖 14 至圖 17 所示乃料片在沖頭衝程達 12mm、16mm、20mm 及 24mm 時，最佳料片引伸時之變形幾何外觀。圖中顯示料片被沖頭平滑的沖入模穴內，同時在衝程達 20mm 方杯直邊與半圓處之料片與模具相對應部位之距離均能保持一致之情況。衝程達 24mm 時，料片幾乎已被完全引伸進入模穴，除了在直線與圓弧交界處之料片具有些微皺摺外，其餘部份均能與模具貼合。

5.2 模擬之應力與應變

圖 18 至圖 25 所示係料片在沖頭到達上述衝程時，平面應變最佳料片之應力及塑性應變之分佈圖，由於在元素積分時，料片厚度取 3 個積分點，因此在展示時取其中間層之應力及塑性應變為代表，在 45° 方向之圓弧處板片承受彎曲與拉伸變形，因此其應力與塑性應變均明顯為其最大值。至於衝程達 24mm 時，則因料片已被大致引伸進入模穴，因此最大應力轉而發生於杯頂部分。

5.3 引伸後方杯之高度

圖 26 所示為最佳料片 引伸後方杯高度分佈量測分佈之結果，圖中顯示引伸後方杯高度之變化並不顯著，約在 22.7mm 至 23.5mm 間變化，此即意謂流線法獲得最佳料片外形之預測。由於沖頭端之圓弧半徑為 6mm 外圓角，故實驗所得的方杯高度比流線法預測之高度多出約 3mm。

5.4 實驗後之方杯

照片 1 顯示使用流線法求得正交異向性板材之沖程達 15mm 及 20mm 時，最佳料片經過完全引伸後所得方杯之照片，由照片觀察可知，杯口頂部皆相當地規則且平整。

六、結論

本文係考慮異向性板材方杯引伸最佳料片之研究，將材料異向性的影響，視為勢能流觀念中之源項 (source) 後，發展一套實用的流線法理論來預測不規則稜柱引伸時之最佳料片。並經由有限元素法及實驗之驗證，塑性分析中所得之變形幾何外觀以及應力與應變分佈顯示 ANSYS LS-DYNA 能有效地解析材料非線性與幾何非線性之金屬成形製程，同時實驗時方杯之外形與高度皆得到一致性，而板材異向性源項被考慮時，最佳料片輪廓有著明顯的差異性，亦表示了材料異向性之影響不可忽視。然而，在稜柱杯引伸中，金屬板片與模具介面間的摩擦效應亦扮演著重要角色。最直接的解決方法是將源項疊加入勢能流理論中，至於如何將此摩擦源項模式合理的構建入流線法中，實為未來值得努力之方向。

七、誌謝

本文承蒙淡江大學機械與機電工程學系李經倫老師在實驗上提供設備與實作，以及研究助理黃溢盛在文件與圖文資料上之整理，深表感謝。

八、參考文獻

1. Almetoglu, M., Kinzel, G and Altan, T., (1995) "Control of blank holder Force to Eliminate Wrinkling and Fracture in Deep-Drawing Rectangular Parts", Annals of the CIRP, Vol.44,pp.247-250.
2. Kawai, N., Mori, T., Hayashi, H., and Kondoh, F., (1987), "Effects of punch Cross-Section on Deep Drawability of Square Shell of Aluminum Sheet", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.109,pp.355-361.
3. Karima, M., (1989), "Blank Development and Tooling Design for Drawn Parts Using a Modified Slip Line Field Based on Approach", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol.111, No.4, pp.345-350.
4. Liu, F., and Sowerby, R., (1991), "The Determination of Optimum Blank Shapes When Deep Drawing Prismatic Cups", Journal of Material Shaping Technology, Vol.9, No.3, pp.153-159.

91 年 09 月 04 日投稿

91 年 09 月 20 日接受

表 1、材料之應力 - 應變曲線座標點

應變	0.0	0.004	0.012	0.024	0.048
應力	159.948	179.043	204.403	229.666	262.872
應變	0.192	0.384	0.576	0.8	
應力	354.918	415.271	455.652	491.38	

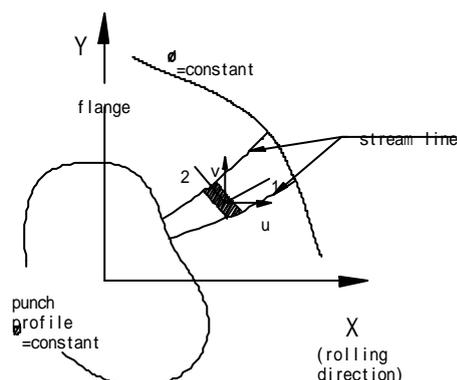


圖 1、勢能流與速率

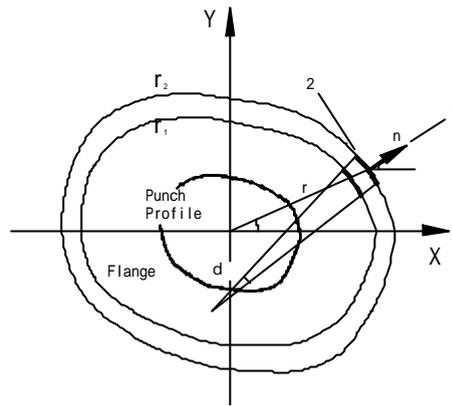


圖 2、不規則形沖頭輪廓與其勢能速率

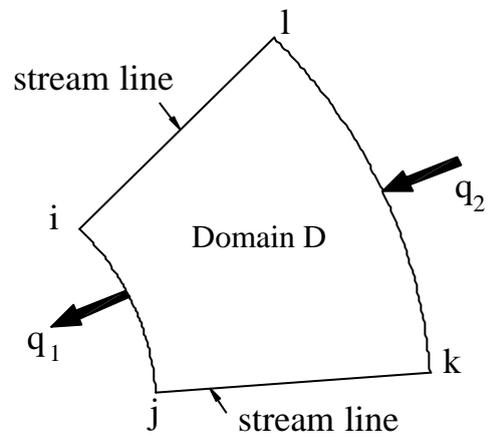


圖 3、體積控制與材料流動

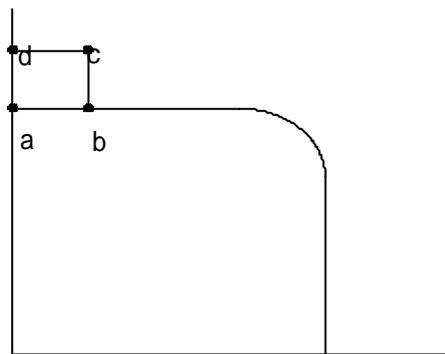


圖 4、疊代求解板片速度之四邊形元素

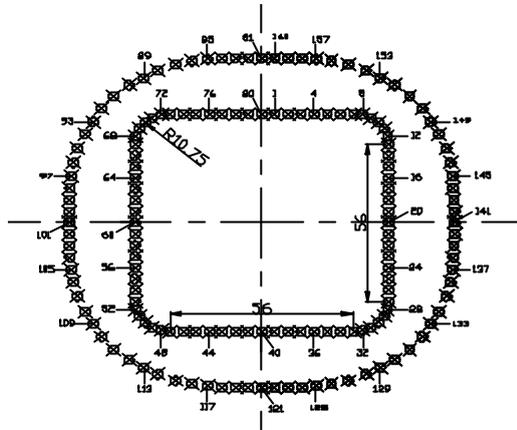


圖 5、最佳化料片之座標點

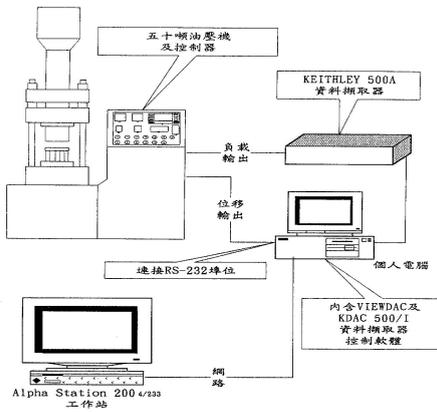


圖 6、實驗設備的整體系統配置圖

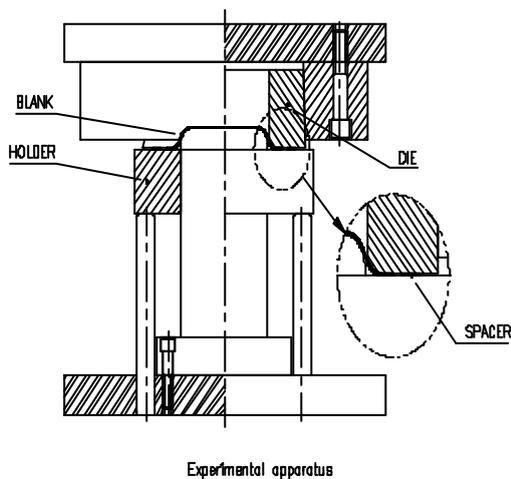


圖 7、實驗之組合圖

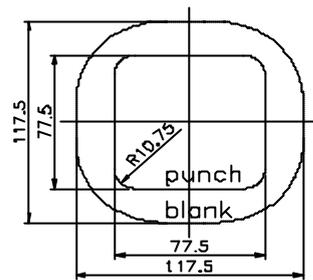
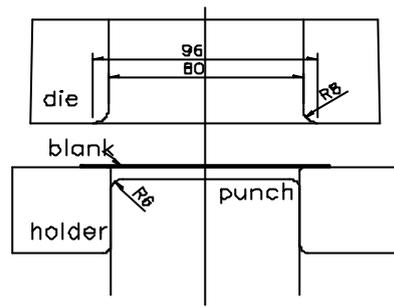


圖 8、實驗時所用之沖頭與沖模尺寸

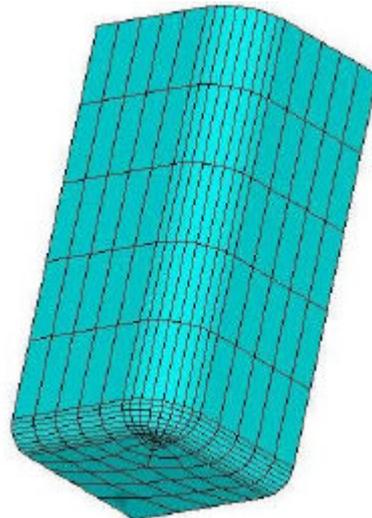


圖 9、沖頭的網格圖

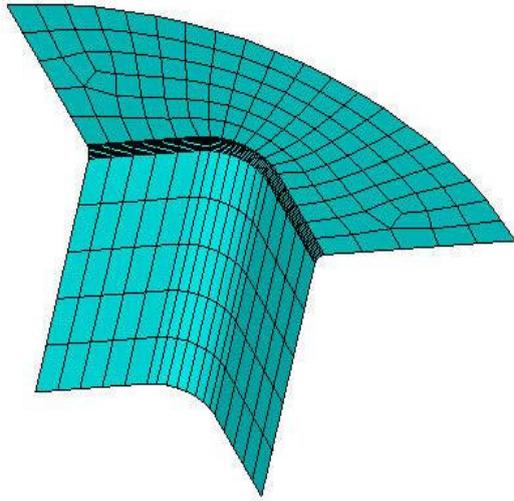


圖 10、母模的網格圖

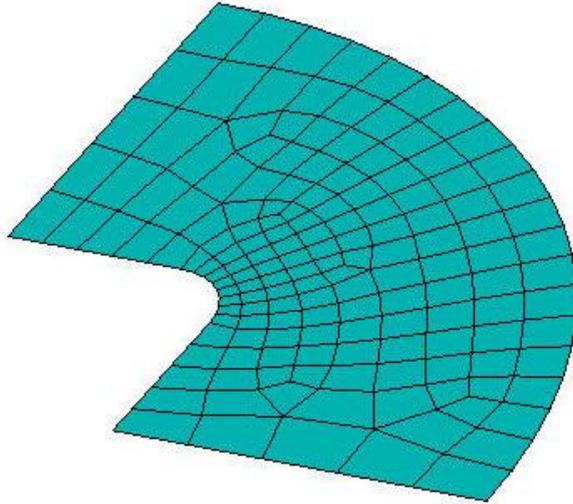


圖 11、壓料板的網格圖

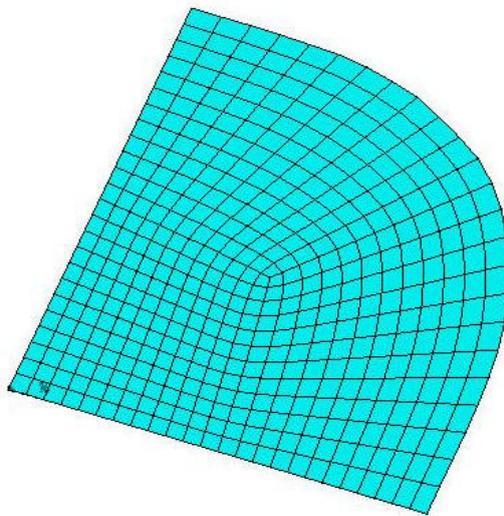


圖 12、料片的網格圖

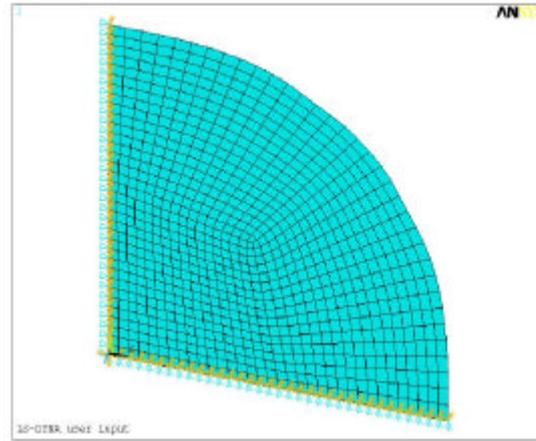


圖 13、料片之邊界條件

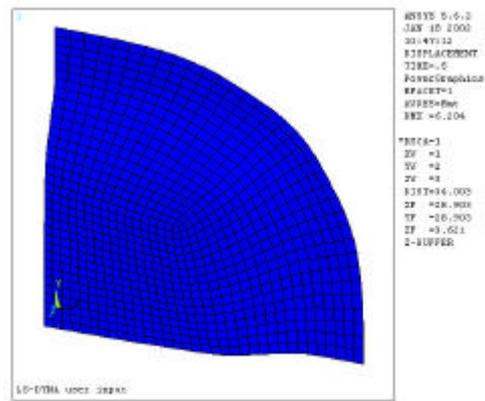


圖 14、料片在冲程 5mm 時的變形圖

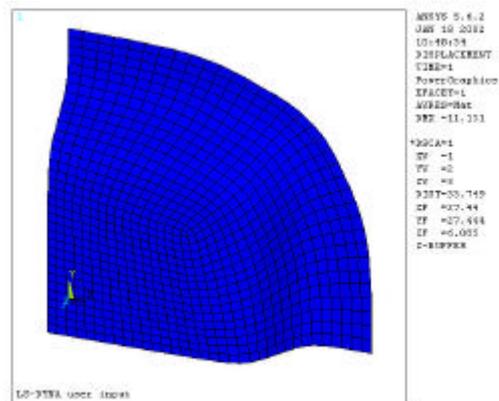


圖 15、料片在冲程 10mm 時的變形圖

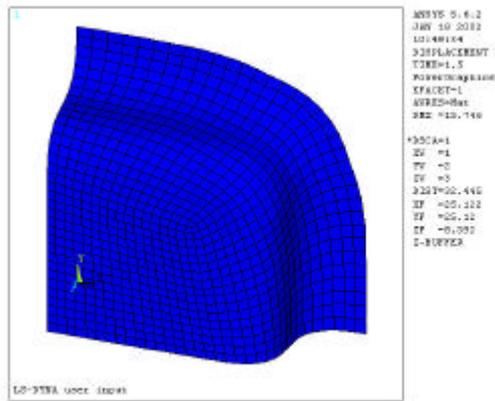


圖 16、料片在冲程 15mm 時的變形圖

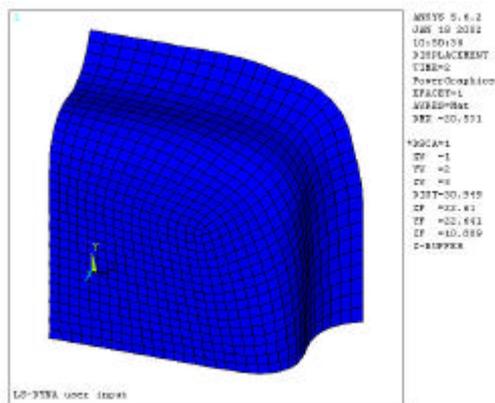


圖 17、料片在冲程 20mm 時的變形圖

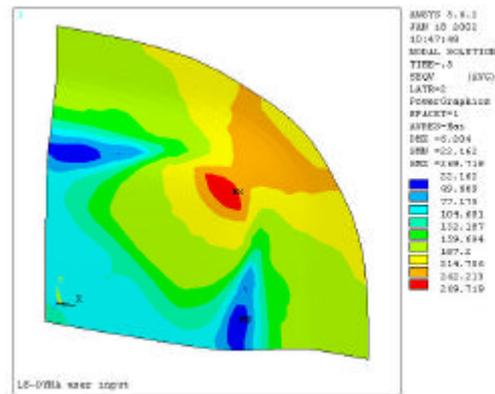


圖 18、料片在冲程 5mm 時的應力圖

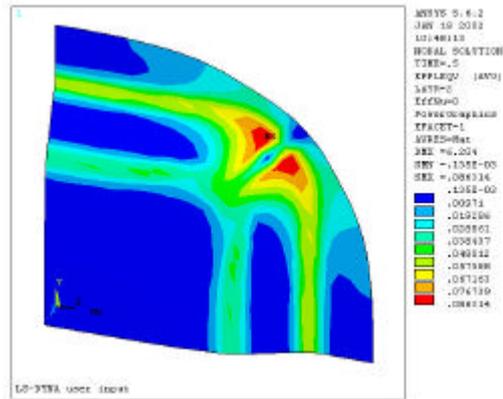


圖 22、料片在冲程 5mm 時的應變圖

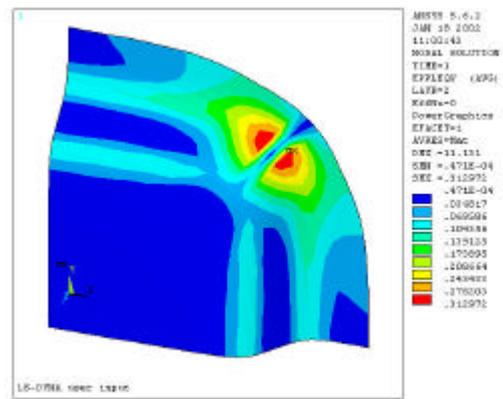


圖 23、料片在冲程 10mm 時的應變圖

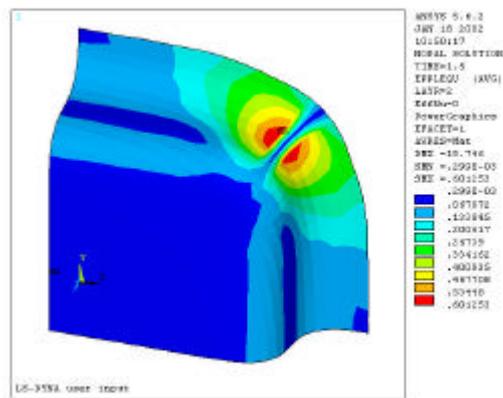


圖 24、料片在冲程 15mm 時的應變圖

