

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫二：金屬板材深引伸成形極限之三維有限元素分析

(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-032-006-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

計畫主持人：李經綸

共同主持人：葉豐輝

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 31 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫期中報告

金屬成形極限之三維有限元素分析軟體開發與整合應用(1/3)--子計畫二
金屬板材深引伸成形極限之三維有限元素分析

A Study of forming limit in deep drawing process of metal sheet by the 3-D FEM analysis

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-032-006

執行期間：92年8月1日至93年7月31日

計畫主持人：李經綸 副教授

共同主持人：葉豐輝 副教授

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：淡江大學機械與機電工程學系

中華民國 九十三年五月三十一日

行政院國家科學委員會專題研究計畫期中報告

金屬成形極限之三維有限元素分析軟體開發與整合應用(1/3)--子計畫二

金屬板材深引伸成形極限之三維有限元素分析

A Study of forming limit in deep drawing process of metal sheet by the 3-D FEM analysis

計畫編號：NSC 92-2212-E-032-006

執行期限：92年8月1日至95年7月31日

第一年：92年8月1日至93年7月31日

主持人：李經綸 副教授 淡江大學機械與機電工程學系
共同主持人：葉豐輝 副教授 淡江大學機械與機電工程學系
計畫參與人員：蔡毅璋 淡江大學機械與機電工程研究所碩士班
計畫參與人員：陳紹平 淡江大學機械與機電工程研究所碩士班
計畫參與人員：陳振德 淡江大學機械與機電工程研究所碩士班

E-mail: chinglun@mail.tku.edu.tw

摘要

本計畫發展出一套增量型彈塑性大變形之三維動態顯函有限元素分析程式，用以模擬圓杯之深引伸成形製程。藉由三維動態顯函有限元素法的數值模擬，分析圓杯引伸，以得到引伸過程之全部變形歷程、沖頭負荷與沖頭位移之關係、應力與應變之分佈、圓杯高度及極限引伸比等。

關鍵詞：動態顯函有限元素法、彈塑性、深引伸、極限引伸比

Abstract

This project develops an elasto-plastic large deformation dynamic explicit finite element program to simulate the deep drawing process of cylindrical cup. The data of deformation histories from deep drawing process can be obtained by using the three-dimensional dynamic explicit finite element simulation. The simulation results include deformation diagrams in different forming stages, relationship between the punch load and the punch displacement, distribution of stress and strain, cup heights, and the limit drawing ratio and so on.

Keywords: dynamic explicit FEM, elasto-plastic, deep drawing, limit drawing ratio

一、緣由與目的

任何產品於市場激烈的競爭下，其成本、品質與安全性皆受到高度的重視，同時也成為工業界與學術界改善及研究的方向。對於製造技術的發展重點在於建立工件的最佳生產製程，而板金深引伸成形技術為製造產業中重要的加工技術之一。板金深引伸成形製程乃是將沖模與壓料板間之料片，以沖頭引伸進入模穴而成形。為了確保引伸得以成形，在引伸製程中有關製程參數間的關係、材料性質及摩擦效應，皆必須作深入的探討，而於深引伸製程中，若工件的引伸比過大，將導致工件無法順利成形，或於成形過程中因拉伸應力的影響而導致破裂，為了簡化加工製程，以及降低生產成本，故將料片設計在極限引伸比(Limit Drawing Ratio, LDR)的條件下進行引伸成形，常成為工業界所迫切需求的目標之一。近年來對於極限引伸比方面之相關研究頗多，如El-Domiaty與Shabara [1]使用流體壓力充滿於模穴、料片及壓料板之間進行圓杯深引伸成形製程，當徑向壓力增加時，將可提高其極限引伸比，並且降低加工能量的消耗。Huang與Cheng[2]探討固態潤滑劑(硬酯酸鋅粉)與液態潤滑劑(壓板油)，對金屬深引伸成形製程中之料片厚度分佈、極限引伸比及衝頭負荷所造成的影響，經由實驗結果與數值

模擬結果的比較，顯示固態潤滑劑比液態潤滑劑有較佳的潤滑效果。Leu[3]提出一個簡易且實用的方法來計算並預測圓杯引伸成形製程之極限引伸比與最大衝頭引伸負荷，且探討正交異向性值及應變硬化指數值對於極限引伸比的影響，經由數值計算與實驗結果比較後，可得知正交異向性值對於極限引伸比的影響較大，而應變硬化指數值對於極限引伸比，亦具有某種程度的影響。Takuda與 Hatta[4]以剛塑性有限元素法分析板金成形製程，並利用延性破裂準則去預估商業用鋁板材對於深引伸成形製程之成形極限，其結果顯示，鋁板材具有較高的引伸性，而拉伸性較低，且發現鋁板材之引伸破裂初始位置及成形極限可完全透過有限元素分析程式和延性破裂準則的結合來預測。Harpell等[5]使用動態顯函有限元素分析程式 (LS-DYNA) 模擬圓杯引伸成形製程，並預測鋁合金料片之極限引伸比。Yamamoto等[6]以微量碳化矽顆粒之混合，來強化超塑性鋁合金複合材料，並藉由深引伸成形製程探討此複合材料的成形性，實驗結果顯示當碳化矽的顆粒大小在直徑20 μm，且含量在25mass%時，其引伸比在局部加熱的冷加工深引伸情況下可達到2.18，然而當碳化矽的含量超出30mass%時，其引伸比將降至1.5，由此結果顯示，超塑性鋁合金複合材料所混合碳化矽的顆粒大小與含量的多寡均會影響其在深引伸成形製程的極限引伸比。Tirosh等[7]於深引伸成形製程時，施加流體壓力於料片之外緣，以減少徑向應力，及接觸介面間之摩擦力，並藉由製程溫度與操作速率之控制，以提昇深引伸成形製程之引伸比。

此外，有限元素分析軟體發展至今已能完整模擬板金成形之製程，並以電腦輔助工程應用於成形工件外形之預測。然而在板金成形的三維有限元素分析時，因工件與模具接觸介面間判斷之複雜性，此時若使用隱性解法將會因收斂性的問題而耗費大量的計算時間，若改採動態顯函解法則沒有Newton-Raphson的疊代收斂問題，將可有效縮短求解所需的時間。因此本年度之計畫將發展動態顯函有限元素法，結

合材料之彈塑性理論，發展出一套增量型彈塑性大變形之三維動態顯函有限元素分析程式，並與其他子計畫所發展的程式進行整合與測試，再以此整合程式，模擬圓杯深引伸成形製程。

二、基本理論

2.1 動態顯函有限元素的定義與計算程序概述如下

1. 定義：

- (1) 依據有限元素分割的概念，將結構體的位移與速度場離散化到有限元素的節點上。
- (2) 將應變 - 位移關係式和材料構成式依據能量法的推導，得到有限元素之運動方程式。

2. 計算程序：

- (1) 利用電腦輔助繪圖軟體繪製出模具與料片的幾何外形，並進行有限元素網格分割，給定邊界條件，完成前處理。
- (2) 利用數值分析中央差分法解運動方程式的時間增量，以求得節點的位移與速度。
- (3) 再根據時間增量步驟所求得節點的位移與速度，利用應變 - 位移關係式與材料的構成式以求解元素內的應變和應力。
- (4) 重複步驟(2)和(3)的計算程序，直到整個變形過程分析完成為止。

圖(一)所示為動態顯函有限元素分析之流程圖。

2.2 材料的構成式

假設材料為等向彈性與等向加工硬化，若採用Hill的異向性降伏理論，則連續性流動法則可表示如下，

$$f = \frac{1}{2(F+G+H)} \{ F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2 \} - \frac{1}{3}\bar{\sigma}^2 = 0 \quad (1)$$

式中 $\bar{\sigma}$ 為等效應力， F 、 G 、 H 、 L 、 M ，及 N 為材料的異向性參數，而於應力空間內其降伏曲面的單位法線向量為

$$n_{ij} = \frac{Z_{ij}}{\sqrt{Z_{mn}Z_{mn}}} ; Z_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} \quad (2)$$

此外，應變速度張量是由彈性部分和非彈性(塑性與黏塑性)部分相加所得，而非彈性應變速度張量 $D_{ij}^{(ie)}$ 可表示如下

$$D_{ij}^{(ie)} = \begin{cases} \frac{9Z_{mm}\sigma'_{mm}}{4H'\bar{\sigma}^2} Z_{ij} & \text{塑性} \\ \gamma \langle \Phi(\bar{\sigma}) \rangle \frac{Z_{ij}}{\|Z_{mm}\|} & \text{黏塑性} \end{cases} \quad (3)$$

式中 H' 是由單軸拉伸的應力 - 應變關係式所得 $d\sigma/d\varepsilon$ 的切線係數， γ 為黏性係數。 $D_{ij}^{(ie)}$ 於塑性應變時為 D_{ij}^p ，在黏塑性應變時則為 D_{ij}^{vp} ，而 $\langle \Phi(\bar{\sigma}) \rangle$ 在採用正定值指數關係時可表示如下

$$\langle \Phi(\bar{\sigma}) \rangle = \begin{cases} \left(\frac{\bar{\sigma}-Y}{Y}\right)^n, & \text{當 } \bar{\sigma}-Y > 0 \\ 0, & \text{當 } \bar{\sigma}-Y \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

最後，可得到滿足此兩種材料模式的速度形構成關係式

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \left(C_{ijkl}^e - \alpha \frac{C_{ijst}^e C_{klmn}^e Z_{mn}}{C_{mns}^e Z_{ij} Z_{mn} + 4H'\bar{\sigma}^2/9} \right) D_{kl} = C_{ijkl}^{ep} D_{kl} & \text{彈塑性} \\ C_{ijkl}^e \left(D_{kl} - \gamma \langle \Phi(\bar{\sigma}) \rangle \frac{Z_{ij}}{\|Z_{mn}\|} \right) & \text{彈黏塑性} \end{cases} \quad (5)$$

當負荷增加時，式中的 $\alpha = 1$ ，而於除荷或中立時為 $\alpha = 0$ 。對於等向性塑性材料而言， $F = G = H = 1$ ， $L = M = N = 3$ ，則材料之構成關係式可改寫如下

$$\tau_{ij} = \begin{cases} 2G(\delta_{ik}\delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu}\delta_{ij}\delta_{kl}) - \alpha \frac{9G\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}^2(H'+3G)} D_{kl} & \text{彈塑性} \\ C_{ijkl}^e \left(D_{kl} - \gamma \langle \Phi(\bar{\sigma}) \rangle \frac{3\sigma'_{kl}}{2\bar{\sigma}} \right) & \text{彈黏塑性} \end{cases} \quad (6)$$

2.3 動態顯函有限元素分析

2.3.1 有限元素離散化

動態顯函有限元素法之動量虛功原理方程式，可表示如下

$$\int_V \rho \delta \dot{u}_i \delta \dot{u}_i dV + \int_V c_{ij} \delta \dot{u}_i \delta \dot{u}_j dV + \int_V \sigma_{ij} \delta u_{i,j} dV = \int_V \rho b_i \delta u_i dV + \int_S \bar{t}_i \delta u_i dS \quad (7)$$

式中 σ_{ij} 為Cauchy應力， V 為體積， S 為表面積， ρb_i 為慣性力， c_{ij} 為阻滯力， \bar{t}_i 為表面力或接觸力。

圖(二)所示為推導有限元素運動方程式所採用的八節點立方體元素，圖中每個節點各有三個自由度，而元素內的座標與速度場，依據自然座標 ξ_1, ξ_2, ξ_3 的線性關係離散化後可表示如下

$$x_i = \sum_{\alpha=1}^N N^\alpha x_i^\alpha \quad (8)$$

$$u_i = \sum_{\alpha=1}^N N^\alpha u_i^\alpha \quad (9)$$

$$N^\alpha = \frac{1}{8} (1 + \xi_1 \xi_1^\alpha) (1 + \xi_2 \xi_2^\alpha) (1 + \xi_3 \xi_3^\alpha) \quad (10)$$

式中 x_i^α, ξ_i^α 和 u_i^α 分別表示節點 α 的固定直角座標、自然座標和速度的分量，而 $N^\alpha(\xi_1, \xi_2, \xi_3)$ 為形狀函數，其中 α 的範圍是由1到8。速度梯度張量定義如下

$$L_{ij} = u_{i,j}^\alpha = \frac{\partial u_i^\alpha}{\partial \xi_m} \frac{\partial \xi_m}{\partial x_j} = \sum_{\alpha=1}^8 B_j^\alpha u_i^\alpha \quad (11)$$

而應變速度張量為

$$D_{ij} = \frac{1}{2} (L_{ij} + L_{ji}) = \sum_{\alpha=1}^8 \frac{1}{2} (B_j^\alpha \delta_{ik} + B_i^\alpha \delta_{jk}) u_k^\alpha \quad (12)$$

2.3.2 動態顯函有限元素之運動方程式

將動量虛功原理方程式經有限元素離散化，並忽略體積力後可得

$$\sum_{\alpha=1}^8 \left(\int_{V_e} \rho N^\alpha N^\beta dV \right) u_i^\alpha + \sum_{\alpha=1}^8 \left(\int_{V_e} c N^\alpha N^\beta dV \right) u_i^\alpha + \int_{V_e} B_j^\beta \sigma_{ij} dV = \int_{S_e} N^\beta \bar{t}_i dS \quad (13)$$

$$M u_i + C u_i + f = p \quad (14)$$

$$\sum_{\alpha=1}^8 m^{\alpha\beta} u_i^\alpha + \sum_{\alpha=1}^8 c^{\alpha\beta} u_i^\alpha + f_i^\beta = p_i^\beta \quad (15)$$

式(13)的積分範圍為單一元素，若是對物體整體而言，則依照上述的步驟，將可求解整體的有限元素運動方程式如下

$$M u + C u + F = P \quad (16)$$

$$\text{其中 } M = \sum \int_V \rho N^T N dV \quad (17)$$

$$C = \sum \int_V c N^T N dV \quad (18)$$

$$F = \sum \int_V B^T \sigma dV \quad (19)$$

$$P = \sum \int_S N^T \bar{t} dS \quad (20)$$

式中 M 為質量矩陣， C 為阻滯矩陣， F 為節點內力向量， P 為節點外力向量， N 為形狀函數。

2.4 接觸力的推導

節點外力向量 P 可利用式(20)之表面力定義導出。但是，若因模具所產生的塑

性變形或是因剛體壁的接觸，而必須依據接觸力作用於物體上的應力、接觸面的面積及法線或切線方向的變化關係下，要計算出節點外力就顯得相當困難，而此類問題被稱為接觸非線性問題。在動態顯函有限元素法中，將導入penalty法則，儘量採取簡便的程序，以求解滿足與模具或剛體壁的接觸邊界條件，其計算步驟如下所示

(1) 接觸之偵測

偵測節點 α 是否位於模具之內部。

(2) 接觸之法線力

圖(三)顯示計算節點 α 進入模具之陷入量 g 的值，將此值乘上penalty值，可決定法線方向的接觸力 P_n ，如下所示

$$P_n = \psi \|g\| n \quad (21)$$

若利用陷入量 g ，將可以推出垂直方向 g_z 與法線方向 g_n ，及到模具表面之最短距離 g_m ，如圖(三)所示。雖然與模具表面外形的描述有關，但是一般為了求出最短距離而必須反覆的計算，因此，經常採用規定方向的陷入量來計算。式(21)中的 ψ 是Penalty值，當此值很大時雖然可以提高解的精確度，但是在計算時可能會發散，所以必須縮小時間增量。

Penalty值的定義如下所示

$$\psi = \frac{A_e E}{l} \quad (22)$$

式中 A_e 為元素之有效面積， l 為元素之有效最大長度， E 為模具的縱彈性係數。

(3) 接觸之切線力

與模具接觸之節點力分為法線力與切線力，其中切線力為摩擦阻力，由於在成形過程中，節點與模具間有可能產生滑動或停滯，為了克服此節點接觸摩擦力之問題，在庫侖摩擦法則之假設下，將以下式計算節點摩擦力 P_t

$$P_t = \begin{cases} F_t, & (|F_t| \leq \mu \|P_n\|) \\ \mu \|P_n\| \frac{F_t}{|F_t|}, & (|F_t| > \mu \|P_n\|) \\ F_t - m \mathbb{E}, & (|F_t - m \mathbb{E}| \leq \mu \|P_n\|) \\ -\mu \|P_n\| \frac{\mathbb{E}}{\|\mathbb{E}\|}, & (|F_t - m \mathbb{E}| > \mu \|P_n\|) \\ -\mu \|P_n\| \frac{\mathbb{E}}{\|\mathbb{E}\|}, & (\mathbb{E} \neq 0) \end{cases} \quad (23)$$

2.5 運動方程式的數值解法

欲求得時間 $t + \Delta t$ 時之解，可將速度 \dot{u} 與加速度 \ddot{u} 分別利用位移 u 對時間 t 的中央差分法表示如下

$$\dot{u} = (u^{t+\Delta t} - u^{t-\Delta t}) / 2\Delta t \quad (24)$$

$$\ddot{u} = (u^{t+\Delta t} - 2u^t + u^{t-\Delta t}) / \Delta t^2 \quad (25)$$

將式(24)與式(25)代入式(16)後，化簡可得

$$u^{t+\Delta t} = (M / \Delta t^2 + C / 2\Delta t)^{-1} \times [P - F + M(2u^t - u^{t-\Delta t}) / \Delta t^2 + Cu^{t-\Delta t} / 2\Delta t] \quad (26)$$

則 $t + \Delta t$ 時之位移增量為

$$\Delta u = u^{t+\Delta t} - u^t \quad (27)$$

其中 Δt 取決於

$$\Delta t_{cr} = \frac{L_e}{\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}} \quad (28)$$

式中 L_e 為特徵長度， E 為材料之楊氏係數， ν 為浦松氏比，因此，若能維持分析之正確性，可酌量的放大質量密度因子，或加快速度因子，以減少分析所需時間，為動態顯函有限元素法之最大優點。

三、數值模擬分析

應用本計畫所發展之三維動態顯函有限元素程式分析圓杯深引伸成形製程，圓杯深引伸的相關模具幾何尺寸，如圖(四)所示。分析時之前處理是採用I-DEAS軟體依照模具尺寸，建構出三維實體模型，並針對模具之接觸面作有限元素網格分割，以定義程式所需之模具幾何外形，由於模具為軸對稱之關係，因此所有模具僅擷取四分之一來作分析，圖(五)顯示圓杯深引伸成形製程的模具組裝配置圖。料片之半徑為60mm，有限元素網格分割是採用八節點之實體線性元素，在網格分割後，元素之節點總數為651個，元素總數為384個，彈性棒有434個，圖(六)顯示料片之網格分割及邊界條件設定。材料之機械性質是由中國鋼鐵股份有限公司所提供，其材料參數如下所示

應力 - 應變特性曲線方程式

$$\bar{\sigma} = 452.0(0.00783 + \bar{\epsilon}_p)^{0.2295} \text{ MPa}$$

料片原始厚度： $t = 0.80\text{mm}$

降伏應力： $\sigma_y = 148.5\text{MPa}$

楊氏係數： $E = 2.1 \times 10^5$ MPa

浦松氏比： $\nu = 0.3$

將上述資料輸入本計畫所發展之三維動態顯函有限元素分析程式中進行計算，待分析結束後再將結果匯入I-DEAS軟體作後處理的輸出。

四、結果與討論

圖(七)顯示圓杯深引伸成形製程之料片變形歷程圖，圖中(a)、(b)、(c)，及(d)分別表示原始料片、沖頭衝程達10mm、20mm，及30mm之料片變形圖。從圖中可以看出，隨著沖頭衝程的增加，料片被平滑的帶入沖模之模穴中，且位於料片外緣周圍的部份，也沒有皺摺現象的發生。

圖(八)顯示當沖頭衝程達30mm時，圓杯深引伸成形製程之料片的最大主應力分佈圖，圖中之應力單位為MPa。圖(a)與圖(b)分別顯示圓杯內部與外部之最大主應力分佈圖，圖中料片位於杯底圓角處之最大主應力，由於受到沖頭圓弧角處之彎矩作用下，在杯底圓角處之內部承受壓縮應力而在圓角處之外部則是承受拉伸應力。

五、結論

本計畫已如期將增量型彈塑性大變形之三維動態顯函有限元素分析程式，結合材料之彈塑性理論，並與其他各子計畫所建構之程式進行整合，且完成金屬板材深引伸成形製程之初期測試。此外，亦完成IDEAS軟體與本計畫分析程式之整合應用，及完成動態顯示之視覺化科學計算函式庫繪圖顯示軟體MATFOR之安裝與即時監控之測試。然而為使本程式之可靠度提高，且達到成形破裂分析之目標，尚需要確切的實驗再加以驗證，因此下個年度的計畫，將針對成形極限之分析，與實驗所發生成形破裂之預估，加以修正本年度所發展程式尚未考量純熟的部分，以期望本程式能達泛用型之電腦輔助工程模擬分析軟體之目標。

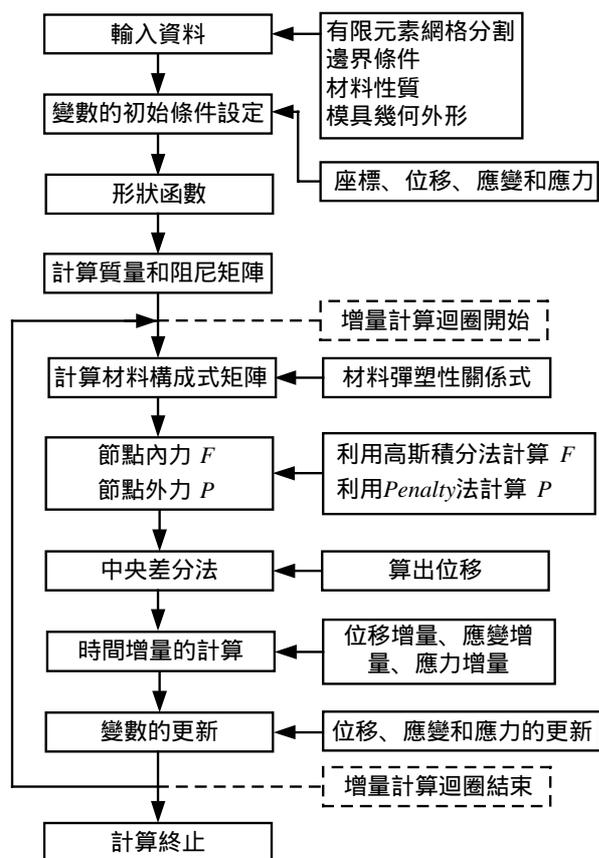
六、參考文獻

[1] El-Domiaty, A. and M. A. Shabara, "Improvement of deep drawability by

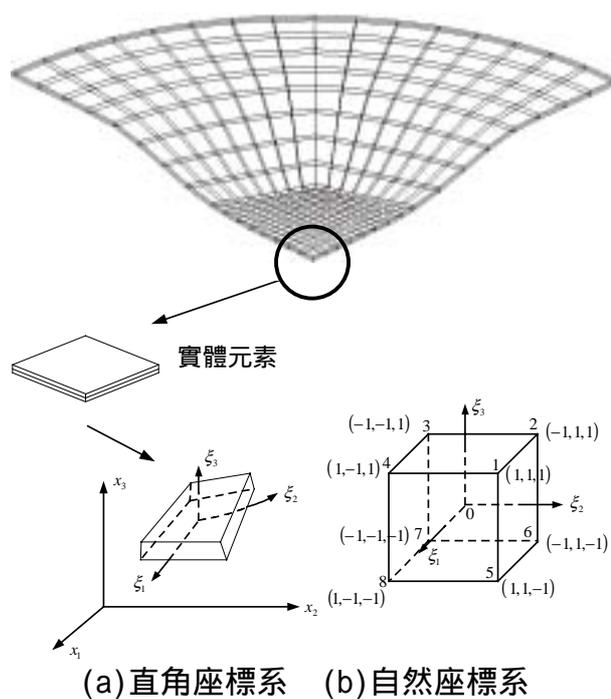
radially pressurized fluid," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 35, No. 5, pp.739-749 (1995).

- [2] Huang, Y. M. and J. W. Cheng, "Influence of lubricant on limitation of formability of cylindrical cup-drawing," *Journal Materials of Processing Technology*, Vol. 63, pp.77-82 (1997).
- [3] Leu, D. K., "Prediction of the limiting drawing ratio and the maximum drawing load in cup-drawing," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 37, No. 2, pp.201-213 (1997).
- [4] Takuda, H. and N. Hatta, "Numerical analysis of formability of a commercially pure zirconium sheet in some sheet forming processes," *Materials Science and Engineering*, Vol. 242, pp.15-21 (1998).
- [5] Harpell, E. T., M. J. Worswick, M. Finn, M. Jain, and P. Martin, "Numerical prediction of the limiting draw ratio aluminum alloy sheet," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 100, pp.131-141 (2000).
- [6] Yamamoto, H., H. Nishimura, and A. Miyazaki, "Formability of superplastic aluminum alloy composites reinforced with SiC particles," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 101, pp.198-208 (2000).
- [7] Tirosh, J., A. Shirizly, D. Ben-David, and S. Stanger, "Hydro-rim deep-drawing processes of hardening and rate-sensitive materials," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 42, pp.1049-1067 (2000).

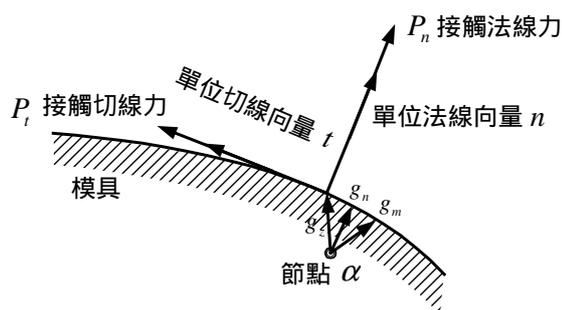
圖表



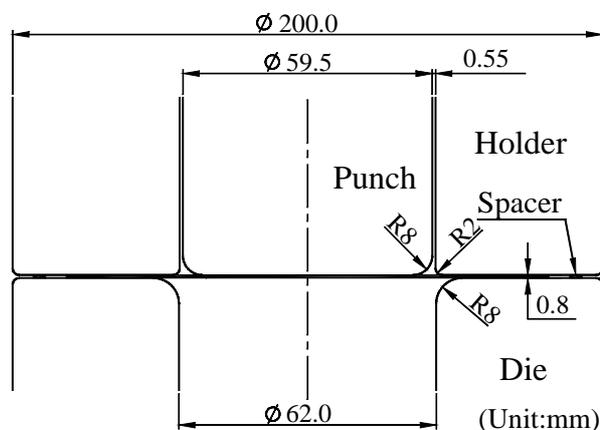
圖(一) 動態顯函有限元素分析之流程圖



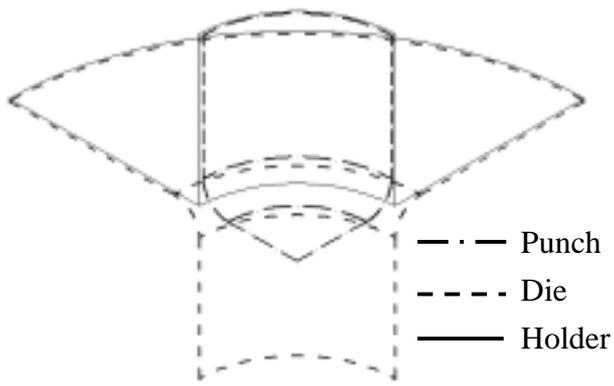
圖(二) 八節點實體元素之示意圖



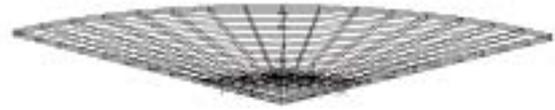
圖(三) Penalty法計算節點之外力



圖(四) 圓杯深引伸製程之模具幾何尺寸



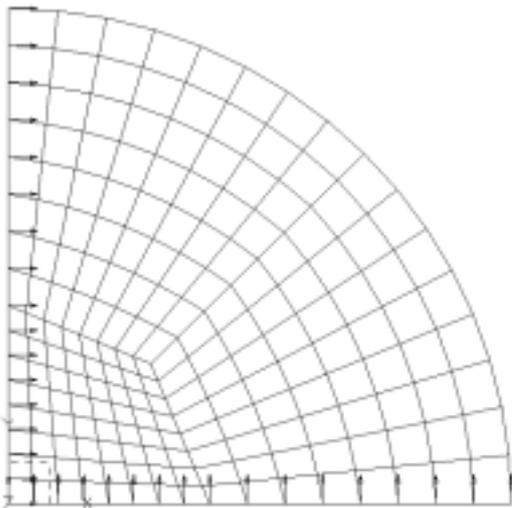
圖(五) 圓杯深引伸成形製程的模具配置圖



(a) 原始料片



(b) 沖頭衝程達10mm之料片變形圖



圖(六) 料片之網格分割及邊界條件設定

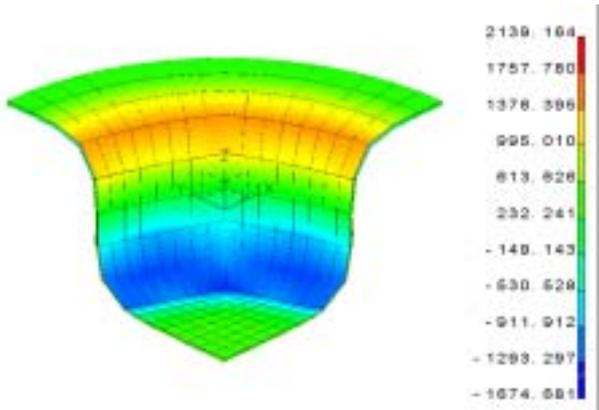


(c) 沖頭衝程達20mm之料片變形圖

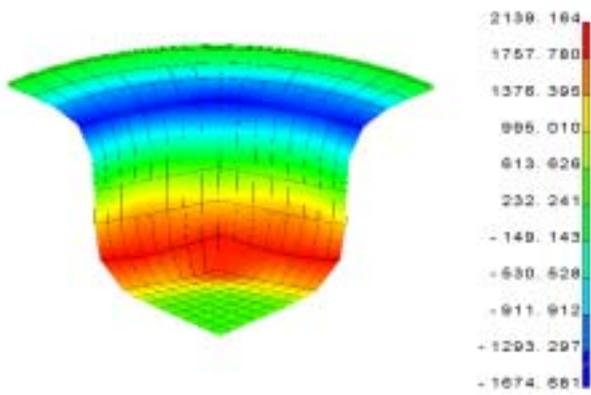


(d) 沖頭衝程達30mm之料片變形圖

圖(七) 圓杯深引伸成形之變形歷程圖



(a) 圓杯內部之最大主應力分佈圖



(b) 圓杯外部之最大主應力分佈圖

圖(八) 圓杯深引伸成形最大主應力分佈圖