

## 金屬桿件前擠製製程之有限元素分析

謝明為  
機械工程系

## 摘要

本研究之目的為針對金屬圓形桿件之前擠製製程進行模型設計及加工的模擬分析，其分析結果並與實驗結果之間進行比對以驗證此製程模擬分析的可行性。本研究係利用有限元素之軸對稱模型和依據彈塑性大變形-大應變理論所發展的三角形元素電腦程式來進行塑性變形的模擬分析，實驗部份則是將工業用純鋁棒在油壓機上通過擠製模具以得到實際位移與加工力量的關係。此項研究結果將被應用到相關模具設計及製造技術開發上，如車用火星塞本體的擠製製程技術的開發，以提升品質及效率。

關鍵字：前擠製、塑性變形、有限元分析

## 壹、緒論

## 一、研究動機

擠製(Extrusion)乃是將可塑性金屬或半固態金屬，以壓力迫使其通過一定形狀之模孔，以製成截面積較小且斷面均一的一種加工方法。由擠製所得成品，其優點有：

- (1) 具有良好加工表面。
- (2) 機械性質優良。
- (3) 尺寸精度高。
- (4) 產量大且費用低。
- (5) 對均一斷面製品，其長度不受限制。
- (6) 可製造各種形狀的製品。

綜合上述優點，故擠製方法成為近來工業上被廣泛使用的成型加工技術之一。

擠製的加工方法一般可分為以下幾種

(其圖形如圖 1 所示)：

- (a) 前擠製法(Forward Extrusion)
- (b) 後擠製法(Backward Extrusion)
- (c) 液靜壓擠製法(Hydrostatic Extrusion)
- (d) 衝擊擠製法(Impact Extrusion)

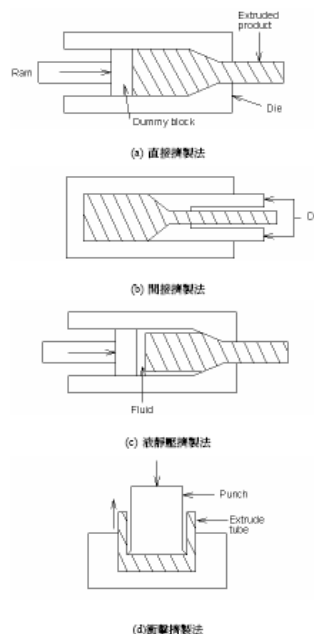


圖 1 擠製的加工方法

依加工過程中的加熱條件可分為冷擠製和熱擠製兩種。冷擠製的過程中，胚料處於常溫下加工，因此擠製時所需的擠製力較大，適合用於較軟、較小型之材料且斷面收縮

率較小的元件，其成品具有尺寸精度良好、機械性質高等優點。熱擠製加工是將材料加熱至再結晶溫度以上，因此具有可降低擠製壓力、適合製造較大尺寸的元件、可用於較大的斷面收縮率等優點【1】。本研究係針對冷擠製的製程進行探討，透過基本圓形鋁棒的擠製以自行發展的分析程式在個人電腦上來進行塑性變形的分析，同時結合實驗的驗證，一方面縮短建模、設計及分析時間；另一方面希望能培養系上參與同學的研究能力與實務經驗。亦即做好簡化製程、降低成本的工作，以提升品質及增加效能，同時，為業界培養出良好、優秀的設計分析人員【2】。

## 二、研究目的

擠製(Extrusion)被應用到設計、製造、分析的領域具有深厚淺力，幾乎所有可以大量生產，又需考慮強度的產品均要利用擠製製程，如：齒輪、散熱片。然而，由於模具是擠製製程的根本影響生產的成敗，故如何加強設計、分析能力，進而定出相關規範必有助於提升技能與降低成本。本研究的目的是在透過實驗來探討棒材擠製製程中相關參數如：模具幾何形狀（減縮比、半錐角）、摩擦係數等參數對加工力量的影響。其中，加工力量係經油壓轉換量得，而這些實驗數值將和程式模擬的結果相比較，以確定程式的可靠性。工業用純鋁試件被應用在兩個不同模角的過模圈來進行實驗，潤滑部分採用石墨及硬質酸鋅(Zn stearate lubricant)兩種潤滑劑。

## 三、研究範圍

- (一) 本研究以前擠製法(Forward Extrusion)，其它擠製方法不在本研究範圍。
- (二) 本研究採用工業用純鋁(AA1100)，其它鋼、黃銅等材質不在本研究範圍。
- (三) 本研究潤滑使用石墨及硬質酸鋅兩種潤滑劑，其它種類不在本研究範圍。

## 貳、實驗方法

### 一、試片準備

工業用純鋁試件（直徑40mm、高度150mm）經下料、退火消除應力、皂化潤滑處理。機械性質部分，先經CNC車製成標準試桿、拉伸試驗及硬度測試、求取真應力-真應變方程式  $\bar{\sigma} = A(\alpha + \bar{\epsilon} P)^n$  之參數( $A=8.566$ 、 $\alpha=0.0052$ 、 $n=1$ )。試件經拉伸試驗後取得抗拉強度 $\sigma_{ult}=5.8 \text{ kg/mm}^2$ 、降服應力 $\sigma_{yp}=3.8 \text{ kg/mm}^2$ 、伸長率 $e.l=52.3\%$ 、硬度BHN20.1。純鋁的化學成分(wt%)透過光譜儀分析，如表1所示。

表1 試片的化學成分(wt%)

Si	
Fe	0.210
Cu	0.006
Mn	0.003
Zn	0.005
Cr	0.005
Ni	0.004
V	0.005
G	-
Ti	-
Al	99.76

## 二、擠製模具設計

本研究實驗模具由擠製母模、沖頭、導板及模座等零件組合而成，如圖2所示。母模為使試件通過時改變形狀，承受圓周方向之張應力(hoop stress)極大，在外圍須與加強環座壓入配合。沖頭設計須考量挫屈(buckling)的問題，模座須承受沖頭壓力並提供成品的擠出空間。擠製力量的量測係透過沖頭加壓時油壓轉換得到，最大轉換可量測範圍達3MN(300T)。模具的相關對應尺寸位置如圖3所示，D 是試件直徑(mm)，d 是模具出口頸環直徑(mm)，H 是試件高度(mm)，h 是頸環高度(mm)， $\alpha$ 是模具半錐角。



圖2 擠製模具設定圖

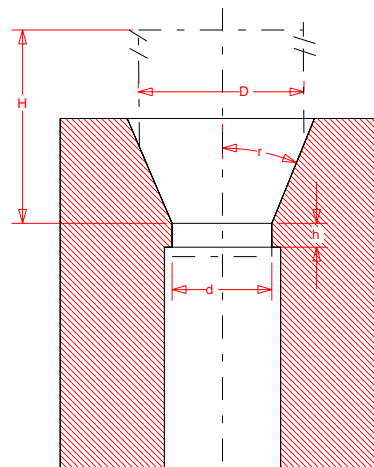


圖3 母模相關尺寸圖

本實驗採用兩種擠製母模，R 為面積減縮比( $R=D/d$ )。模具主要尺寸如表二。

表2 模具主要尺寸(mm)

母模代號	入口直徑 (D)	出口直徑 (d)	半錐角 ( $\alpha$ )	擠製比 (R)
A	40	25	20	1.6
B	40	25	20	1.6

## 三、實驗器材

本實驗的器材包括:400 頓油壓機、電腦控制器如圖 4 所示，圓桿試件如圖 5 所示，擠製後成品( $\alpha=20$ )如圖 6 所示等。



圖4 400頓油壓機



圖5 試件

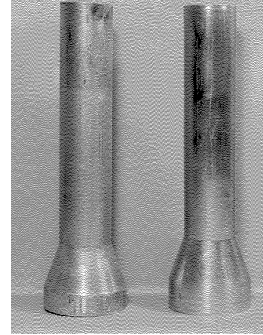


圖6 成品( $\alpha=20$ )

#### 四、實驗過程

本研究之實驗將依四個步驟進行，詳細說明如下：

##### 步驟一：擠製設備及儀器

擠製用模具如圖2所示，依設計製造完成之零件組合成可用實驗用之模具。油壓實驗機及電腦控制器如圖4所示。

##### 步驟二：潤滑處理

擠製前試件必須作好潤滑處理，以期用最小的沖頭力量得到最佳表面的產品。因為鋁料本身具有潤滑效果本研究採用石墨及硬值酸鋅為潤滑劑。

##### 步驟三：實驗儀器校正

為使實驗進行順利並取得正確數據，實驗前先將Load cell與油壓對應檢測無誤後，沖頭與母模間的同軸度必須校正完成，否則易發生應力不均使模具破壞發生危險。

##### 步驟四：實驗過程

1. 將車製好且經潤滑處理的鋁件置於母模穴中，在以設定妥當的油壓機上進行擠製實驗。
2. 沖頭保持 2 mm/sec 的定速下壓，接觸鋁件時負載(沖頭力量)開始上升，直到鋁件變形製穩流狀態(負載穩定)，將沖頭移回原點取出擠完之鋁件，同時紀錄沖頭位移與力量的關係。

### 參、有限元素分析

本研究將利用電腦軟體ALGOR來進行塑性變形的模擬分析【3】【4】，二維網格的CAD模型將被用來進行軸對稱的擠製製程模擬，適當網格數、材料特性、邊界條件及再分割的技術配合個人電腦使得整個擠製製程模擬能順利完成，如圖7所示。

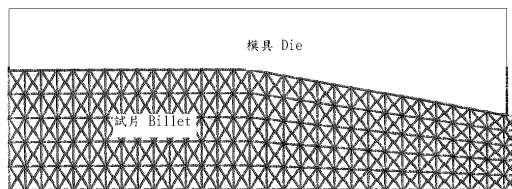


圖7 鋁桿試件網格分割圖

#### 一、FEA 公式

非線性大變形是採用增量式有限元素法，係由Hibbit 與Rice【5】在1970年首先提出彈塑性變形之有限單元公式(Total Lagrangian Formulation)【6】。但由於此公式是以變形前之座標為參考狀態，因此對於有限應變(Finite strain)問題較不適合。1975年McMeeking 和Rice【7】提出來新的座標描述，稱為Update Lagrangian Formulation(ULF)，是將每一增量的最終狀態做為下一個增量的起始值，可表示如下：

$$\{\sigma^*\} = [Dep]\{\varepsilon^*\}$$

其中， $\{\sigma^*\}$  為應力矩陣之微分， $[Dep]$  為材料剛塑性勁度矩陣， $\{\varepsilon^*\}$  為應變矩陣之微分。根據ULF 理論所發展之有限元素法能夠較適合應用於求解大應變的金屬成型問題，亦為本研究使用Algor套裝軟體求解所採用。

#### 二、結果

圖8(a)至(d)所示，是不同擠壓行程下圓桿鋁件擠製製成之塑變形狀的理論模擬圖。由模具斜面入口處元素漸向右出口端移動，區內元素應力超過降服點而開始塑變(深色元素)，當元素離開模具出口處成無拘束狀態使內部應力瞬間發生反彈(spring back)現象而為向外翹，壓應力轉變成張應力而離開出口處越遠元素僅存殘留應力。本研究擠製沖頭力量與行程的關係進行探討。

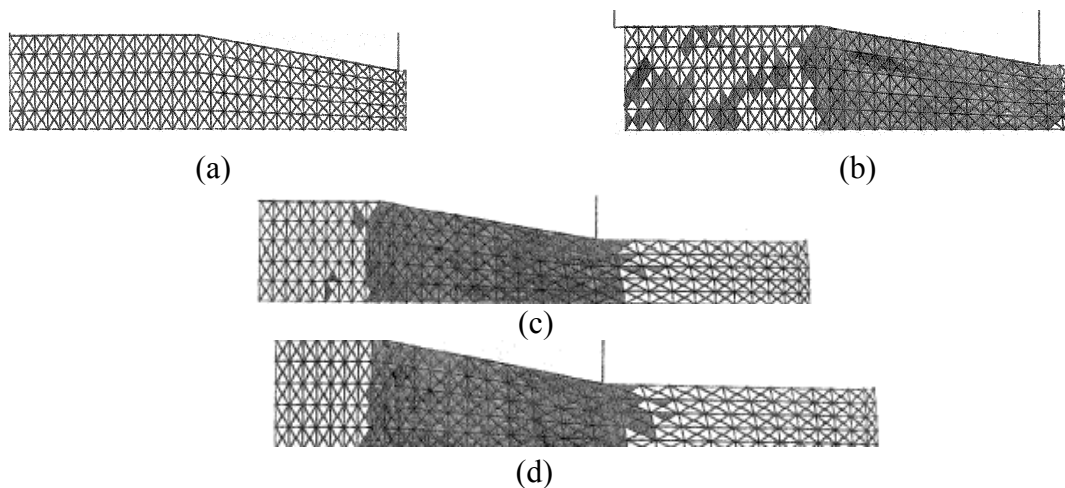


圖8 (a)(b)(c)(d)圓桿鋁件擠製製程形狀模擬

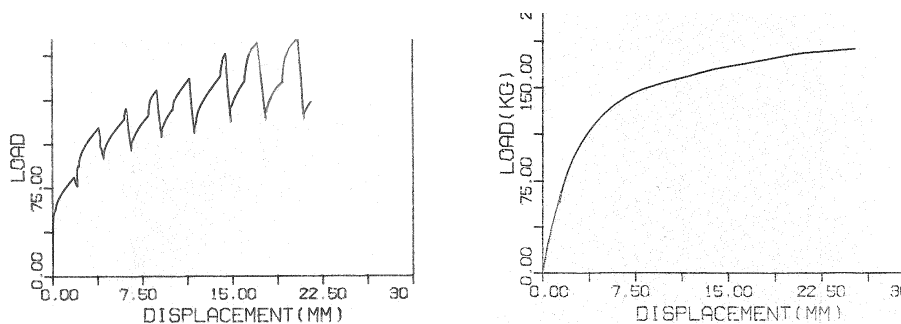


圖9(a)模擬沖頭位移與力量之關係( $\alpha=10$ ) 圖9(b)沖頭位移與力量實驗值

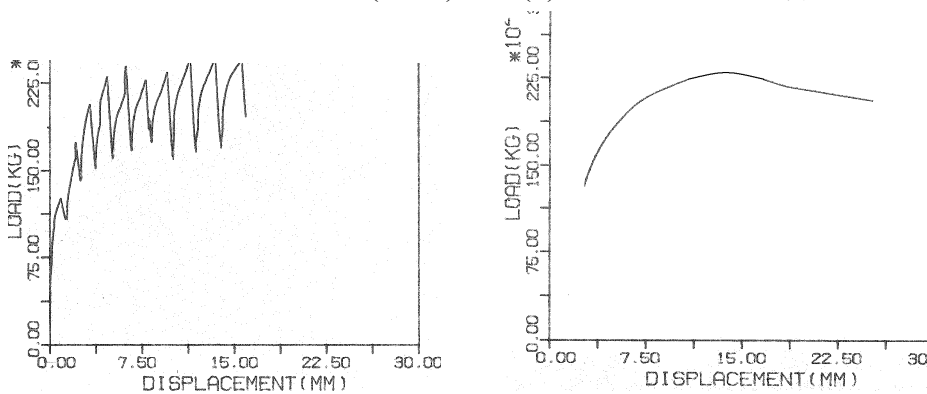


圖10(a)模擬沖頭位移與力量之關係( $\alpha=20$ ) 圖10(b)沖頭位移與力量實驗值

### 肆、討論

#### 一、模擬與實驗所得沖頭力量結果之討論

圖8(a)至(d)中可看出沖頭自擠壓開始至穩流狀態時的負荷軌跡。圖9(a)(b)與圖10(a)(b)所示，是不同情況下使用石墨潤滑劑之理論與實驗所得沖頭位移與力量之關係比較。由於鋁件因使用石墨與硬質酸鋅兩種潤滑劑，故在理論模擬時之摩擦係數值取 0.03及0.05。

#### 二、模具錐角對擠製力量的影響

圖9與圖10是鋁擠製件以石墨潤滑在不同錐角下的沖頭力量履歷，由圖中可明顯看出錐角小者其沖頭力量增加較緩而其沖頭力量值低於錐角較大者。錐角大者對模具造成的應力急速上升，若模具設計不當易發生危險。

### 三、模擬擠製力量對模具與工件間摩擦的影響

表3至表4是在半錐角10度與20度之下，兩種摩擦係數的理論模擬沖頭力量與位移關係比較。由圖中可以看出不同潤滑條件下對負荷的影響甚大，尤其摩擦大者其沖頭力量在達最高值後有穩定並緩降的趨勢，這是工件被擠出後與模具接觸面減少而摩擦力降低之故。摩擦不同會對擠出表面的光澤與粗造情況造成影響，如圖6所示。

表3 純鋁擠製沖頭力量(kg)半錐角  $\alpha=10$  度

潤滑劑	理論最大值	實驗值	誤差百分比
石墨	18850	18100	4.1 %
硬質酸鋅	26250	24500	7.1 %

表4 純鋁擠製沖頭力量(kg)半錐角  $\alpha=20$  度

潤滑劑	理論最大值	實驗值	誤差百分比
石墨	24500	23500	4.2 %
硬質酸鋅	28500	26250	8.5 %

### 伍、結論

本研究在探討鋁件在不同潤滑、不同模具錐角條件下，以剛塑性大變形理論所發展的三角形元素法電腦程式模擬擠製製程，其模擬與實驗履歷結果相當吻合，可以有效的被應用於金屬擠製成形問題，並經由討論後可得以下的結論：

1. 理論模擬結果與實驗結果比較可確定石墨潤滑劑的摩擦係數值可選用0.03，硬質酸鋅的摩擦係數值可選用0.05。
2. 模具半錐角越小可以降低沖頭力量，模具出口處增加圓弧角半徑值可降低應力，並避免模具與擠件間的損傷；同時，組裝時要做好模具相關設定與校正以避免應立即中發生造成模具破裂發生危險。
3. 正確地使用潤滑劑可降低沖頭力量、節省能源、降低成本，亦可得到較佳表面的擠件。

### 陸、參考文獻

1. 邱國華, "MARC 應用於軸對稱擠製加工問題之分析及其驗證", 碩士論文, 國立中央大學機械所, 2003。
2. Alto A., Galantucci L.M. and Tricarco L., "A Parametric FEM Analysis of Extrusion Using A Personal Computer," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 31 pp.

- 335-345, 1992.
3. Algor/Docutech User's Guide.
  4. Constantine C. Spyarakos, "Finite Element Analysis in Engineering Practice," nonlinear FE analysis, Part 2, pp. 437-460.
  5. Hibbitt H.D., Marcal P.V. and Rice J.R., "A Finite Element Formulation for Problems of Large Strain and Large Displacement," Int. J. Solids Struct. Vol.6, pp. 1069-1086, 1970.
  6. Mcmeeking R.M. and Rice J.R., "Finite Element Formulation for Problem of Large Elastic-plastic Deformation," International Journal of Materials Sciences., Vol. 11 pp. 601-616, 1975.
  7. Male, A.T., and Crockcroft, M. G., "A Method for the Determination of the Coefficient of Friction of Metals under Conditions of Bulk Plastic Deformation." *Journal of the Insitute of Metals*, vol. 93, pp. 38-46, 1964-65.