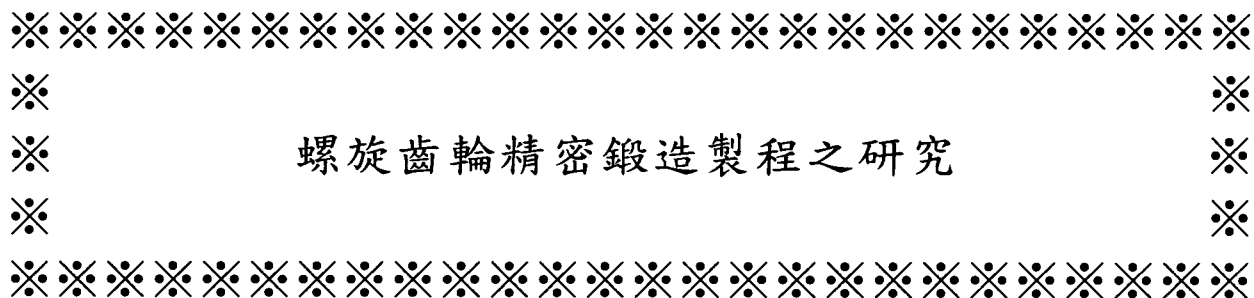


# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告



螺旋齒輪精密鍛造製程之研究

計畫類別：個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC 90-2212-E-041-001

執行期間：90年 8月 1日至 91年 7月 31日

計畫主持人：徐宏修

計畫參與人員：朱寶章 陳柏宏

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：嘉南藥理科技大學資訊管理系

中華民國 91 年 10 月 1 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

## 螺旋齒輪精密鍛造製程之研究

### A Study on Precision Forging of Helical Gear

計畫編號：NSC 90-2212-E-041-001

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：徐宏修 嘉南藥理科技大學資訊管理系

計畫參與人員：朱寶章 陳柏宏 嘉南藥理科技大學資訊管理系

#### 一、中文摘要

本文將研究螺旋齒輪的鍛造。利用上界限法來對螺旋齒輪精密鍛造時作一理論解析。鍛造中，沖頭和模穴皆為螺旋齒形，圓柱形的胚件被沖頭壓入金屬模內，胚料受壓逐漸成型在齒形區域內。在建構螺旋齒輪精密鍛造的數學模式時，使用剛塑性變形模式。考慮齒形模的幾何形狀，以及胚料在齒形模內受摩擦影響產生的變形，預估了齒胚所承受之負載。本文分析各種不同的加工參數，如齒數、螺旋角、高度壓縮率等對螺旋齒輪的鍛造功率影響。採鉛塊執行齒輪鍛造實驗以驗證本文分析模式的適用性。所獲得鍛造負載與其他研究者的數據相較，可提供實施螺旋齒輪精密鍛造時模具設計之一有用的參考資料。

**關鍵詞：**螺旋齒輪、精密鍛造、上界限法

#### Abstract

The forging of helical gear is investigated in this research. A theoretical analysis for the precision forging of helical gear is made by upper bound method. During forging process, the punch and die cavity both helical gear shape form and an original cylindrical billet specimen is forced into metal die insert, deformed with the tooth region of die. The rigid-plastic model is used for establishing the mathematical model for precision forging of helical gear. By considering the geometric shape of tooth shape die and the deformation of billet influenced by friction within tooth shape die, the forging load of billet is estimated. In this paper, several parameter such tooth number

of helical gears, helix angle, reduction in height effect on forging power, non-dimensional forging pressure are investigated in detail. The experiment of helical gear forging using lead is performed to check the validity of present model. It offers a useful knowledge in die design for precision forging of helical gear.

**Keywords:** Helical Gear, Precision forging, Upper Bound Method

#### 二、符號說明

- $A_0$  : 鍛胚的初始斷面積
- $B(r)$  : 齒形輪廓函數
- $H(t)$  : 胚料瞬時高度
- $H_0$  : 胚料初始高度
- $J$  : 總功率
- $m$  : 摩擦因子
- $n$  : 齒數
- $P$  : 沖頭上平均瞬時鍛壓
- $R_0$  : 圓柱胚的初始半徑
- $r, \theta, z$  : 徑向、圓周方向、軸向座標(圓柱座標系)
- $V$  : 塑性區域體積
- $V_{rN}$  : 塑性域(Zone  $N$ )內質點的徑向速度 ( $N = I, II, III$ )
- $V_{\theta N}$  : 塑性域(Zone  $N$ )內圓周方向速度 ( $N = I, II, III$ )
- $V_z$  : 塑性域內質點的軸向速度
- $V_0$  : 沖頭速率
- $\alpha$  : 塑性域 (Zone I, II) 之弧角總合 (徑)

- $\beta$  : 塑性域 (Zone II) 之弧角 (徑)  
 $\sigma$  : 塑流應力  
 $\lambda$  : 螺旋角  
 $\xi$  : 無因次化的鍛造壓力  
 $\dot{\epsilon}_{rrN}, \dot{\epsilon}_{\theta\theta N}, \dot{\epsilon}_z$  : 塑性域 (Zone  $N$ ) 中質點正向應變率 ( $N = I, II, III$ )  
 $\dot{\epsilon}_{r\theta N}, \dot{\epsilon}_{\theta z N}, \dot{\epsilon}_{zr N}$  : 塑性域 (Zone  $N$ ) 中質點的剪應變率 ( $N = I, II, III$ )  
 $\dot{W}_i, \dot{W}_s, \dot{W}_f$  : 內部的變形功率、剪功率及摩擦功率損失

### 三、前言

最近利用精密鍛造的加工程序來製造齒形元件的方法已被發展出來，精密成形的技術所生產的齒輪已逐漸引起業者的興趣。利用精密鍛造法螺旋齒輪時，可改良齒形強度而且節省切削成本、節省生產時間、較低消耗功率、較長模具壽命和較低沖頭壓力的種種優點[1-6]。

在螺旋齒輪的導引型精密鍛造方面，Choi[1, 2]利用上界限法，探討了圓柱鍛胚在鍛模內時金屬流的變形。Ohga[3,4] 提出改善機械性質的分流鍛造加工方式，曾利用分流鍛造加工方式製作正齒輪，此法的優點節省加工機負荷的輸出功率、鍛胚內有較低的塑流應力、以及胚料和鍛模間有較少的摩擦功率損失，因而降低鍛造所需沖頭壓力。Kojima[5]使用剛塑性 FEM 分析螺旋齒輪精密鍛造時的負荷鍛模所獲得一系列模具設計最佳化的參考數據。Szentmihali[6]也曾應用 FEM 分析齒螺的導引型精密鍛造，獲得齒形部分的等效應變分佈，作為設計鍛模的參考資料。

本文所引用螺旋齒輪的齒形區域為漸開線的輪廓，對於胚件在導引型鍛造中的金屬流，將提出一個新的動可容速度場，假設在鍛胚中所有塑性範圍內任一質點的軸向速度為線性分佈來模擬塑性變形，對螺旋齒輪的精密鍛造做三維的解析與探討。並用鉛塊實行鍛造實驗，驗證其適用性。

### 四、數學模式

首先，導引型螺旋齒輪鍛造模具如圖1所示。和鉗型鍛造比較，導引型螺旋齒輪鍛造裡的沖頭的運動明顯地多了圓周方向速度，不易由 FEM 模擬，也無法得到鍛造負載和鍛造速率。為了要考慮螺旋形的金屬流量和金屬模表面的邊界條件，參考本文作者曾開發的正齒輪鍛造速度場[7]，加上圓周方向速度，即可獲得螺旋齒輪鍛造的動可容速度。

在速度場的推導過程前有如下的一些基本假設：

- (1) 圓柱胚為一剛塑性材料；
- (2) 忽略沖頭和鍛模的彈性變形；
- (3) 圓柱胚是等方性的材料；
- (4) 所有摩擦因子均為定值；
- (5) 假設螺旋齒輪的任一橫斷面在變形期間仍保持水平；
- (6) 沖頭的速率為定值。

#### 4.1 動可容速度場

如圖2所示螺旋齒輪鍛造之塑性域劃分示意圖，為漸開線螺旋齒輪的導引型鍛造及所假設的塑性變形區。圖2之塑性域 Zone I, II, III 中，塑性流的軸方向速度皆相同，則可假設如下：

軸向速度

$$V_z(r, \theta, z, t) = \frac{V_0 z}{H(t)} \quad (1)$$

各塑性區域的速度場之數學模式如下：

Zone I)

$$V_{r1} = 0 \quad (2)$$

$$V_{\theta 1} \equiv V_{\theta 1}(r, \theta, z, t) = \frac{rV_0(2g \cdot z + \alpha - \theta)}{H(t)} \quad (3)$$

Zone II)

$$V_{r2}(r, z, t) = -\frac{rV_0\alpha}{2H(t)\beta} \quad (4)$$

$$V_{\theta 2} \equiv V_{\theta 2}(r, \theta, z, t) = \frac{rV_0}{H(t)} \left( \left( \frac{\alpha}{\beta} - 1 \right) \theta + \left( 2 - \frac{\alpha}{\beta} \right) g \cdot z \right) \quad (5)$$

Zone III)

$$V_{r3} \equiv V_{r3}(r, \theta, z, t) = -V_0 \frac{IB(r)}{rB(r)H(t)} \quad (6)$$

$$V_{\theta 3} \equiv V_{\theta 3}(r, \theta, z, t) = V_0 \frac{((g \cdot z - \theta)IB(r) \cdot B(r)) + r \cdot g \cdot z \cdot B(r)^2}{B(r)^2 H(t)} \quad (7)$$

上述式(1)-(7)中，為胚件在鍛壓時間之瞬時高度  $B(r)$  是齒部的漸開線函數。另外， $B(r)$  的積分結果表示為  $IB(r)$ 。

以上各參數符號或函數可定義如下：

$$H \equiv H(t) = H_0 + V_0 t, \quad g \equiv \frac{\lambda}{H(t)} \quad (8)$$

$$B(r) = \frac{\pi}{2n} - \sqrt{\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 - 1} + \text{Arc tan} \left( \sqrt{\left(\frac{r}{R_0}\right)^2 - 1} \right) \quad (9)$$

$$B'(r) = \frac{dB(r)}{dr} \quad (10)$$

$$IB(r) = \int_{R_0}^r xB(x)dx + \frac{\alpha \cdot R_0^2}{2} \quad (11)$$

其中  $\lambda$  為螺旋角，從式(11)得到  $IB(r)$  和  $B(r)$  之關係。就物理意義而言， $IB(r)$  代表任一垂直於鍛壓軸之平面上的胚件斷面積。

#### 4.2 功率

在塑性域中的塑性變形功率，從齒胚變形時之等效應變率和塑流應力計算如下：

$$\dot{W}_i = \sum_{N=1}^3 \int \sigma \dot{\epsilon}_{eqN} dV \quad (12)$$

在剛塑性邊界上的剪功率損失， $\dot{W}_s$ ，和工作件/金屬模接觸面的摩擦功率損失， $\dot{W}_f$ ，從各塑性域的速度場計算如下：

$$\dot{W}_s = \frac{1}{\sqrt{3}} \int_{\Gamma_s} \sigma |\Delta V| ds \quad (13)$$

$$\dot{W}_f = \frac{m}{\sqrt{3}} \int_{\Gamma_f} \sigma |\Delta V| ds \quad (14)$$

此處  $|\Delta V|$  為不連續面  $\Gamma_s$  (含  $\Gamma_2$ 、 $\Gamma_3$ ) 的速度差， $|\Delta V|$  也代表工件/金屬模平面  $\Gamma_f$  的速度差。

依照所有的上述的計算，鍛造所需之總功率  $J$  及各項功率如下：

$$J = \dot{W}_i + \dot{W}_s + \dot{W}_f \quad (15)$$

齒輪所需總功率  $J$  和鍛造負荷  $P$  的關係如下：

$$P = \frac{J}{V_0} \quad (16)$$

參數  $\xi$  為無因次化的鍛造壓力，具有大小的指標作用，其定義如下：

$$\xi = \frac{J}{\sigma \cdot A \cdot V_0} \quad (17)$$

其中， $A$  為鍛胚的斷面積。

#### 五、結果與討論

圖3為螺旋齒輪鍛造速度場分佈圖，矢線及長度指示速度的方向及大小。在Zone 1中，質點的圓周方向速度與其座標  $r$  值成正比，但徑向速度為零，並且滿足圓弧狀邊界  $\Gamma_1$ 。Zone 2中任一質點的徑向速度大小與其座標  $r$  值成正比，並且有徑向速度。鍛壓的胚料必須往齒形部份流動，因此Zone 3中徑向速度速度大於Zone I, II。

圖4表示為齒數與高度縮減率對無因次鍛造壓力之影響。假設塑流應力  $\sigma = 1\text{MPa}$ ，沖頭速率  $V_0 = 1\text{mm/s}$ ，模數  $M = 1.5$ ，摩擦因子  $m = 0.1$ ，初始高度  $H_0 = 12\text{mm}$ ，螺旋角  $\lambda = 23.6^\circ$ ，在相同齒數下，無因次鍛造壓力隨高度縮減率的增加而增加。愈往下壓縮，材料愈往齒部區域移動，所受模具對材料阻力愈大，故壓力愈大。由圖可知，在模數保持一定時，齒數愈大，鍛造壓力愈大。此乃由於齒數愈大，齒輪直徑愈大，即大齒輪所需斷造壓力愈大之故。

圖5表示為齒數與螺旋角對無因次鍛造壓力之影響。假設塑流應力  $\sigma = 1\text{MPa}$ ，沖頭速率  $V_0 = 1\text{mm/s}$ ，模數  $M = 1.5$ ，摩擦因子  $m = 0.1$ ，初始高度  $H_0 = 12\text{mm}$ ，高度縮減率定為10%時。在相同齒數下，無因次鍛造壓力隨螺旋角的增加而增加。此由於螺旋角愈大，剪應變愈大，需要較多的功率使材料產生較大螺旋角，故所需斷造壓力愈大之故。

以鉛塊實驗的胚料，實驗中胚料和模具間塗上潤滑機油。為決定材料的應力-應變關係，先作抗壓試驗。材料抗壓試驗中，實驗用鉛為一圓柱胚試片，直徑30mm和高度30mm。抗壓試驗結果如圖6所示實驗材料之應力應變關係圖。將壓縮實驗值以曲線湊合法得到材料應力-應變關係式如下：

$$\bar{\sigma} = (48.75 \bar{\epsilon}^{0.09}) \text{MPa} \quad (18)$$

$$\bar{\epsilon} = \ln\left(\frac{H_0}{H(t)}\right) \quad (19)$$

鍛造實驗中，齒輪型沖頭和鍛造金屬模具組圖 2 所示。圖 7 為實驗機的外觀，所有實驗均塗上潤滑機油，以減少阻力，利於鍛造實驗之進行，圖 8 為鍛造後之齒輪。齒輪鍛造實驗在一個壓縮機上實行，並且保持在室溫，本實驗以螺旋角為零之特例來應證本文模式。鍛造實驗使用胚料初始直徑 30mm 和高度 30mm，利用上界法分析並預測螺旋齒輪的鍛造負載，並評估塑流應力。塑流應力依式(18)及(19)計算，其中  $V_0 = 0.14 \text{ mm/s}$ ，模數  $M = 3$ ，摩擦因子  $m = 0.1$ 。實驗如圖 9 所示高度縮減率對鍛造負荷之影響，與圖 4 相同趨勢，當高度縮減率愈大，所需的鍛造負荷愈大，此因縮減率愈增加，成型所受阻力有愈大之趨勢。

從螺旋齒輪導引型鍛造的實驗和理論上研究，獲得下列的結論

- (1) 關於螺旋齒輪的導引型鍛造。當螺旋齒輪型的沖頭，向下移動而且沿著金屬模具的齒輪螺旋線形。可使一個胚料向前旋轉，製造出螺旋齒輪。
- (2) 無因次鍛造壓力隨鍛造壓力的增加而增加。無因次鍛造壓力隨螺旋齒輪的齒數增加而增加。
- (3) 無因次鍛造壓力隨螺旋齒輪的螺旋角增加而增加。
- (4) 所預測鍛造負荷值和實驗的結果獲得相同的趨勢。

## 六、參考文獻

- [1] J.C. Choi, Y. Choi and S.J. Tak, "The forging of Helical Gears (I): Experiments And Upper-Bound Analysis", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.40, pp.325-337 (1998).
- [2] J.C. Choi, Y. Choi and S.J. Tak, "The Forging of Helical Gears (II): Comparisons of The Forging Processes", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.41, pp.725-739 (1999)
- [3] K. Ohga, H. Ando and K. Kondo, "Forming of a Spur Gear by Use of a Liquid Lubricant – Precision Cold Die Forging of Actual Gear Toothed Products Utilizing Divided Flow I-", *J. the JSTP*, Vol.36, pp.499-504 (1994)

- [4] K. Ohga, F. Murakoshi, H. Ando, K. Miyoshi and K. Kondo, "Comparison of One-Side Compressing System and Both-Sides Compressing One-Precision Cold Die Forging of Actual Gear Toothed Products Utilizing Divided Flows II-", *J. the JSTP*, Vol.37, pp.927-932 (1995)
- [5] H. Kojima, S. Fujikawa, K. Ueno, J. Ikeuchi and N. Kato, "Application of 3D Forging Analysis to Optimize Forging Die Parameters for Helical Gear Forming", *J. the JSTP*, Vol.41, pp.73-77 (2000)
- [6] V. Szentmihali, K. Lange, Y. Tronel, J. L. Chenot and R. Ducloux, "3-D Finite-Element Simulation of The Cold Forging of Helical Gears", *J. Mater. Process. Technol.*, Vol.43, pp.279-291 (1994)
- [7] H. H. Hsu, "A study on precision forging of spur gear forms and spline by the upper bound method" *Int. J. Mech. Sci.*, Vol.44, pp.1543-1558 (2002)

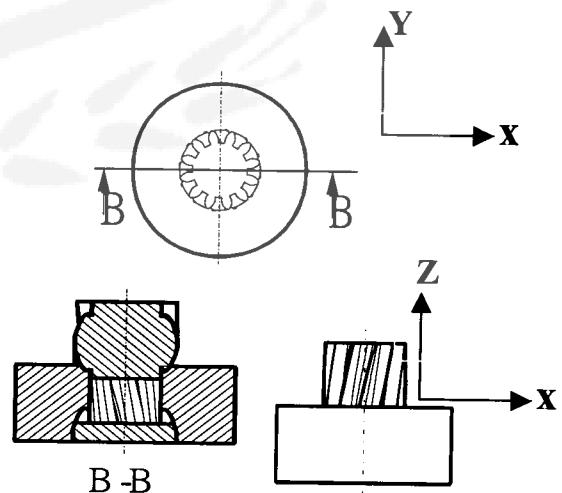


圖 1 導引型螺旋齒輪鍛造模具示意圖

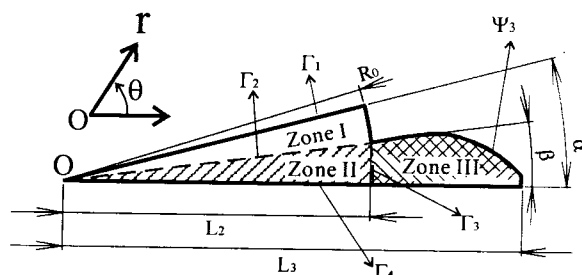


圖 2 螺旋齒輪鍛造之塑性域劃分示意圖

$R_0 = 20\text{mm}$ ,  $H_0 = 40\text{mm}$ ,  $V_0 = 1\text{mm/s}$   
 red. = 9%,  $n = 22$ ,  $m = 0.1$ ,  $\sigma = 1\text{MPa}$

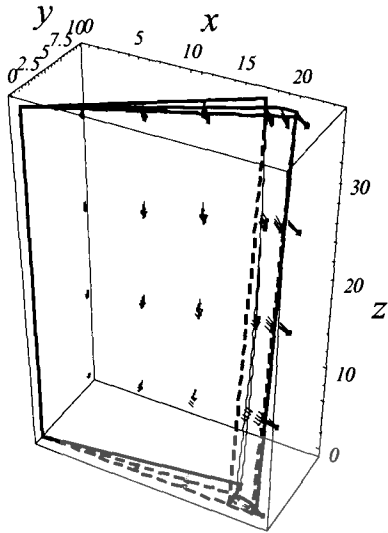


圖 3 螺旋齒輪鍛造速度場分佈圖

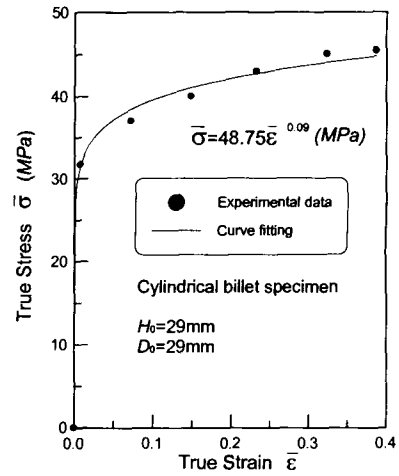


圖 6 實驗材料之應力應變關係圖

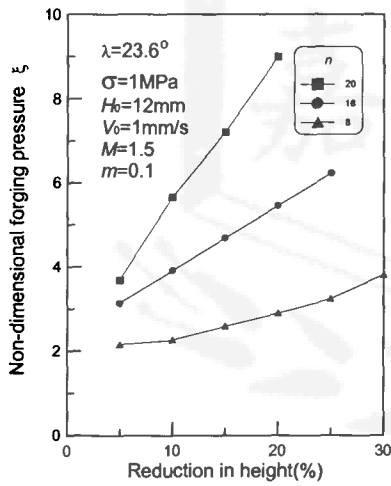


圖 4 齒數與高度縮減率對無因次鍛造壓力影響



圖 7 材料壓縮實驗機及材料實驗

圖 8 實驗鍛造後之齒輪 (Red = 28%,  $\lambda = 0$ )

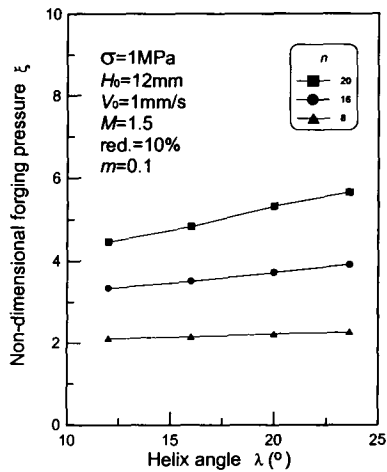


圖 5 齒數與螺旋角對無因次鍛造壓力之影響

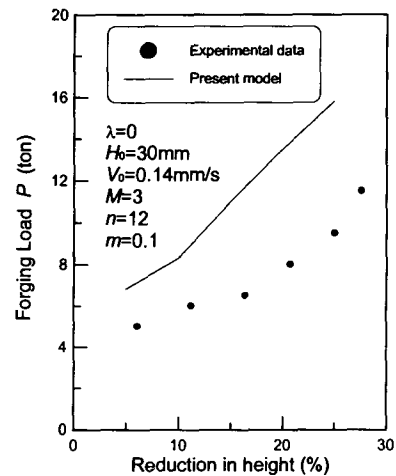


圖 9 高度縮減率對鍛造負荷之影響