

# 胚料特性對內齒輪冷精鍛製程的影響分析與預測

許源泉<sup>1\*</sup> 林萬益<sup>1</sup> 黃國禎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系 副教授

<sup>1</sup>國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系 講師

<sup>2</sup>國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系 大學

## 摘 要

齒輪是各類機械中應用極為廣泛的重要傳動零件，以冷精鍛成形的齒輪因具有節省材料、強度高、抗疲勞性能佳等等諸多優點，因此以塑性成形法來加工齒輪已倍受重視。本研究乃應用三維剛塑性有限元素數值模擬技術進行內齒輪的冷精鍛塑性成形分析，並探討內徑、外徑、應變硬化指數、材料強度係數及表面粗糙度等胚料特性對冷精鍛負荷的影響，其後利用類神經網路建構出這五種胚料特性與冷精鍛負荷的關係預測模式。研究發現，胚料之內徑、外徑、高度等對內齒輪冷精鍛的變形及品質有相當影響，但對成形負荷的影響並不顯著，而胚料之應變硬化指數、材料強度係數及表面粗糙度等對成形負荷則有較為顯著的影響，這三者數值越大，所需負荷也越高。此外，利用類神經網路進行胚料特性與內齒輪冷精鍛負荷的預測具有相當的方便性與信賴性。

**關鍵詞：**內齒輪、冷精鍛、有限元素模擬、類神經網路。

---

\*聯繫作者：國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系，雲林縣虎尾鎮文化路 64 號。

Tel: +886-5-6315306

Fax: +886-5-6315310

E-mail: jasonych@nfu.edu.tw

## 壹、前言

應用切削加工法進行齒輪製造，因材料利用率低、能源耗費大、生產效率低，尤其金屬流線被切斷，造成齒輪強度與疲勞壽命下降。隨著精密塑性成形技術的不斷發展，精鍛成形技術已經成為齒輪成形的主要方法之一，精鍛成形的齒輪因具有節省材料、强度高、抗疲勞性能佳等等諸多優點，因此國內外逐漸採用塑性成形法來加工齒輪[1-2]。

鍛壓塑性成形乃是利用鍛壓模具對胚料進行垂直方向加壓，使胚料產生大量塑性變形，以成形出所要求形狀的加工方法。現今，傘齒輪精鍛成形理論及加工較為成熟，並在實際生產中得到大量應用[3]，但是在圓柱齒輪鍛造中，由於金屬材料的塑性流動方向與其受力方向垂直，所以其齒形比傘齒輪更難形成，然而圓柱齒輪卻是齒輪類應用最廣泛的零件[4]。

目前正齒輪塑性成形的研究大都聚焦在齒輪鍛造之變形規律分析、製程及模具設計分析、鍛件品質及精度控制、數值模擬研究等。譬如，Dohmann[5] 曾利用數值逼近法及主應力法來分析齒輪零件冷鍛中各成形階段的應力及流動情況。Choi[6] 利用物理模擬及上界限法對圓柱胚料鍛造漸開線正齒輪進行分析，以探討高度壓縮量與變形負荷的關係。Drecun[7] 開發一套圓柱正齒輪精鍛模具參數化CAD軟體。Abdel[8] 曾分析齒數、模數及鍛造溫度等鍛後收縮對齒形輪廓誤差的影響。Yang[9] 利用剛塑性有限元素法分析了圓柱正齒輪的鍛造過程。Abdul[10] 等人利用上界限法進行圓柱正齒輪精鍛的分析，探討齒根圓直徑、齒數及摩擦對金屬流動及鍛壓負荷的影響。Chitkara[11] 應用上界限法來分析鍛擠圓柱正齒輪的變形，並用電腦模擬增量鍛造圓柱齒輪時的變形力及應力應變規律。

內齒輪鍛造成形相關研究則較少，李洪波等人[12] 應用有限元素模擬探討內齒輪縮擠成形加工，分析了內齒輪成形時齒面裂紋的產生的原理，並從理論上進行了解釋，進而提出了防止齒面裂紋產生的方法。伍太賓[13] 分析胚料形狀和尺寸對摩托車傳動齒輪的成形難易程度、充填性、內齒輪品質以及模具壽命的影響。

精鍛成形時由於胚料塑性變形特性和齒輪形

狀的複雜性，或者模具結構和成形過程不合理，往往產生缺陷，其中胚料特性對鍛壓成形負荷及齒形填充成形狀況是頗值得探討的課題，亦是本研究所要探討的主題。

換言之，本研究乃試圖利用三維剛塑性有限元素模擬法來分析不同胚料特性之內齒輪冷精鍛的變形狀況，探討不同胚料外徑、內徑、應變硬化指數、材料強度係數及表面粗糙度等胚料特性對成形負荷的影響，並經由類神經網路建構胚料特性與鍛壓成形負荷關係之預測模式。

## 貳、研究方法

### 一、有限元素模擬

有限元素法是一種強而有力的金屬成形解析法，此法於推演的過程中，主要是以滿足力平衡方程式、降伏準則、構成方程式、幾何相容方程等基本方程式及邊界條件。有限元素形式變分原理用於剛塑性材料可寫成一泛函數如下[14]：

$$\pi = \int_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dv - \int_S F_i u_i ds \quad (1)$$

其中  $\sigma$  是等效應力， $\epsilon$  是等效應變率， $F_i$  是表面力。對此泛函數一階變分可得到基本有限元素形式

$$\delta\pi = \int_V \sigma \delta\epsilon dv + k \int_V \epsilon_v \delta\epsilon_v dv - \int_S F_i \delta u_i ds = 0 \quad (2)$$

其中  $k$  是 penalty 常數， $\dot{\epsilon}_v$  是體積應變率。

本文精鍛之內齒輪之模數為 3、齒數 24、壓力角 20°、齒頂圓直徑 100mm，齒輪外觀如圖 1 所示。利用三維剛塑性有限元素軟體 DEFORM-3D 建立內齒輪之精密鍛壓成形模擬模式。為探討外徑、內徑、應變硬化指數、材料強度係數及表面粗糙度等五大項胚料特性對冷精鍛負荷及變形的影響，於模擬分析時規劃出的實驗因子為外徑(D)、內徑(d)、應變硬化指數(n)、材料強度係數(k)及定剪摩擦係數(m)五因子，其中，因胚料表面粗糙度對摩擦係數的效應最大[15-16]，故胚料表面粗糙度以模具與胚料介面間的定剪摩擦係數來代表，而模擬因子各配置五個水準來進行分析探討，如表 1 所示。

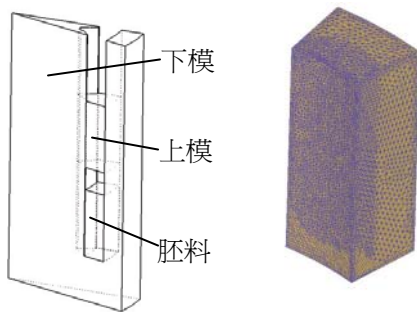


圖 1 內齒輪外觀示意圖

表 1 內齒輪冷精鍛之模擬分析規劃

水準	胚料特性				
	外徑 (mm)	內徑 (mm)	應變硬化指數	材料強度係數	定剪摩擦係數
1	96	80	0.12	224	0.1
2	97	81	0.14	268	0.2
3	98	82	0.16	312	0.3
4	99	83	0.18	356	0.4
5	100	84	0.20	400	0.5

圖 2 為有限元素模擬配置，初始胚料為具有相同體積之不同內徑、外徑與高度之環狀鋁材(如圖 3)，其應變硬化指數為 0.12~0.2，材料強度係數 224~400，並將其畫分為 60000 元素。模具假設為剛體，上模鍛壓速度為 0.5 mm/s，胚料與模具介面的定剪摩擦係數則為 0.1~0.5，如表 2 所示。



(A) 模具與胚料配置 (B) 胚料網格畫分

圖 2 內齒輪精密鍛壓成形模擬之模具與胚料配置

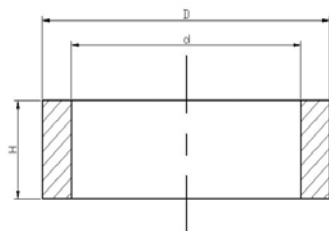


圖 3 環形胚料示意圖

表 2 胚料與模具特性

胚料	材料	鋁材
	形狀	環狀
	外徑(mm)	96, 97, 98, 99, 100
	內徑(mm)	80, 81, 82, 83, 84,
	應變硬化指數	0.12, 0.14, 0.16, 0.18, 0.20
	材料強度係數	224, 268, 312, 356, 400
	胚料網格劃分(單齒)	60000
	定剪摩擦係數	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5
模具	上模鍛壓速度(mm/sec)	0.5

## 二、類神經網路

本研究使用的類神經網路是Abductive網路，它是一種自組適應模擬工具，可建構出輸入與輸出參數間的關係式，它是屬於一種資料傳遞群集(GMDH)技術。GMDH是一種可用於非線性複雜系統辨識的良好資料分析技術，一種特徵基礎的映射神經網路。GMDH演算法是一種利用啓發自我組織法來完成描述的非線性系統辨識法。利用GMDH演算法建構的網路是一種適應合成的、監督的學習模型。監督學習意指它總是標記輸入及輸出的資料庫，因此輸出可以模式化成輸入函數，反之亦然[17-18]。

而此種網路機構之啓發是自我組織法，乃是經由下列步驟來進行：(1)分割原始資料成訓練組與測試組，(2)產生每一層輸入變數的組合，(3)選擇最佳神經單元架構，(4)選取中間變數，(5)停止多層的交互計算[19-20]。

如圖 6 為神經網路的結構[21]。它是由隱藏層的  $\Sigma$  (summation) 單元及輸出層的  $\Pi$  (product) 單元所組成。 $\Sigma$  單元的輸出是其權重總計，而  $\Pi$  單元的輸出是其輸入的乘積。因此，第  $j$  個  $\Sigma$  單元的輸出  $z_{jk}$  為：

$$z_{jk} = \sum_{i=0}^n w_{ij} x_{ik} \quad (3)$$

而網路的輸出  $y_k$  可表示為：

$$y_k = \prod_{j=1}^h z_{jk} \quad (4)$$

其中  $h$  是網路隱藏單元的數目。將公式(1)(2)結合，即可獲得如下之輸出式，這也就是誘導歸納機構網路節點的通式：

$$y_k = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ijk} x_i x_j x_k + \dots (5)$$

上式中,  $x_i, x_j, x_k$  為輸入值,  $y_k$  為輸出值, 而  $C_0, C_i, C_{ij}, C_{ijk}$  是函數節點的係數。

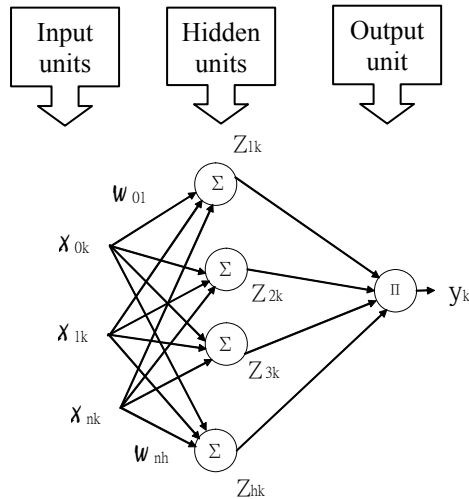


圖 4 神經網路的結構[18]

在Abductive網路結構中, 是利用多項式函數節點, 將複雜系統分解成較小、較簡單的次系統, 並且組成數個階層。網路的輸入值被細分成群組, 並轉換成個別的函數節點, 這些節點經由多項式函數來估算輸入值的極限數值, 然後產生一輸出值, 做為下次一輸入值的另一節點。在建構Abductive網路時, 必須先有輸入和輸出之資料庫, 然後再利用預測平方誤差(predicted square error, PSE)法則自動產生最佳網路結構, PSE法則之基本原理是盡可能選擇精確度高而不複雜的網路。PSE包含兩個主要項目, 即

$$PSE = FSE + KP (6)$$

上式之 FSE 是配合訓練資料之網路的平均平方誤差, KP 為網路之複雜懲罰值, 即

$$KP = CPM \times \frac{2\sigma_p^2 K}{N} (7)$$

在上式中, CPM 為複雜懲罰因子, K 為網路中之係數數目, N 為訓練資料之數目,  $\sigma_p^2$  為模式在前一個預測之誤差變異數。依據方程式(5), FSE 之值越小時 fitting 之精確度會越高。一般來說, 越複雜的網路, 應盡可能減小於 FSE 值, 相對的, 要盡可能增加 KP 值。因此, 在網路合成和評估過程中, 最理想 abductive 網路是要有最小的 PSE 值

之網路。總之, Abductive 預測網路可視為一種具有智慧的生物神經網路, 可用來做為複雜系統輸出估算的有效預測工具[22]。

在本研究中, 即是將有限元素模擬分析所得的 25 組數據, 經 Abductive 預測網路(AIM)來處理, 以方便自動建構出網路的最佳架構及方程式, 也就是建立材料強度係數(k)、應變硬化指數(n)、內徑(d)外徑(D)尺寸及摩擦係數(m)等胚料特性與冷精鍛負荷的關係預測模式。

## 參、結果與討論

### 一、材料流動變形分析

如圖5為內齒輪冷精鍛之四分之三視圖之變形演變, 由初始的環狀胚料逐漸形成輪齒, 最後可得預期的內齒輪工件。圖6為利用內徑80mm、外徑100mm、高度30mm之胚料進行內齒輪冷精鍛之沖程一負荷曲線圖及對應之輪齒形成演變, 由圖可知, 在鍛壓成形初始階段, 胚料以頓粗變形模式成形, 故可用最少的變形力來達成變形, 其冷精鍛負荷也和緩升高, 但到輪齒接近成形末段, 則負荷急劇升高, 直至輪齒完全充滿模穴成形為止。

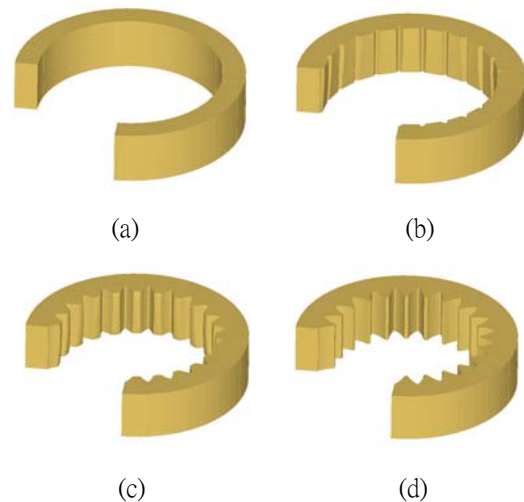


圖 5 內齒輪冷精鍛成形各階段變形的發展

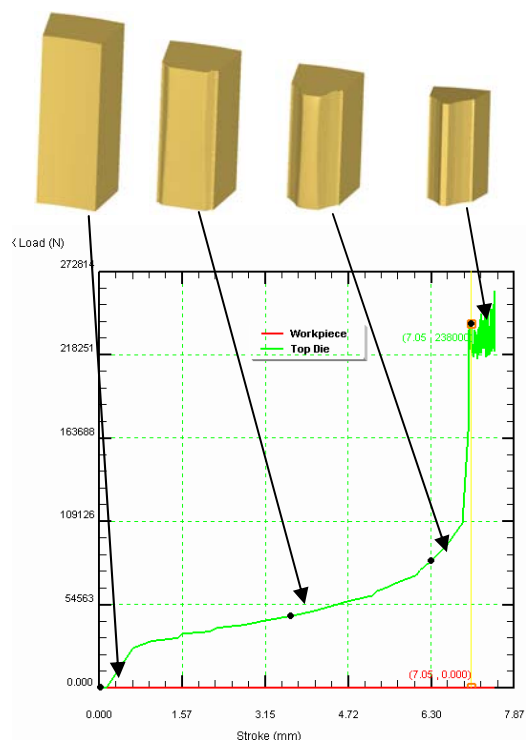


圖6 內齒輪冷精鍛沖程－負荷曲線圖及對應輪齒形成演變(胚料內徑 80 mm、外徑 100 mm、高度 30 mm)

又如圖7所示為內齒輪冷精鍛各變形階段之速度場示例，在精鍛沖程45%(沖程3.5mm)時，胚料受到上模鍛壓負荷作用，材料往齒頂及胚料下端方向流動，在沖程90%(沖程6.3mm)時，材料往齒頂方向流動匯集，而在沖程末了，材料較均勻分佈向各部位流動。

圖8及圖9所示為二種尺寸環狀胚料之內齒輪(單一齒)之冷精鍛變形過程，在A圖中，使用胚料高度較小(30mm)進行鍛壓時，輪齒成形較為均勻分佈，但B圖中，胚料高度達50mm時，胚料在鍛壓初始有扭曲的傾向，且在鍛壓行程末端，有摺料之虞。因此，胚料外形確對內齒輪冷精鍛的品質有相當的影響，在設計時應加以留意。

圖10為內齒輪冷精鍛之輪齒等效應變分佈示例，由圖可知在齒輪齒頂處，尤其上下兩端輪齒部位呈現較高等應變，而在齒底處則等效應變較低，尤其在齒輪外徑處更低，因此，以冷精鍛製造內齒輪在輪齒處可獲得較佳的強化作用，這有益於內齒輪品質的提升。

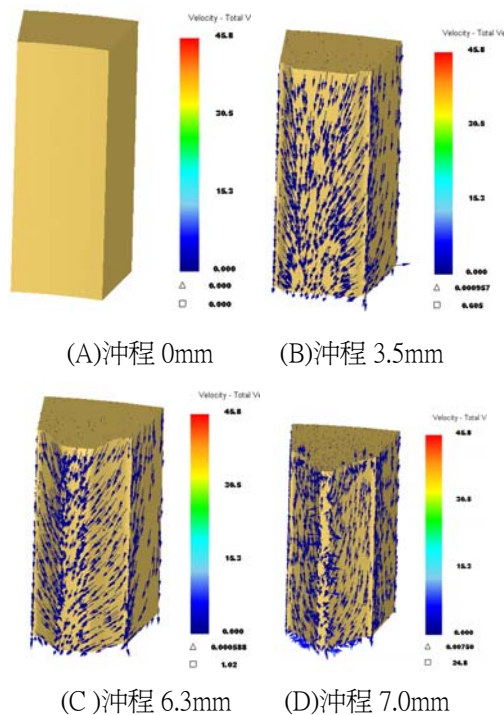
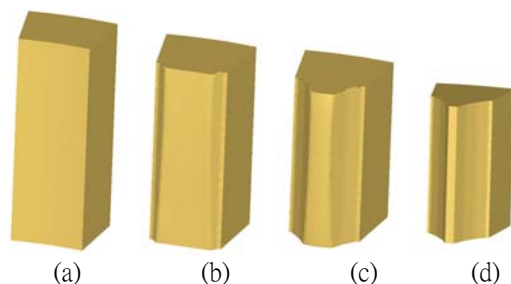
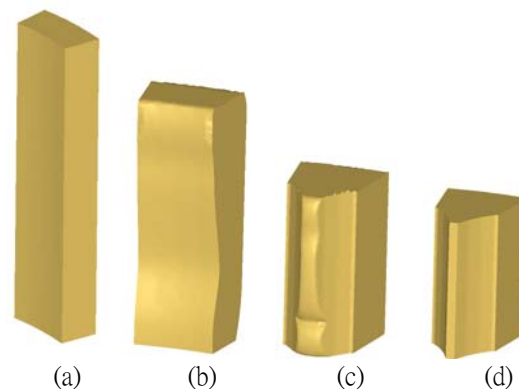


圖7 內齒輪冷精鍛各變形階段之速度場(胚料內徑 80 mm、外徑 100 mm、高度 30 mm)



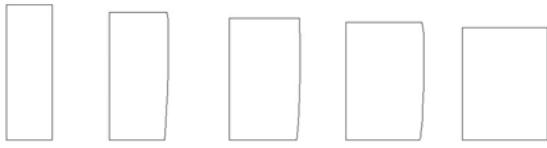
(A) 內徑 80 mm、外徑 100 mm、高度 30 mm之胚料變形



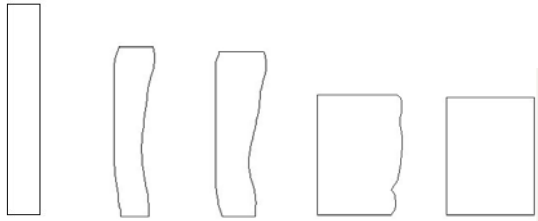
(B) 內徑 84 mm、外徑 96 mm、高度 50 mm之胚料變形



圖 8 不同尺寸環狀胚料內齒輪鍛壓成形演變比較



(A)內徑 80 mm、外徑 100 mm、高度 30 mm之胚料



(B)內徑 84 mm、外徑 96 mm、高度 50 mm之胚料

圖 9 不同尺寸環狀胚料之內齒輪鍛壓齒形(輪齒側向剖面形狀)充填形成演變

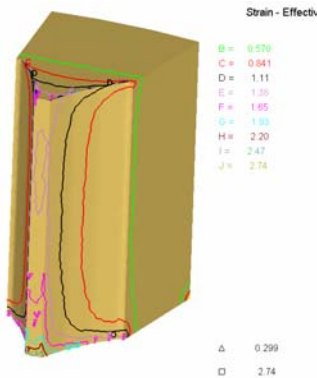


圖 10 內齒輪冷精鍛之輪齒等效應變分佈示例

## 二、成形負荷影響分析

成形負荷為冷精鍛成形相當重要考量要素，它影響鍛壓機器噸位數的選定、模具壽命的長短及內齒輪製品的品質。內外徑尺寸、應變硬化指數、材料強度係數及摩擦係數等不同特性胚料，其所需的鍛壓成形負荷是本研究探討的重點。

### (一) 外徑尺寸之影響

圖11為不同外徑與摩擦係數對成形負荷之影響。由圖表可明顯的發現摩擦係數越大時，所需鍛壓成形負荷也越大。當模具與胚料介面間的摩擦係數為0.5時，以胚料外徑尺寸100~99mm進行內齒輪鍛壓時，其成形負荷遞減，而胚料外徑99~96mm時，負荷呈遞增趨勢，最大負荷為325236 N。又

由圖可得知成形負荷最低值在摩擦係數為0.1與外徑為96mm時，其最低負荷為239307N。因此，不同胚料外徑所需成形負荷雖可能有最低值，但總體言之，模具與胚料介面間摩擦係數的影響較大，而胚料外徑對成形負荷的影響並非相當顯著。

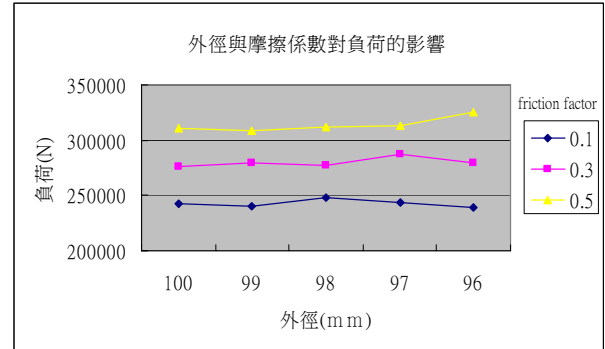


圖 11 外徑與摩擦係數對成形負荷之影響

### (二) 內徑尺寸之影響

圖12為不同內徑與摩擦係數對成形負荷之影響。由圖表可明顯的發現摩擦係數越大時，所需鍛壓成形負荷也越大。當模具與胚料介面間的摩擦係數為0.1時，以胚料內徑尺寸80~82mm進行內齒輪鍛壓時，其成形負荷遞增，而胚料內徑82~84mm時，負荷呈遞減趨勢，最大負荷為244391 N。又由圖可得知成形負荷最低值在摩擦係數為0.1與內徑為84mm時，其最低負荷為238116N，成形負荷最高值在摩擦係數為0.5與內徑為82mm時，其最高負荷為317529 N。因此，不同胚料內徑所需成形負荷雖可能有最低值，但總體言之，模具與胚料介面間摩擦係數的影響較大，而胚料內徑對成形負荷的影響並非相當顯著。

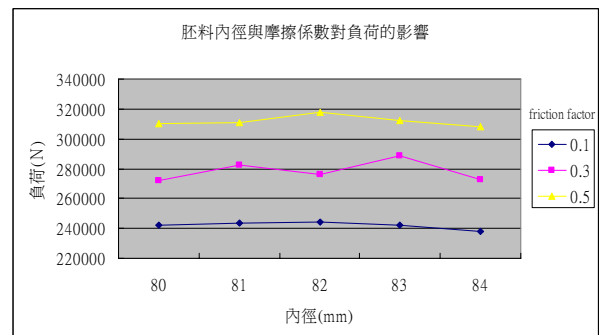


圖 12 內徑與摩擦係數對成形負荷之影響

### (三) 應變硬化指數之影響

圖13為不同應變硬化指數與摩擦係數對成形負荷之影響。由圖可知，模具與胚料介面間的摩

擦係數越大，所需成形負荷也越高，而且無論模具與胚料介面間的摩擦係數大小為何，胚料的應變硬化指數越大時，鍛壓成形負荷也越高。以摩擦係數0.1為例，當胚料的應變硬化指數為0.12時，其所需之成形負荷最低，為242027 N。摩擦係數為0.5且胚料之應變硬化指數為0.2時其負荷值高達353989 N。

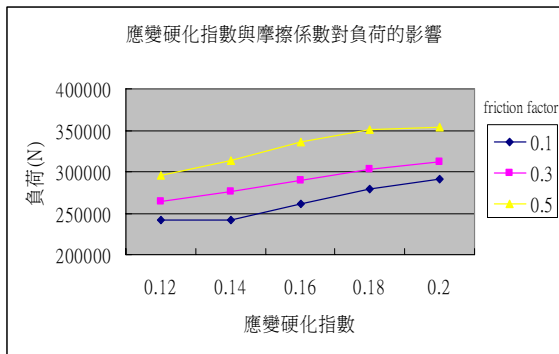


圖 13 應變硬化指數與摩擦係數對成形負荷之影響

(四) 材料強度係數之影響

圖14為不同材料強度係數與摩擦係數對成形負荷之影響。由圖可知，模具與胚料介面間的摩擦係數越大，所需成形負荷也越高，而且無論模具與胚料介面間的摩擦係數大小為何，胚料的強度係數越大時，鍛壓成形負荷也越高。以摩擦係數0.1為例，當胚料的強度係數為224時，其所需之成形負荷最低，為242027 N。摩擦係數為0.5且胚料之強度係數為400時其負荷值高達539488 N。

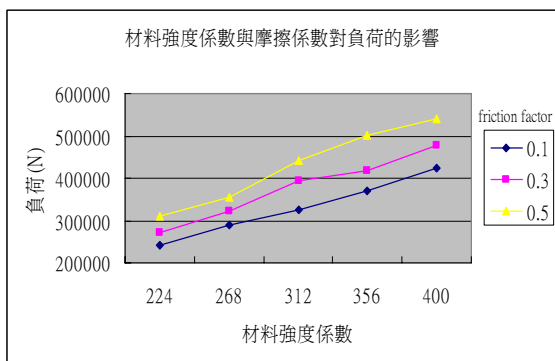


圖 14 強度係數與摩擦係數對成形負荷之影響

(五) 摩擦係數的影響

因胚料表面粗糙度對摩擦係數的效應最大，故胚料表面粗糙度以模具與胚料介面間的定剪摩擦係數來代表，而模具與胚料介面間的摩擦係數亦可代表內齒輪在冷精鍛鍛壓製程，模具與胚料

介面間的潤滑狀況，由上述1~4及圖11至圖14可清楚瞭解無論胚料的外徑、內徑、應變硬化指數、材料強度係數大小為何，模具與胚料介面間的摩擦係數越大，鍛壓成形所需的負荷也越高。

三、負荷預測模型的建構

將內齒輪冷精鍛有限元素模擬分析結果透過類神經網路的處理，即可獲得如圖13所示之類網路架構，在此網路各架構節點各有其互相對應的方程式，在圖中k、m、n、d、D 分別代表胚料的材料強度係數、胚料定剪摩擦係數及胚料應變硬化指數、內徑、外徑五項胚料特性之網路原始輸入值。第一層是由原始輸入值轉換之正規值，第二層分別代表由各網路方程式計算所得之第一層節點輸出值，它們也會做為下一層的輸入值。同理，其他各前一層之節點輸出值將作為後一層的輸入值。最後則是將網路系統的最終結果統合而轉化成真正輸出值，即由胚料特性之五種原始輸入值預測冷精鍛後所得之負荷。

另及表3及圖16分別為以任意五組不同特性胚料進行精鍛變形後工件負荷之網路預測值與有限元素模擬值比較，由表可知，平均誤差為3.778%，因此，以此種預測模式進行圓柱精鍛的預測，應有其方便性與參考性。

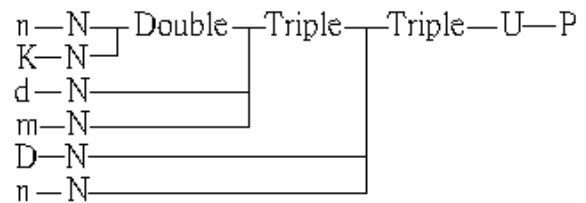


圖 15 內齒輪精鍛負荷預測模型

表 3 內齒輪冷精鍛成形負荷預測值與模擬值比較

	胚料特性					負荷		
	內徑 (d)	外徑 (D)	摩擦係數 (m)	應變硬化指數 (n)	材料強度係數 (K)	FEM 模擬值	AIM 預測值	誤差 (%)
1	81.0	96.5	0.15	0.13	252	294238	310000	5.08
2	80.5	96.5	0.45	0.19	380	600786	590000	1.80
3	82.5	96.5	0.25	0.13	250	309453	320000	3.30
4	83.5	96.5	0.35	0.15	370	503504	520000	3.17
5	83.9	96.5	0.45	0.17	280	444631	450000	5.54
平均誤差						3.78 %		

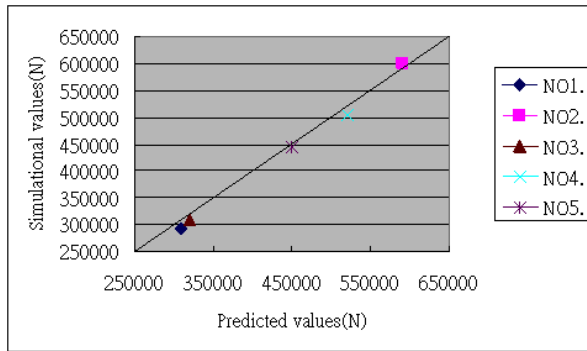


圖 16 內齒輪冷精鍛成形負荷之模擬值與預測值比較

## 肆、結論

本研究乃應用三維剛塑性有限元素數值模擬技術來分析不同胚料特性之內齒輪冷精鍛的變形狀況、成形負荷的影響，並使用類神經網路進行胚料特性與冷精鍛成形負荷關係的預測。研究後之結論：

- 一、胚料之內徑、外徑、高度等特性對內齒輪冷精鍛的變形及品質有相當影響。
- 二、胚料之內徑、外徑等對內齒輪冷精鍛成形負荷的影響不顯著，但應變硬化指數、材料強度係數及表面粗糙度等特性對成形負荷則有較為顯著的影響。
- 三、利用類神經網路進行胚料特性與內齒輪冷精鍛成形負荷的預測具有相當的方便性與信賴性。

## 參考文獻

1. 李洪波，直齒圓柱齒輪鍛擠成型加工，燕山大學博士學位論文，1993。
2. 張治民，直齒輪精密塑性成形研究，秦皇島：板材沖壓理論與先進技術研討會，2000。
3. 諸文俊，淺談國內外傘齒的精密模鍛加工，金屬成形加工，9(1)，1991。
4. 張玉華，直齒內齒輪精鍛成型工藝數值模擬及實驗研究，燕山大學碩士學位論文，2005。
5. F. Dohmann and O. Traudt, Metal flow and tool stress in cold forging of gear component, *Advanced Technology of Plasticity*, 2nd ICTP, Stuttgart, 1987.
6. O. P. Groover and B. L. Juneja, *Analysis of*

closed die forging of gear like element, *Advanced Technology of Plasticity*, 1st ICTP, Tokyo, 1984.

7. V. M. Drecun and T. A. Dean, A parametric CAD program for die sets for precision forging spur gears, *International Journal of Machine Tool manufacturing*, 31(2), 1991.
8. A. R. O. Abdel-Rahman and T. A. Dean, The quality of hot forged spur gear forms, Part II: Tooth form accuracy, *International journal of Machine Tool Design and Research*, 21(2), 1981.
9. D. Y. Yang, A three-dimensional rigid-plastical finite element analysis of spur gear forging using the modular remeshing technique, *Process instrument and Mechanical Engineering*, 25, 1991.
10. N. A. Abdul And T. A. Dean, An analysis of the forging of spur gear forms, *International Journal of machine tool design and research*, 26 (2), 1986.
11. N. R. Chitkara, Near net shape forging of spur gear forms:an analysis and some experiments, *International Journal of Mechanical Science*, 38(8-9), 1996.
12. 李洪波、呂玫、駱俊廷、趙軍，直齒輪精密塑性成形時齒面裂紋的產生原理及控制方法，*塑性工程學報*，2003。
13. 伍太賓，胚料形狀尺寸對齒輪冷擠壓成形的影響，*現代製造工程*，8期，2004。
14. S. Kobayashi, S. Oh, and T. Altan, *Metal forming and the finite-element method*, Oxford University Press, 1989.
15. 蘇侃，混合潤滑模型之建立(II)，國科會九十年專題研究計畫，2002。
16. 甘永立，幾何量公差與檢驗，上海科學技術出版社，1993。
17. C. L. Philip Chen and A. D. McAulay, Robot Kinematics Learning Computations Using Polynomial Neural Networks, *International Conference on Robotics and Automation*, Sacramento, California, April 1991。
18. T. Kondo, GMDH neural network algorithm



using the heuristic self-organization method and its application to the pattern identification problem, SICE, 1998.

19. T. Kondo, The learning algorithms of the GMDH neural network and their application to the medical image recognition, SICE, 1998.
20. T. Kondo, A. S. Pandya and J. M. Zurada, Logistic GMDH-type neural networks and their application to the identification of the x-ray film characteristic curve, IEEE, 1999.
21. A. Patrikar and J. Provence, Nonlinear system identification and adaptive control using polynomial networks, Mathl. Comput. Modeling, vol.23, No.1/2, 1996.
22. A. R. Barron, Predicated square error: a criterion for automatic model selection in self-organizing methods in modeling: GMDH type algorithm, Farlow, S. J. Ed. Marcel-Dekker, New York, 1984.

# An Influence Analysis and Prediction of Billet's Characters on The Cold Precision Forging for internal Gear

Yuan-Chuan Hsu<sup>1\*</sup> Wann-Yih Lin<sup>1</sup> Gwo-Jen Hwang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Association professor, Department of Mechanical and Computer-Aided Engineering, National Formosa University

<sup>2</sup> College student, Department of Mechanical and Computer-Aided Engineering, National Formosa University

## Abstract

Gear is an important component or part used in mechanical system to transmit power. The process of precision gear forging has been developed recently because of its advantage of material and cost reduction, improved gear strength and fatigue resistance. Therefore, the forming process used for manufacturing gears has been a focus technique now. In the current study, the 3D rigid-plastic finite element simulation technique was used to analyze the plastic forming of cold forging for internal gear. The influences of characters such as inside diameter, outside diameter, harden-strained exponent, strength coefficient and surface roughness, on cold forging loads were explored firstly. Then, the relation predictive model of the five billets' characters to the cold forging load was constructed through the neural network. The results indicated that the inside diameter, outside diameter and height of billet had obvious influence on the forging deformation and product quality, but their influence on forging load was less. The harden-strained exponent, strength coefficient and surface roughness of billet had obvious influence on forging load, and the larger values the three characters had, the higher forging load it needed. The predictive model constructed by neural network can also provide valuable references in predicting the forging deformation and forging load for internal gear.

**Key Words:** Internal gear 、 Cold precision forging 、 Finite element simulation 、 Neural network.

---

\*Corresponding Author: Department of Mechanical and Computer-Aided Engineering, National Formosa University, No. 64, Wen-Hua Road, Hu Wei, Yun Lin, 63208, Taiwan.

Tel: +886-5-6315306

Fax: +886-5-6315310

E-mail: [jasonych@nfu.edu.tw](mailto:jasonych@nfu.edu.tw)