

以有限元素模擬及類神經網路進行內齒輪冷精鍛模具應力分析與預測

許源泉^{1*} 林萬益² 梁三和³

¹國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系 副教授

²國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系 講師

³國立虎尾科技大學機械與電腦輔助工程系 大學生

摘 要

以冷精鍛塑性成形法來製造齒輪，因具有節省材料、強度高、抗疲勞性能佳等等諸多優點，故已漸倍受重視，但如何有效穩定模具品質延長模具壽命是冷精鍛齒輪製程中頗為重要的課題。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模具的影響，其後利用類神經網路建構出這五種胚料特性與冷精鍛模具應力的關係預測模式。研究發現，在上模的齒頂及下模的齒腹為應力集中區，需特別注意，以提高模具的壽命。胚料的外徑及應變硬化指數，對於上模模具應力雖有影響但較不顯著，而胚料之材料強度係數及胚料表面粗糙度或潤滑效果對模具應力則有較為顯著的影響。此外，利用類神經網路建構內齒輪冷精鍛時，胚料特性與模具應力間的預測模式，具有相當的方便性與參考性。

關鍵詞：內齒輪、冷精鍛模具、有限元素模擬、類神經網路。

*連繫作者：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

齒輪是各類機械中應用頗為廣泛的重要傳動零件，而齒輪加工品質直接影響各種機器設備的可靠性。目前齒輪加工大都利用切削加工法，但因其材料利用率低、能源耗費大、生產效率低，尤其金屬流線被切斷，使得齒輪強度與疲勞壽命降低。近年來，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的主要方法之一，尤其冷精鍛成形件的表面平滑無氧化皮，尺寸精度高，且因加工硬化促使鍛件機械性質的提高，利用此種特性，用較低廉材料鍛造後可以直接使用，鍛造後僅小量切削加工，甚至不需再後續加工，因而節約材料及後續加工之浪費。因此，國內外逐漸採用塑性成形法來製造齒輪製品[1-2]。

近些年來，產品專業化及大量生產的要求越趨重要，模具在生產的應用也相對增加，模具壽命的要求更是越來越高。鍛模壽命的長短對鍛造生產的影響甚鉅，良好的鍛模壽命可減少鍛件成本，提高稼動率，更是鍛造自動化發揮功效的先決條件，因此，如何有效穩定模具品質延長模具壽命是頗為重要的課題。

正齒輪塑性成形的研究主題可歸納為齒輪鍛造變形規律分析、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[3] 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[4] 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[5] 開發一套圓柱正齒輪精鍛模具參數化CAD軟體。Abdel[6] 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[7] 利用剛塑性有限元素法分析了圓柱正齒輪的鍛造過程。Abdul等人[8] 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[9] 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[10] 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[11] 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，或因齒型充填困難，需要較大的成形力量，容易造成模具應力過大，以致影響模具壽命及製品品質，因此找出胚料特性對鍛壓模具應力的影響趨勢，甚至儘可能的進行事前的預測分析是頗值得正視的課題，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模具應力的影響，並經由類神經網路建構胚料特性與鍛壓模具應力關係之預測模式，以對模具應力或壽命提供參考性的預知，以強化冷精鍛模具設計效能。

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[12]：

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

其中 σ 是等效應力， ϵ 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

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

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變形及模具應力的影響，於模擬分析時規劃出的實驗因子為外徑

(D)、內徑(d_0)、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[13-14],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0.5mm/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。

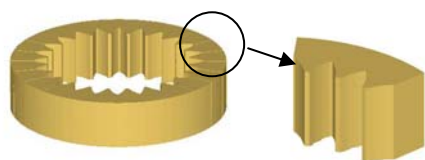


圖1 內齒輪外觀示意圖

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

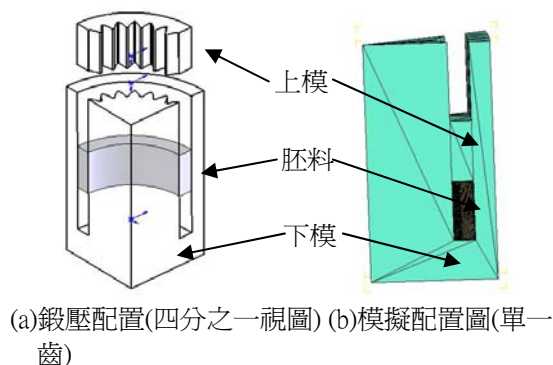


圖2 內齒輪鍛壓示意圖

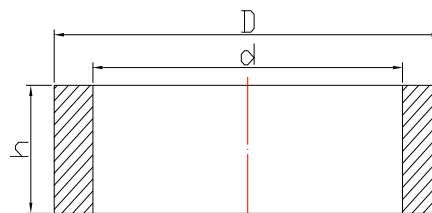


圖3 空心圓柱胚料示意圖

表1 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	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[15-16]。

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[17-18]。

如圖6為神經網路的結構。[19] 它是由隱藏層的 Σ (summation)單元及輸出層的 Π (product)單元所組成。 Σ 單元的輸出是其權重總計,而 Π 單元的輸出是其輸入的乘積。因此,第 j 個 Σ 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：

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

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。

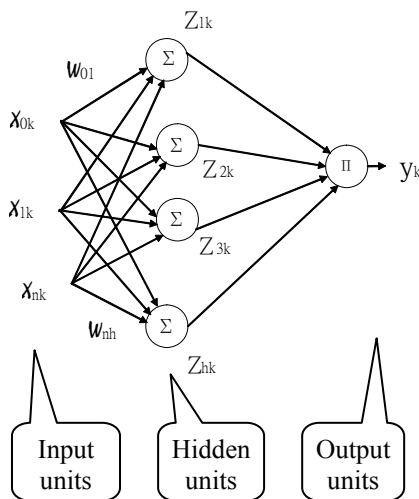


圖 4 神經網路的結構[18]

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

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

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

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

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， σ_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[20]。

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模具等效應力的關係預測模式。

參. 結果與討論

一、材料流動變形與模具應力分析

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充填齒型而形成完整輪齒，最後可得預期的內齒輪製品。圖6為利用內徑80mm、外徑100mm、高度34.7mm之胚料進行內齒輪冷精鍛之沖程—模具等效應力趨勢圖及對應之輪齒形成演變，由圖可知，在鍛壓成形初始階段，上模一接觸胚料開始鍛壓初始，即承受急遽升高等效應力，達到70Mpa左右，當胚料以頓粗變形模式逐漸成形後，因可用最少的變形力來進行變形，其冷精鍛模具應力也就較和緩升高，但到輪齒接近成形末段，由於接近輪齒型完全充滿階段，故變形阻力再次快速升高，直至輪齒完全充滿模穴成形為止。

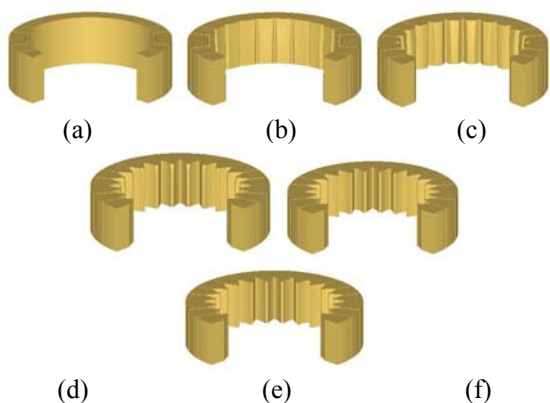


圖 5 內齒輪冷精鍛成形各階段變形的發展

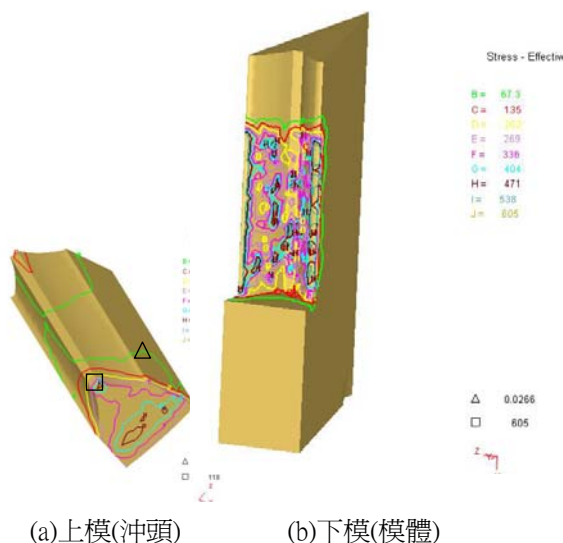


圖 7 內齒輪冷精鍛之模具等效應力分佈示例

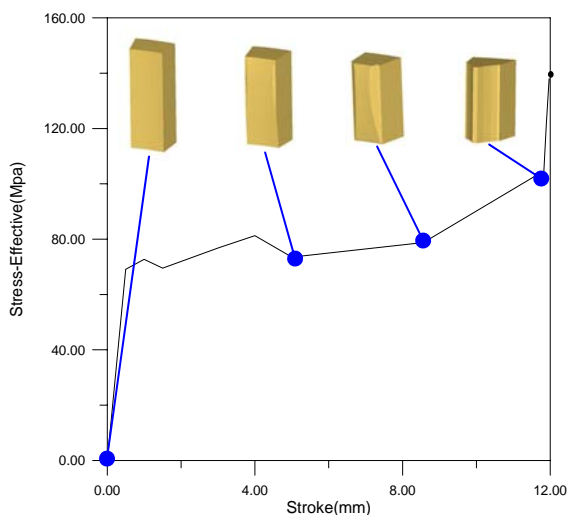


圖 6 內齒輪冷精鍛沖程—模具等效應力曲線圖及對應之輪齒形成演變(胚料內徑 83mm、外徑 100mm、高度 34.7mm)

圖7為內齒輪冷精鍛之模具等效應力分佈示例，由圖可知，上模(沖頭)最大等效應力在上模端部之輪齒狀尖頂處(即用來形成齒輪工件之齒底圓部位)，如圖標示之「□」處，此乃該處之受壓面積較小，沖頭承受較高的壓力。因此，以冷精鍛製造內齒輪在沖頭脆弱處應特別設計，以免出現沖頭崩塌或斷裂等現象。

二、 模具等效應力影響分析

(一) 內徑大小與摩擦係數的影響

如圖8所示為胚料內徑與摩擦係數對冷精鍛上模等效應力的影響，由圖可知，胚料內徑大小對上模(沖頭)的等效應力有不同的影響。一般而言，內徑越大其上模模具等效應力也越高，而在高摩擦係數(0.5)的情況下其差異較大，達19.4%，在低摩擦(0.1)時其差異則較小，為16.5%。但胚料與模具介面間的摩擦係數越大則模具等效應力也越高，因此在冷精鍛內齒輪時，胚料內徑的設計也應酌情考慮，並配合表面粗糙度較小的胚料或適宜的潤滑處理以降低模具應力是有其需要。

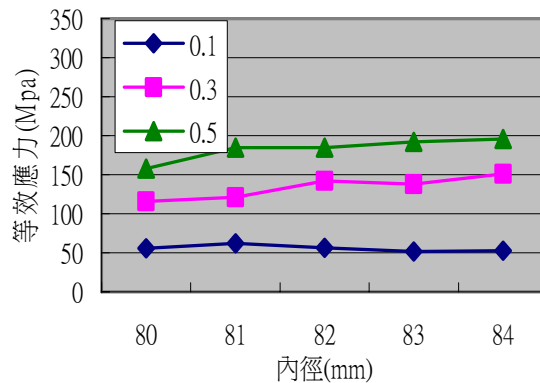


圖8 胚料內徑與摩擦係數對上模等效應力的影響

(二) 外徑大小與摩擦係數的影響

如圖9所示為胚料外徑與摩擦係數對冷精鍛上模等效應力的影響，由圖可知，胚料外徑大小對上模(沖頭)的等效應力影響並非相當顯著，不論何種摩擦係數，胚料外徑對模具應力的影響皆小於6.8%。但胚料與模具介面間的摩擦係數越大則模具等效應力也越高。因此，在冷精鍛內齒輪時，胚料外徑大小對模具應力影響並非相當顯著，但使用表面粗糙度較小的胚料及合宜的潤滑處理將有助於因降低摩擦而使得模具等效應力的降低，以提高模具壽命。

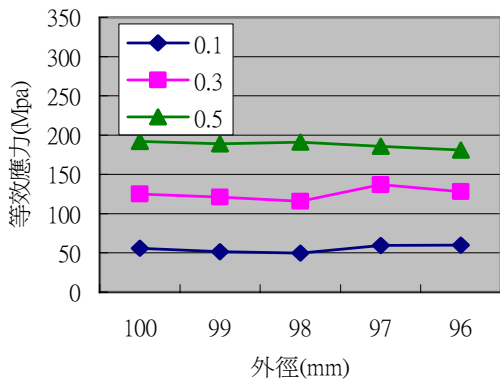


圖9 胚料外徑與摩擦係數對上模等效應力的影響

(三) 材料應變硬化的影響

圖10為不同應變硬化指數與摩擦係數對模具等效應力之影響。由圖可知，模具與胚料介面間的摩擦係數越大，模具等效應力也越高，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對內齒輪冷精鍛上模模具應力的影響並非相當顯著。

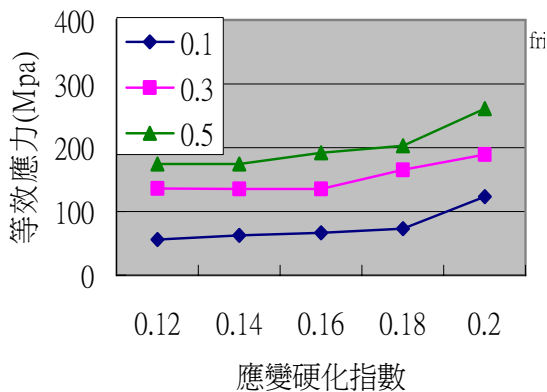


圖10 胚料應變硬化指數與摩擦係數對模具應力的影響

(四) 材料強度係數的影響

圖11為不同材料強度係數與摩擦係數對模具等效應力之影響。由圖可知，模具與胚料介面間的摩擦係數越大，模具等效應力也越高，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，模具等效應力也越高。但在高摩擦係數的情況下其差異更大，而在低摩擦時其差異則較不顯著。譬如在摩擦係數0.5的情況下，當材料強度係數分別為224與400時，模具等效應力各為158Mpa及378Mpa，兩者相差58.2%，但在摩擦係數等於0.1時，當材料強度係數為224與400，其模具等效應力各分別為55.9Mpa及99.9Mpa，兩者相差僅20.0%。

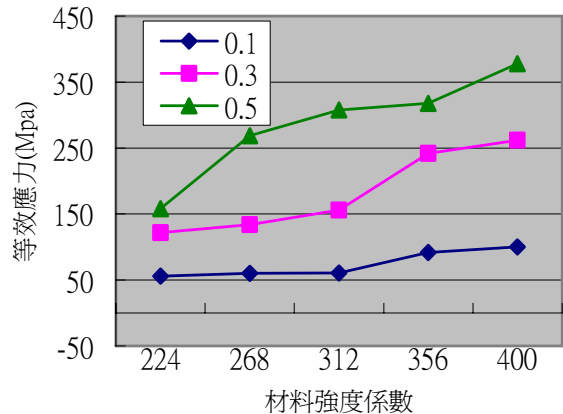


圖11 胚料強度係數與摩擦係數對模具應力的影響

(五) 摩擦係數的影響

摩擦係數對於上模模具等效應力有著比較大的影響，摩擦係數增加，模具應力就會隨之增加，由上述的圖11至圖14皆可發現，不論任何內徑、外徑、應變硬化指數及材料強度係數的胚料，胚料與模具介面間的摩擦係數越大則模具應力也越大。總之，使用表面粗糙度較小的胚料及合宜的潤滑處理將有助於因降低摩擦而使得模具等效應力的降低，以提高模具壽命。

三、模具應力預測模型的建構

將上述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12所示之類網路架構，而此自動產生最佳網路結構上模應力的平均平方誤差FSE等於252.417，而預測平方誤差PSE為253.81，下模應力的平均平方誤差FSE等於157.117，而預測平方誤差PSE為157.322，在此網路各架構節點各有其互相對應的方程式，在圖中 in、out、k、u、n 分別代表胚料的內徑、外徑、材料強度係數、胚料定剪摩擦係數及胚料應變硬化指數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內齒輪冷精鍛之模具等效應力值。

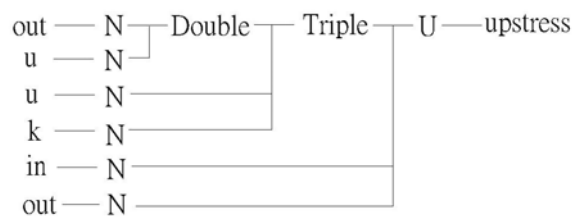


圖12 模具應力的預測模型

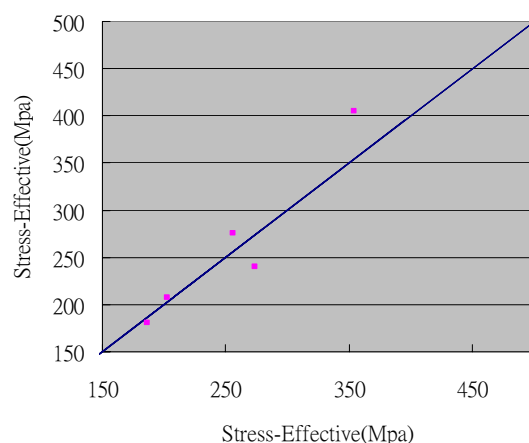


圖13 內齒輪模具應力預測和模擬值比較

表3 內齒輪產生等效應力預測值和模擬值比較

	胚料特性					模具應力		
	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	181	187	3.3
2	80.5	96.5	0.45	0.19	380	276	256	7.3
3	83.8	98.5	0.45	0.16	300	208	203	2.4
4	83.5	96.5	0.35	0.15	370	240	274	14.1
5	82.4	97.5	0.25	0.14	260	405	354	12.6
平均誤差						7.9 %		

另表3及圖13分別為以任意五組不同特性胚料進行冷精鍛，其上模模具應力之網路預測值與有限元素模擬值比較，由表可知，平均模具應力誤差為7.51%，因此，以此種預測模式進行模具應力的預測，應有其方便性與參考性。

肆. 結論

本研究即利用有限元素模擬技術來分析具有不同內外徑、應變硬化指數、材料強度係數、摩擦係數的胚料特性對模具應力的影響，並經由類神經網路建構模具應力預測模式。研究發現，在上模的齒頂及下模的齒腹為應力集中區，需特別注意，以提高模具的壽命。而胚料外徑及應變硬化指數，對於上模模具應力雖有影響但並非相當顯著，而胚料之材料強度係數及胚料表面粗糙度或潤滑效果對模具應力則有較為顯著的影響。此外，利用類神經網路建構內齒輪冷精鍛時，胚料特性與模具應力間的預測模式，具有相當的方便性與參考性。

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. F. Dohmann and O. Traudt, Metal flow and tool stress in cold forging of gear component,

- Advanced Technology of Plasticity, 2nd ICTP, Stuttgart, 1987.
4. O. P. Groover and B. L. Juneja, Analysis of closed die forging of gear like element, Advanced Technology of Plasticity, 1st ICTP, Tokyo, 1984.
 5. 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.
 6. 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.
 7. 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.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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。
 11. 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。
 12. S. Kobayashi, S. Oh, and T. Altan, Metal forming and the finite-element method, Oxford University Press, 1989.
 13. 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。
 14. 甘永立, 幾何量公差與檢驗, 上海科學技術出版社, 1993。
 15. 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.
 16. T. Kondo, GMDH neural network algorithm using the heuristic self-organization method and its application to the pattern identification problem, SICE, 1998.
 17. T. Kondo, The learning algorithms of the GMDH neural network and their application to the medical image recognition, SICE, 1998.
 18. 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.
 19. A. Patrikar and J. Provenca, Nonlinear system identification and adaptive control using polynomial networks, Mathl. Comput. Modeling, vol. 23, No.1/2, 1996.
 20. 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.

Employing Finite Element Simulation and Neural Network to Analyze and Predict the Stress of Cold Forging Die for Internal Gear

Yuan-Chuan Hsu^{1*} Wann-Yih Lin¹ San-Ho Liang²

¹ Association professor, Department of Mechanical and Computer-Aided Engineering, National Formosa University

² College student, Department of Mechanical and Computer-Aided Engineering, National Formosa University

Abstract

Due to the advantage of material reduction, improved strength and fatigue resistance etc., the employment of cold forging process to manufacture gears has been an important technique. But how to effectively promote the die quality and increase its service life is the important issue in cold precision forging process for gear production. 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 tooth top of upper die and the tooth flank were the stress-centered zone. The outside diameter and harden-strained exponent of billet did not have obvious influence on the stress of upper die, while the material strength coefficient and surface roughness or lubricant effect of billet had obvious influence on die stress. 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 forging die 、 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