

# 胚料熱傳特性對擠伸模具磨耗的影響分析及預測

許源泉<sup>1</sup> 宋紹瑩<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>2</sup>國立虎尾科技大學機械與機電工程研究所 研究生

## 摘 要

在擠伸加工中，磨耗會改變模具形狀與尺寸，不但影響加工製程與製品品質，也減少模具使用壽命，因此預測及控制模具磨耗是頗為重要的課題。本研究乃利用有限元素模擬來分析在熱間擠伸加工中，胚料熱傳特性對模具磨耗的影響，並建構其預測模式。研究發現，利用有限元素模擬可有效進行熱間擠伸模具的磨耗分析，擠伸胚料的初始溫度及熱容量越低，其模具的磨耗量也越大，但胚料的熱輻射係數對擠伸模具的磨耗量影響並不顯著。此外，利用類神經網路建構胚料熱傳特性與模具磨耗間的預測模式有相當的方便性與參考性。

**關鍵詞：**擠伸模具、熱傳特性、磨耗、有限元素法

## 壹、前言

模具磨耗的程度通常與被擠伸材料的尺寸與材質、模具的特性與幾何形狀、擠伸製程參數等因素皆有密切關係。模具在一定的工作條件下是非常惡劣的，在高壓、高溫下承受劇烈摩擦、磨損的作用下，根據現場的生產統計資料顯示模具的主要失效形式有三種：摩擦磨耗失效(占 65%)、疲勞裂痕失效(占 18%)、塑性變形塌陷失效(占 15%)。由於在模具的設計上通常只注意擠伸製品的外形、尺寸的精確與否，而對模具在擠伸過程中的負荷應力狀況和強度考慮較少，及擠伸溫度的上下波動產生的熱應力和擠伸壓力重疊加在模具上，都容易使模具發生破裂，因此在模具的設計過程中如何減輕設計應力、降低磨耗及強化薄弱部位以提高模具壽命是非常重要的課題[1]。

在擠伸過程中，塑性變形功和摩擦功大部分轉化為熱，導致擠壓筒、擠伸模、變形材料的溫度上升。另一方面，由於模具的導熱作用，擠壓筒內胚料溫度的下降。擠伸製品再出模口處的實際溫度，取決於胚料加熱溫度、擠壓筒加熱溫度、擠伸比、擠伸速度、合金的性質、摩擦與潤滑條件、擠伸模的冷卻條件等因素的綜合作用效果，確定擠伸過程中模孔附近的溫度變化，主要有理論預測法和實測法。熱擠伸模具是生產各類型材的主要構件，它的結構形式、各部分結構尺寸及所用材料對擠伸壓力、金屬流動的均勻性、製品的尺寸穩定性以及自身的使用壽命影響極大[2]。熱擠伸模具在高溫、高壓下承受劇烈的摩擦、磨損，極易發生破裂、塌陷、熱疲勞、磨耗、局部變形或局部壓塌等問題，因此，擠伸模具的設計及磨耗問題是頗值得探討的議題[3]。

Lee & Im[4]曾利用剛熱黏塑性有限元素法及 Archard 磨耗模式，來探討前向冷擠製模具的磨耗問題。Lee 等人[5]為設計出最佳熱擠伸模具外形，他們將熱機有限元素模型及半實驗數學顯微組織演化模型結合，以獲得均勻顯微組織以改善擠伸製品機械性質。Wu & Hsu[6]結合有限元素法、多項式網路及基因演算法來建構出擠伸模具最佳形狀的設計法。Lin 等人[7]曾利用梯度法演算及剛熱黏塑性有限元素法來進行熱間擠伸模具外形的最佳化設計以改善模具壽命。Arif 等人[8]

曾對擠伸模具外形與模具失效模式關係的相關研究進行分析。Noorani-Azad 等人[9]應用切片法、有限元素法及實驗等來探討錐形模及曲形模對鋁材冷間擠伸負荷的影響，並進而試圖求取最佳模具外形。段新峰[10]以有限元素軟體 FORGE2 V3.0 對正擠壓過程中的溫度變化、金屬流動、微觀組織變化進行預測，將分析結果與實驗觀測互相比較。最後提出一種新的擠壓技術—等晶粒擠壓，用以控制微觀組織沿長度方向的變化。

然而有關胚料熱傳特性對擠伸模具磨耗的影響分析及預測的研究則顯少，因此本研究乃利用有限元素模擬來分析溫度、熱傳導及熱輻射等熱間擠伸胚料熱傳特性對模具磨耗的影響，並試圖建構這些胚料熱傳特性與模具磨耗關係的預測模式。

## 貳、材料熱傳特性

熱傳遞是溫度在不同的物體間所發生的能量傳遞現象，此傳遞能量稱為熱，常見的三種熱傳遞方式為傳導、對流與輻射。本研究主要探討胚料之溫度、熱傳導及熱輻射三種特性對擠伸模具磨耗的影響。

根據分子運動學說，溫度係一物體之分子運動速率的高低，當其物體分子運動之速率高時，則謂之高溫度，反之稱之低溫度。溫度對胚料的塑性有很大的影響，就大部份的金屬材料而言，隨著溫度的升高，塑性增加，變形阻力降低。但胚料如果加熱不均、溫度過高或過低，使得表面氧化嚴重和潤滑不良，也會導致摩擦力增大而使模具過早磨耗。

凡熱由一物體之區移至於另一區，或由互相接觸之兩物體中之一物體移至於另一物體，而物體上各部的物質並無移動之痕跡者，謂之熱傳導。單位質量的某物體，使其溫度升高一度所需之熱量，謂之此物體的熱容量。需熱多者為之熱容量大，需熱少者，謂之熱容量小。熱容量可用來評量材料儲存熱能的能力，在熱傳遞分析中，導熱性與熱容量的比值稱之為熱擴散，熱擴散愈大的材料，對周圍環境變化的反應也愈快，而熱擴散愈小的材料，則需要比較長時間才能達到新平衡狀態。

熱可藉著波運動來傳遞較熱的物體至較冷的

物體，此種過程謂之熱輻射。凡高溫度之物體，恆有輻射熱傳於低溫度之物體，其輻射之量則與兩物體間溫度差及構成物體的原料有關。在對流和熱導中，傳遞熱量的大小只決定在於溫度差，而在輻射時，若兩組溫度相同的物質表面，則絕對溫度高的兩表面之間的輻射熱要比低溫一組的大。通常導體材料的輻射率會隨著溫度提昇而增加，而增加值則端視材料而定。

## 參、研究方法

### 一、有限元素模擬分析

有限元素法是一種強而有力的金屬成形解析法，具有應用的普遍性及幾何形狀的適應性，在預測成形負荷、變形體的形狀和尺寸變化、應力應變分佈以及確定最佳製程參數等方面顯示出較大的優越性和實用性。有限元素法於推演的過程中，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[18]：

$$\pi = \int_v \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dv - \int_s F_i u_i ds \quad (1)$$

其中  $\bar{\sigma}$  是等效應力， $\dot{\varepsilon}$  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

$$\delta\pi = \int_v \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dv + k \int_v \dot{\varepsilon}_v \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{s_F} F_i \delta u_i ds = 0 \quad (2)$$

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

本研究之熱間擠伸如圖 1 所示，而有限元素模擬分析乃是利用 DEFORM-2D 商用軟體來進行，如圖 2 所示為其模擬配置及網格劃分情形，表 1 為胚料與模具特性，亦即胚料為直徑 50mm、高度 60mm 之 AISI-5132，初始溫度為 800℃、850℃、900℃，熱容量 3.2、3.4、3.6，熱輻射係數 0.5、0.6、0.7，擠伸後工件直徑為 20mm，沖頭及下模為 SKD-61，初始溫度為 100℃。模擬時胚料、沖頭及下模設定為 1000 個四邊形元素之塑性體，沖頭與下模設定為剛體，沖頭以 1 mm/sec 速度下壓 20 mm 行程，胚料與模具介面之定剪摩擦係數則設定為 0.1。利用胚料之初始溫度、熱容量及熱輻射

係數以全因子(3<sup>3</sup>=27)的方法進行模擬，本研究乃在探討胚料之初始溫度、熱容量及熱輻射係數三種熱傳特性對擠伸模具磨耗的影響與預測，故模擬之因子及水準規劃如表 2 所示，共進行 27 組模擬分析。

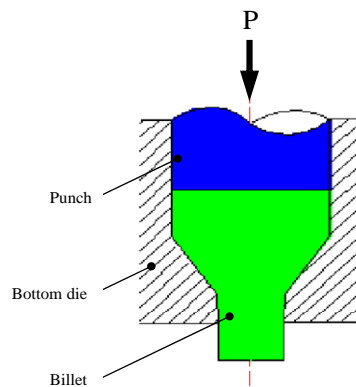


圖 1 熱間擠伸之胚料與模具配置

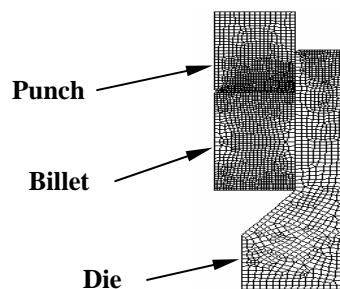


圖 2 模擬時胚料與模具的配置(右半視圖)

表 1 胚料與模具特性

擠伸胚料	材 質	AISI-5132
	溫度(℃)	800、850、900
	熱容量(N/mm <sup>2</sup> *℃)	3.2、3.4、3.6
	熱輻射係數(N/sec*mm <sup>2</sup> *℃ <sup>4</sup> )	0.5、0.6、0.7
擠壓沖頭與模具	材質	SKD-61
	溫度(℃)	100
	楊氏係數(Mpa)	210000
	蒲松氏比	0.3
	熱膨脹係數(mm/mm*℃)	1.17×10 <sup>-6</sup>
	熱傳導係數(N/sec*℃)	30.1
	熱容量 (N/mm <sup>2</sup> *℃)	3.588
環境	熱輻射係數(N/sec*mm <sup>2</sup> *℃ <sup>4</sup> )	0.3
	沖頭擠壓速度(mm/sec)	1
	定剪摩擦係數	0.1
	熱對流係數 (N/sec*mm <sup>2</sup> *℃)	0.02

表 2 模擬因子及水準規劃

因子 \ 水準	1	2	3
初始溫度(°C)	800	850	900
熱容量(N/mm <sup>2</sup> *°C)	3.2	3.4	3.6
熱輻射係數(N/sec*mm*°C <sup>4</sup> )	0.5	0.6	0.7

本研究之磨耗量計算係依 Archard 之磨耗模式如式[12]為之：

$$V_w = k \cdot \frac{L \cdot P}{H} \quad (3)$$

上式中， $V_w$  為磨耗體積， $k$  為磨耗係數， $L$  為滑移距離， $P$  為壓力， $H$  為維氏硬度。為計算出有限元素模擬分析所需的磨耗係數  $k$ ，進行磨耗試驗時係利用不同的溫度、負荷的改變，量測試驗所得磨耗量，並進而求出磨耗係數如表 3 所示。利用熱間擠伸有限元素模擬分析求得模具各節點的應力、溫度與速度值，並參照磨耗試驗求得之試驗磨耗係數(如表 3)，以插值法求出模擬分析之磨耗係數( $k$ )，其後再套入所建構的 Archard 磨耗模式，來計算出各模擬步數之各節點的預估磨耗量。

表 3 各種磨耗試驗條件之磨耗係數值

試驗條件	磨耗係數 ( $k$ )	試驗條件	磨耗係數 ( $k$ )
100°C - 10kg	3.976E-03	300°C - 10kg	2.471E-03
100°C - 20kg	3.301E-03	300°C - 20kg	1.013E-03
100°C - 30kg	1.982E-03	300°C - 30kg	7.592E-04
200°C - 10kg	4.285E-03	400°C - 10kg	4.054E-04
200°C - 20kg	2.702E-03	400°C - 20kg	4.826E-04
200°C - 30kg	6.241E-04	400°C - 30kg	7.271E-04

## 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 演算法是一種利用啟發自我

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。[13-14]而此種網路機構之啟發是自我組織法，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[15-16]。

如圖 3 為神經網路的結構[17]。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：

$$z_{jk} = \sum_{i=0}^n w_{ij} x_{ik} \quad (4)$$

而網路的輸出  $y_k$  可表示為：

$$y_k = \prod_{j=1}^h z_{jk} \quad (5)$$

其中  $h$  是網路隱藏單元的數目。將公式(6)(7)結合，即可獲得如下之輸出式，這也就是 Abductive 網路節點的通式：

$$y_k = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n C_{ijk} x_i x_j x_k + \dots \quad (6)$$

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。

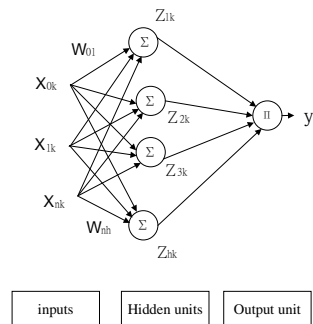


圖 3 神經網路的結構[16]

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

$$PSE = FSE + KP \quad (7)$$

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

$$KP = CPM \times \frac{2\sigma_p^2 K}{N} \quad (8)$$

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(9)，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[18]。

在本研究中，即是將有限元素模擬分析所得的結果經由 Abductive 預測網路來處理，以自動建構出網路的最佳架構及方程式，也就是建立擠伸胚料之溫度、熱容量、熱輻射係數與模具磨耗體積的關係模式。

## 肆、結果與討論

### 一、熱間擠伸模具磨耗之有限元素模擬分析

利用不同特性的胚料進行有限元素模擬，並將擠伸模擬各時間各節點的負荷、速度、溫度值算出其磨耗量，這些結果可用來進行胚料特性對模具磨耗量的影響分析及建構預測模型。圖 4 為利用錐形擠伸模之有限元素模擬時各階段變形過程及相應的擠伸沖程一負荷曲線圖。又圖 5 為錐形模擠伸模之下模速度場分佈圖，圖 6 為下模溫度場分佈圖。不論是速度場或溫度場的最大值皆

在擠伸模錐角與出口徑接合處。換言之，擠伸模錐角與出口徑接合處即模具磨耗量最大的部位，又由圖 7 可知，模具的磨耗量將隨著擠伸加工時間而增加。

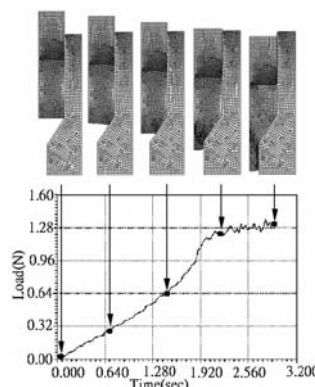


圖 4 錐形擠伸模模擬各階段變形過程對應負荷圖

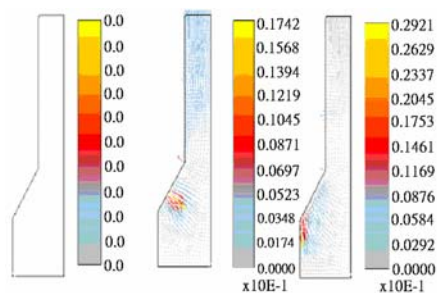


圖 5 錐形模擠伸之速度場分佈圖

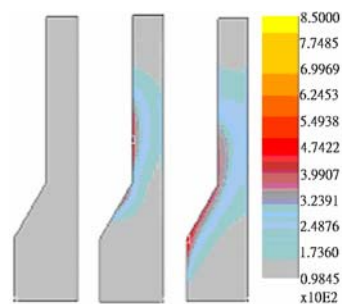


圖 6 錐形模擠伸之溫度場分佈圖

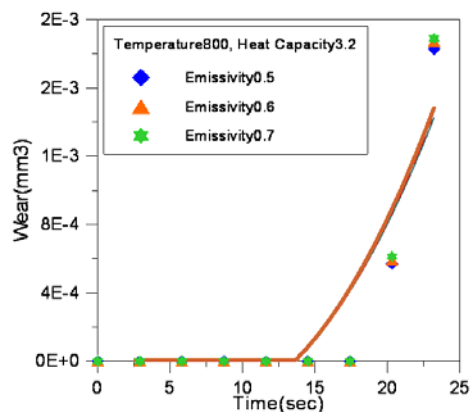


圖 7 熱間擠伸模具磨耗量的演變

## 二、胚料熱傳特性的影響

如圖 8 所示為溫度對熱間擠伸模具磨耗量的影響比較，由圖可知，在熱容量  $3.2 \text{ N/mm}^2\text{°C}$ 、熱輻射係數  $0.6 \text{ N/sec}\cdot\text{mm}\cdot\text{°C}$  時，胚料初始溫度越低，擠伸模具的磨耗量也越大， $850\text{°C}$  的磨耗量比  $800\text{°C}$  小  $7.88\%$ ， $900\text{°C}$  的磨耗量比  $800\text{°C}$  小  $14.21\%$ 。在擠伸加工中，雖可通過提高擠伸溫度，降低擠壓力來減少模具的磨耗。但由溫度的上下波動產生的熱應力和擠伸力疊加在模具上，易使模具產生破裂，因此不可過分提高擠伸溫度來降低摩擦力及磨耗。

如圖 9 所示為胚料熱容量對熱間擠伸模具磨耗量的影響，由圖可知，在胚料初始溫度為  $850\text{°C}$ 、熱輻射係數  $0.7 \text{ N/sec}\cdot\text{mm}\cdot\text{°C}$  時，熱容量愈低的胚料，熱間擠伸模具的磨耗量也越大， $3.4 \text{ N/mm}^2\text{°C}$  熱容量的磨耗量比  $3.2 \text{ N/mm}^2\text{°C}$  小  $6.54\%$ ，而  $3.6 \text{ N/mm}^2\text{°C}$  熱容量的磨耗量比  $3.2 \text{ N/mm}^2\text{°C}$  小  $12.94\%$ 。在導熱性相同的材料，如果熱容量愈小，其熱擴散也就愈大，亦即其對周圍環境變化的反應也愈快，因此使擠伸胚料降溫較快，促使模具磨耗的增加。

如圖 10 所示為熱輻射係數對熱間擠伸模具磨耗量的影響，由圖可知，在胚料初始溫度為  $800\text{°C}$ 、熱容量為  $3.2 \text{ N/mm}^2\text{°C}$  時，雖然熱輻射係數愈高的胚料，其熱間擠伸模具的磨耗量稍高，但並無顯著的差異， $0.6 \text{ N/sec}\cdot\text{mm}\cdot\text{°C}$  熱輻射係數的磨耗量僅比  $0.5 \text{ N/sec}\cdot\text{mm}\cdot\text{°C}$  熱輻射係數高  $0.99\%$ ，而  $0.7 \text{ N/sec}\cdot\text{mm}\cdot\text{°C}$  熱輻射係數的磨耗量僅比  $0.5 \text{ N/sec}\cdot\text{mm}\cdot\text{°C}$  熱輻射係數高  $1.42\%$ 。

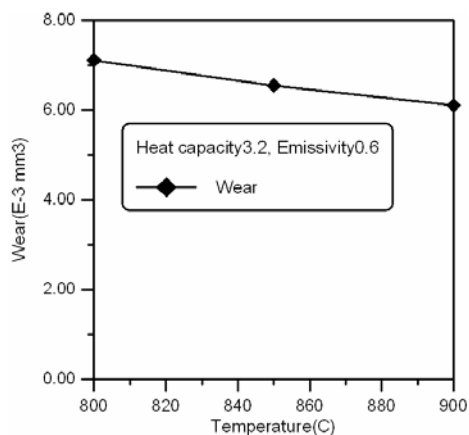


圖 8 溫度對熱間擠伸模具磨耗量的影響比較

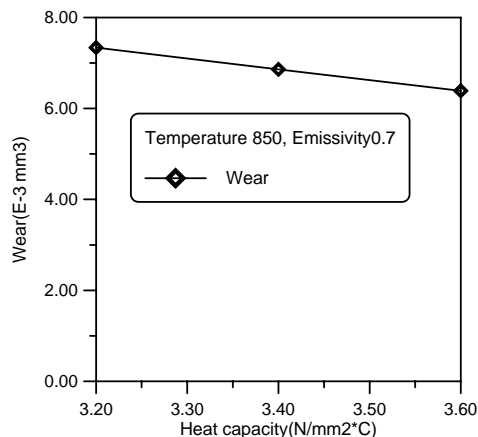


圖 9 胚料熱容量對熱間擠伸模具磨耗量的影響

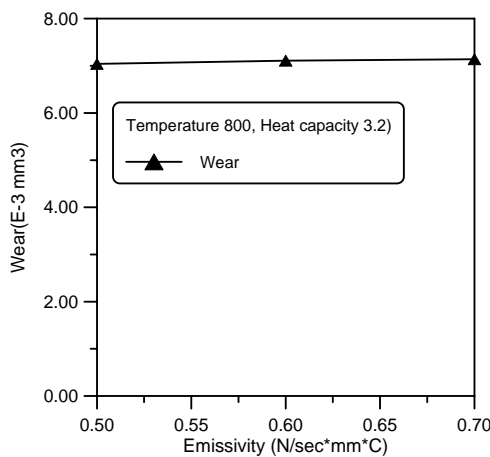


圖 10 胚料熱輻射係數對熱間擠伸模具磨耗量的影響

## 三、熱間擠伸模具磨耗之預測

熱間擠伸有限元素模擬分析所得磨耗結果透過類神經網路的處理，即可獲得如圖 16 所示之類網路架構，而此自動產生最佳網路結構的平均平方誤差 FSE 等於  $0.0000230609$ ，而預測平方誤差 PSE 為  $0.000157155$ ，在此網路各架構節點各有其互相對應的方程式，在圖中 T、HC、E 分別代表胚料的溫度、熱容量、熱輻射係數三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，即由胚料熱傳特性之三項原始輸入值預測擠伸後模具的磨耗量。

表 4 為以任意三組不同熱傳特性胚料進行擠

伸變形後模具之磨耗量的網路預測值與有限元素模擬值比較，由表 4 可知，平均磨耗量預測誤差為 9.91%，因此，以此種預測模式進行擠伸模具磨耗量的預測，應有其方便性與參考性。

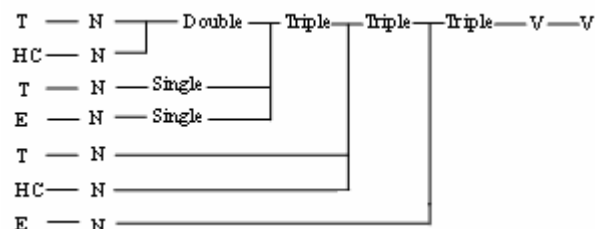


圖 16 擠伸模具磨耗量的預測模型

表 4 熱間擠伸模具磨耗量之預測值與模擬值比較

	溫度 (°C)	熱容量 (N/mm <sup>2</sup> * °C)	熱輻射 係數 (N/sec*mm *°C <sup>4</sup> )	模擬值	預測值	誤差 (%)
1	852	3.35	0.59	0.0082	0.0072	12.2
2	868	3.48	0.62	0.0062	0.0072	16.1
3	860	3.45	0.61	0.007	0.0071	1.43
平均誤差				9.91 %		

## 伍、結論

本研究乃利用有限元素模擬來分析熱間擠伸胚料熱傳特性對模具磨耗的影響，並建構胚料熱傳特性與模具磨耗間的預測模式。研究發現，胚料的初始溫度及熱容量越低其擠伸模具的磨耗量越大，但胚料的熱輻射係數對擠伸模具的磨耗量影響並不顯著。此外，利用類神經網路建構胚料熱傳特性與模具磨耗間的預測模式有相當的方便性與參考性。

## 參考文獻

- 趙雲路，影響擠壓模具壽命的因素，輕合金加工技術，24 卷，12 期，1996 年。
- 謝建新、劉靜安，金屬擠壓理論與技術，冶金工業出版社。
- 倪正順、帥詞俊、鐘掘，熱擠壓模具的有限元素分析與優化設計，機械科學與技術，23

- 卷，1 期，2004 年。
- G. A. Lee, Y. T. Im, Finite-element investigation of the wear and elastic deformation of dies in metal forming, Journal of Materials Processing Technology, 89-90, 1999.
- S. K. Lee, D. C. Ko and B. M. Kim, Optimal die profile design for uniform microstructure in hot extruded product, Internal Journal of Machine Tools & Manufacture, 40, 2000.
- C. Y. Wu, Y. C. Hsu, Optimal shape design of an extrusion die using polynomial networks and genetic algorithms, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 19, 2002.
- Z. Lin, X. Juchen, W. Xinyun and H. Guoan, Optimization of die profile for improving die life in the hot extrusion process, Journal of Materials Processing Technology, 142, pp.659-664, 2003.
- A. F. M. Arif, A. k. Sheikh and S. Z. Qamar, A study of die failure mechanisms in aluminum extrusion, Journal of Materials Processing Technology, 134, 2003.
- M. Noorani-Azad, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseinipour, A. Gorji, Experimental and numerical study of optimal die profile in cold forward rod extrusion of aluminum, Journal of Materials Processing Technology, 164-165, 2005.
- 段新峰，高強度鋁合金熱擠壓件表面質量的預測，安徽工程科技學院學報，19 卷 2 期，2004 年。
- S. Kobayashi, S. Oh, and T. Altan, Metal forming and the finite-element method, Oxford University Press, 1989.
- 陳怡安，數值模擬於溫鍛模具模耗分析之應用，國立成功大學機械工程系碩士論文，2001。
- 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.

14. T. Kondo, GMDH neural network algorithm using the heuristic self-organization method and its application to the pattern identification problem, SICE, 1998.
15. T. Kondo, The learning algorithms of the GMDH neural network and their application to the medical image recognition, SICE, 1998.
16. 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.
17. A. Patrikar, J. Provence, Nonlinear system identification and adaptive control using polynomial networks, Mathematics Computer. Modeling, vol.23, No.1/2, 1996.
18. 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.