

傘形齒輪閉式冷鍛成形之模具設計及製程模擬分析

許源泉^{1*} 林萬益² 彭御芳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 學生

摘 要

齒輪係機械傳動與變速的重要零件，在各類機械中的運用相當廣泛。以鍛造技術生產傘形齒輪具有節省材料、成本低、效率高、機械性質佳等優點，故傘齒輪鍛壓方法與技術的發展已越來越受重視。本研究採用三維剛塑性有限元素數值模擬技術進行傘形齒輪鍛造塑性成形分析，設計出兩種模具進行傘形齒輪冷鍛成形，以瞭解不同冷鍛模式與模具類型，及胚料特性對傘齒輪冷鍛製程、模具及製品的影響。

關鍵詞: 傘形齒輪、冷鍛、有限元素分析。

*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

閉式冷鍛因具有精密、加工時間短、低成本、大量生產、使用壽命長等優勢，故成為現今複雜零件加工技術發展的重要方向。[1, 2]齒輪閉式冷鍛與一般傳統切削加工比較，齒形無須進一步切削加工即可直接使用，又具有材料利用率高、節省能源、生產效率高、成本低等顯著優勢，此外，產品尺寸精度高、抗蝕能力與耐磨性強、彎曲強度及疲勞壽命高等更是其優點。[3]

傘齒輪廣泛用於汽車、牽引機、農用機械等運輸工具，應用廣泛且需求量大。但傘形齒輪形狀複雜，在模具的設計和加工上有相當的困難度，產品品質難以控制。因此，應用各種方法來研究傘齒輪的塑性成形問題也就持續不斷。Fu & Shang[4]曾利用界限單元法來進行傘齒輪之精密鍛造模具應力分析與最佳化設計。Mamalis等人[5]分別應用DYNA-3D有限元素及上界限單元技術來模擬傘齒輪預成形之高溫精密鍛造，以預測工件與模具之材料流動、預成形件外形、鍛造負荷及應力與應變分佈。Mamalis等人[6]另亦使用MARC有限元素商用軟體來模擬傘齒輪的精密鍛造製程。Lee等人[7]應用剛塑性有限元素模擬來進行傘齒輪的分析與模具設計，以期獲得有效材料流動及較佳品質產品，並分析比較兩種傘齒輪鍛造製程，以求得無缺陷的鍛造製程。Cho等人[8]經由有限元素法及實驗來分析鍛造及切削傘齒輪之熱處理變形狀況，也發現有限元素法與實驗的變形量測結果頗為一致。Bachniak等人[9]利用沖床旋轉模具以單一操作之複雜鍛造來製作結構鋼之傘齒輪，並分析比較此種新製程與傳統鍛造在各種溫度下之鍛造負荷、顯微結構及機械性質。

有限元素法是一種廣被應用的數值解析方法，在金屬成形領域的研究亦是如此。利用有限元素法來模擬金屬流動變形的情形可說是目前應用最多的解析工具。又由於傘齒輪齒型充填困難，需要較大的成形力量，容易造成模具的應力過大。[10-11]所以經由瞭解及設計合宜的胚料特性與模具設計，以獲知傘齒輪冷鍛規律或模具改良及胚料

設計方向，是值得探討的課題。

因此，本研究乃採用三維剛塑性有限元素數值模擬技術進行傘形齒輪鍛造塑性成形分析，設計出兩種模具對進行傘形齒輪冷鍛成形，並對其胚料內外徑、摩擦係數進行研究分析，以瞭解不同冷鍛模式與模具類型，及胚料特性對傘齒輪冷鍛製程、模具及製品的影響。

貳、冷鍛模具設計

本研究乃以冷間閉式模鍛來製作 MM2-20 等比傘形齒輪，如圖 1 所示為 MM2-20 直齒等比傘形齒輪外觀與其各部尺寸示意圖，此齒輪的主要規格如表 1 所示，模數為 2、齒數 20、壓力角 20。

為應用鍛造塑性成形法獲得所預期的傘齒輪，本研究使用 Solid works 設計建構出兩種類型的鍛模：端鍛式閉式鍛模、擠壓式閉式鍛模，如圖 2 所示，前者輪齒模穴在沖頭端部，利用沖頭直接將傘齒輪輪齒塑性成形，後者的下模塊由下模及下合模構成，輪齒模穴設在下模，下合模則是一可動的模壁，沖頭施加壓力將胚料往下鍛壓成形。

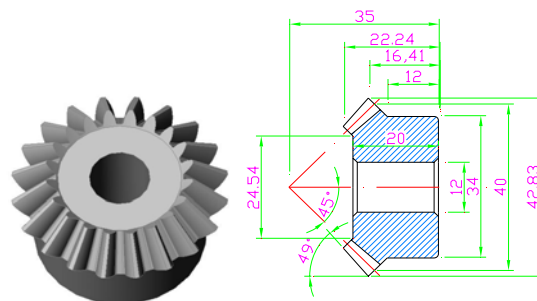
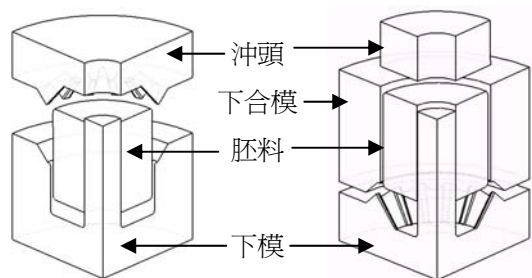


圖 1 直齒傘形齒輪外觀與其各部尺寸示意圖

表 1 MM2-20 直齒等比傘形齒輪的規格

模數(mm)	2	齒頂到底距(mm)	16.41
齒數	20	凸轂長(mm)	12
軸孔(mm)	12	內孔長(mm)	20
凸轂徑(mm)	34	齒寬(mm)	9
節徑(mm)	40	齒面角	49.48°
外徑(mm)	42.83	全長(mm)	22.24



(a) 端鍛式模鍛模具 (b) 擠壓式模鍛模具

圖 2 端鍛式與擠壓式鍛模示意圖(四分之一視圖)

參、有限元素模擬分析

在金屬塑性成形的製程中，利用有限元素法進行解析是相當常見的一種模式，也是目前金屬成形發展的潮流，有限元素法是一種高效能的金屬成形解析法，在推演的過程當中，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]

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

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

$$\delta\pi = \int_v \sigma \delta\varepsilon dv + k \int_v \varepsilon_i \delta\varepsilon_i dv - \int_s F_i \delta u_i ds = 0 \quad (2)$$

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

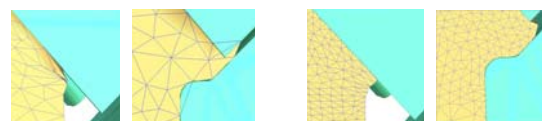
DEFORM 可說是目前事業上最廣為使用的鍛造製程模擬分析專用軟體，尤其在歐美及日本，已有相當多廠家導入此模擬解析技術。因此，本研究乃應用 DEFORM-3D 進行傘齒輪閉式模鍛的塑性成形模擬分析。

在進行有限元素模擬乃設定上模速度為 20 mm/s，工件與模具介面間的定剪摩擦係數分別為 0.1、0.3、0.5、0.7、0.9，胚料為 AISI-1045 的空心圓柱，內徑分別為 12、13、14、15、16 mm，外徑為 31、31.5、32、32.5、33mm，且將其設為塑性體。由於鍛件的對稱性，為清楚、精細並節省模擬計算時間，本模擬只取 1/20(一齒)進行模擬。表 2 為胚料與模具的特性。

表 2 胚料與模具的特性

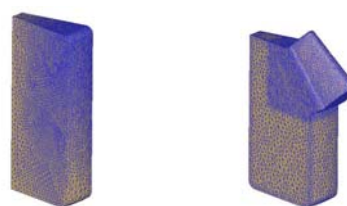
胚料	材料	AISI-1045
	形狀	空心圓柱
	外徑(mm)	31, 31.5, 32, 32.5, 33
	內徑(mm)	12, 13, 14, 15, 16
	網格建立	60000
模具	上模速度	20 mm/s
胚料模具介面	定剪摩擦係數	0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9

網格的建立的數量影響著模擬結果的準確性與計算數值的容量、時間，通常網格數量越多，模擬分析的模型形狀越精確、模擬結果的數據精度也越高，但相對的模擬容量和時間也會大大增加，因此網格數量的建立應有適度的考量。圖 3 為網格劃分數量的比較，經評估，本模擬利用 60000 個元素劃分胚料網格，並集中建立於齒型成形處，減少其誤差量，如圖 4 為胚料與成形網格分割為 60000 個元素並集中建立於齒型處之示意圖。



(a) 7000 個元素 (b) 60000 個元素

圖 3 網格劃分數量的比較



(a) 鍛壓前胚料 (b) 鍛壓後鍛件

圖 4 網格分割 60000 個元素之胚料與鍛件示意圖

肆、結果與討論

一、傘齒輪鍛壓材料流動變形分析

如圖 5 所示為應用端鍛式閉式鍛模進行傘形齒輪鍛造的塑性成形演變，初始時，空心圓柱胚料受到端壓作用，胚料上端逐漸成形輪齒齒型，到最後即可獲得預期的等比傘形齒輪鍛件。

又圖 6 為傘形齒輪的沖程負荷曲線及胚料變形演變對應圖，由圖可知，在鍛壓的初始階段，鍛件以小量變形模式成形，故可用最小的鍛壓負荷來達到初階變形，隨著變形量的增加，當輪齒逐漸成形(如圖之 b 及 f 點處)，負荷也就快速增加，其後輪齒齒頂持續充填(如圖之 c 及 g 點處)，變形阻力快速變大，成形負荷更急遽竄升，直到模穴填充完成。

又由圖 6 亦可瞭解負荷曲線對應的胚料變形演變，圖 6 之 a~d 曲線為外徑 33mm、內徑 12mm、高度 23.92mm 之胚料各階段變形演變，因胚料內徑與軸孔徑相近，故在凸載處有較小的變形量。e~h 曲線為外徑 33mm、內徑 16mm、高 27.14mm 之胚料各階段變形演變，其內徑與軸孔徑有較大的空隙量，高度也較高，因此在成形過程中，胚料稍有挫曲現象發生，但最終皆能成功完成鍛壓成形。因此，避免鍛件產生挫曲或摺料等缺陷發生的胚料尺寸合宜設計是有其需要性。

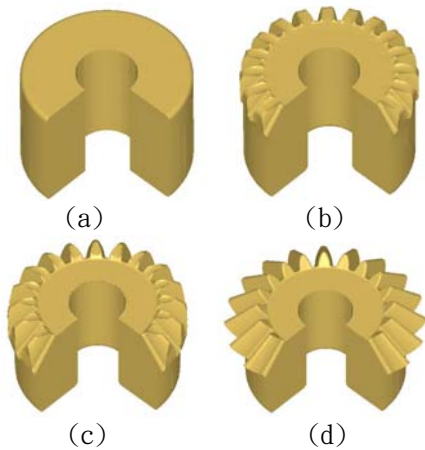


圖 5 等比傘形齒輪鍛造成形變形發展

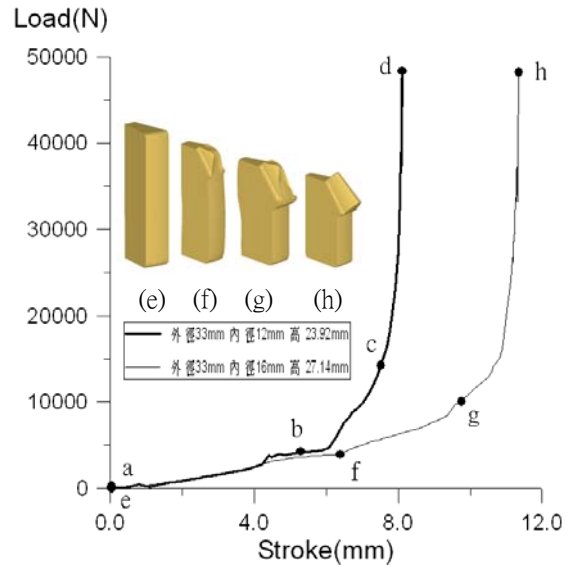
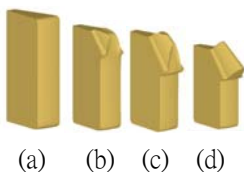
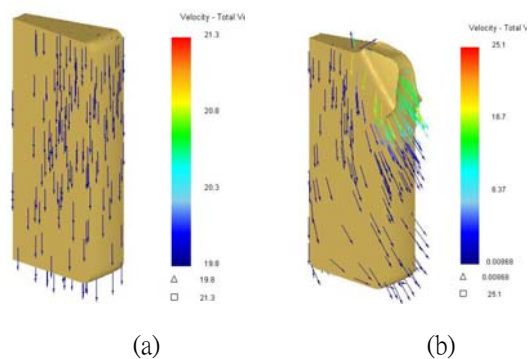


圖 6 應用不同胚料之傘齒輪冷鍛負荷及塑性成形演變對照圖

圖 7 為端鍛式模鍛傘形齒輪各成形階段之胚料速度場，圖 8 為輪齒處各階段充填成形示意圖。在端鍛初始，胚料係隨著沖頭下壓作用而往下流動，沖程達 55%時，胚料頂端往輪齒模穴中端處開始填充，材料大量往下端及外徑區流動變形，在 91%時，材料往齒頂模穴小端處流動成形，接近行程終了時，在輪齒內徑小端處先行完成填充，直到最後外徑大端處填充完畢。

圖 9 為擠壓式模鍛各階段的速度場示圖，在擠壓初始，胚料係隨著沖頭下壓作用而往下流動，沖程達 55%時，材料流動聚集在胚料下端，並往輪齒模穴中端處開始填充，材料大量往下端及外徑區流動變形，最後接近行程終了時，在輪齒內徑小端處先行完成填充，直到最後外徑大端處填充完畢。



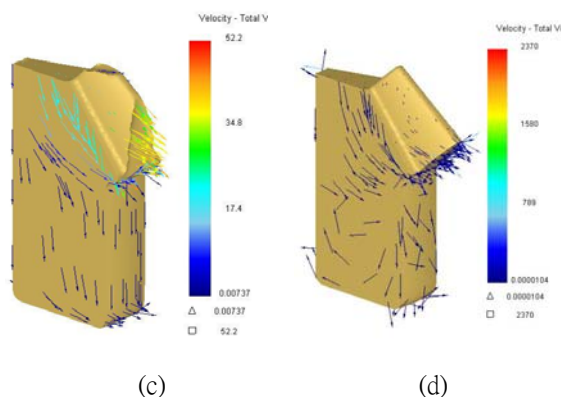


圖 7 端鍛式模鍛傘形齒輪各成形階段之速度場

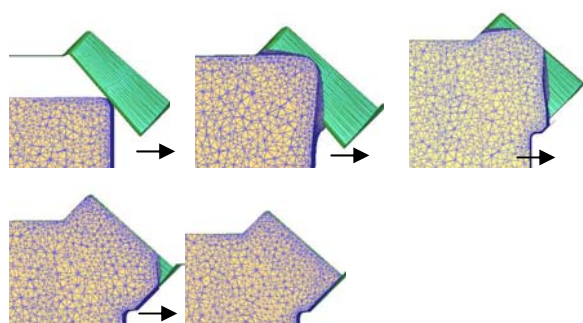


圖 8 端鍛式模鍛之輪齒成形演變

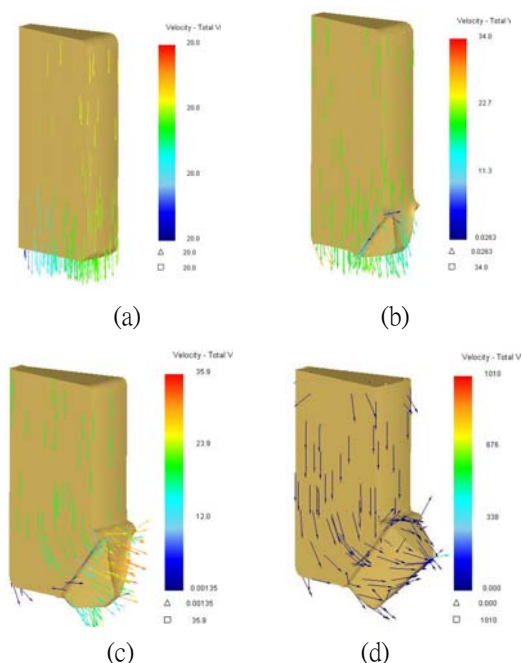


圖 9 擠壓式模鍛傘形齒輪各成形階段之速度場

及等效應變分佈圖，由圖(a)可知，端鍛式模鍛鍛件等效應力分佈在鍛件輪齒鍛壓成形處，尤其在輪齒內徑小端處附近應力最大，最大值達 134Mpa，此使得齒形處有良好的成形狀態。圖(b)為其等效應變圖，應變集中在輪齒處，尤其在輪齒外徑大端處的等效應變達 2.83，因此以冷鍛製造傘齒輪可使輪齒產生強化作用，有益於傘齒輪的強度提昇。

圖 11 為擠壓式模鍛傘形齒輪鍛件之等效應力及等效應變分佈圖，由圖(a)可知，端鍛式模鍛鍛件等效應力分佈在鍛件上端沖頭接觸區及輪齒鍛壓成形附近，最大值也高達 135Mpa，此亦使得傘齒輪有良好的成形效果。圖(b)為其等效應變圖，與端鍛式相同，應變集中在輪齒處，尤其在輪齒外徑大端處的等效應變達 3.36，比端鍛式模鍛的強化效應高 18.7%，因此以擠壓式模鍛製造傘齒輪可使輪齒產生更高的強化作用。

圖 12 為端鍛式模鍛傘形齒輪之鍛件毛邊的形成，由於端鍛式模鍛沖頭與下模為開放式，分模面位於齒型模穴大端處，胚料太大或設計不良，在成形末段，容易可能產生不易修整的毛邊，如圖(a)所示，甚至在還未完全填充完成前，產生的在分模處的毛邊，影響沖頭與下模的完整閉合，而可能造成填充不完全的情形發生，如圖(b)所示。擠壓式模鍛壓前，中模與下模為合併狀態，再由沖頭壓鍛後，移除下模卸料，因此，擠壓式模鍛鍛件在分模處較不易產生毛邊。

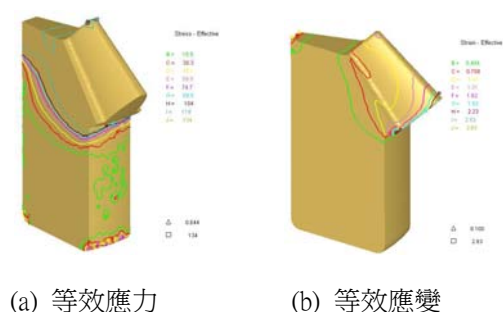
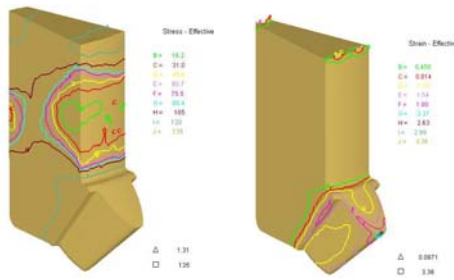


圖 10 端鍛式模鍛傘形齒輪鍛件之等效應力及等效應變分佈圖

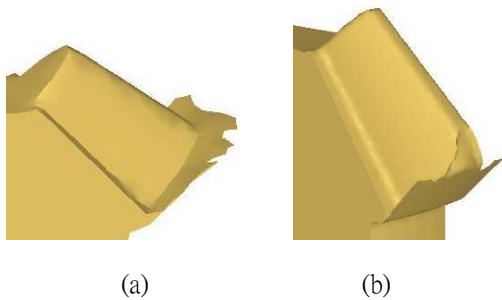
二、傘齒輪鍛件塑性變形效應分析

圖 10 為端鍛式模鍛傘形齒輪鍛件之等效應力



(a)等效應力 (b)等效應變

圖 11 擠壓式模鍛傘形齒輪鍛件之等效應力及等效應變分佈圖



(a) (b)

圖 12 端鍛式模鍛傘形齒輪之鍛件毛邊的形成

三、傘齒輪鍛壓成形負荷分析

圖 13 所示為端鍛式模鍛與擠壓式模鍛上模負荷曲線圖，兩者在充程 55% 之前的負荷差異不大，其後則擠壓式比端鍛式稍高，但在輪齒完全充滿時的最高負荷則是端鍛式模鍛比擠壓式模鍛高。此種現象可能是擠壓式模段的整個沖程負荷呈現較為均勻增加，而端鍛式雖中鍛負荷較低，但在輪齒是聚集在沖程末段來成形，故所需負荷反而比擠壓式模鍛高。

圖 14 所示為不同胚料外徑對兩種模鍛成形負荷比較圖，由圖可知，不論何種模鍛方式，隨著胚料外徑的增大，所需的冷鍛成形負荷也隨之增高。而且不論何種胚料外徑，端鍛式模鍛所需負荷皆比擠壓式模鍛為高。

圖 15 所示為不同胚料內徑對兩種模鍛成形負荷比較圖，由圖可知，在端鍛式模鍛中，胚料內徑大小對成形負荷的影響並不顯著，而在擠壓式模鍛中，則發現胚料內徑越小所需負荷越高。不論何種胚料內徑，端鍛式模鍛所需負荷皆比擠壓式模鍛為高。

圖 16 所示為不同胚料/模具介面之摩擦係數對

兩種模鍛成形負荷比較圖，由圖可知，隨著胚料/模具介面摩擦係數的增加，所需的冷鍛成形負荷也隨之增高，而且端鍛式模鍛皆比擠壓式模鍛所需負荷為高。

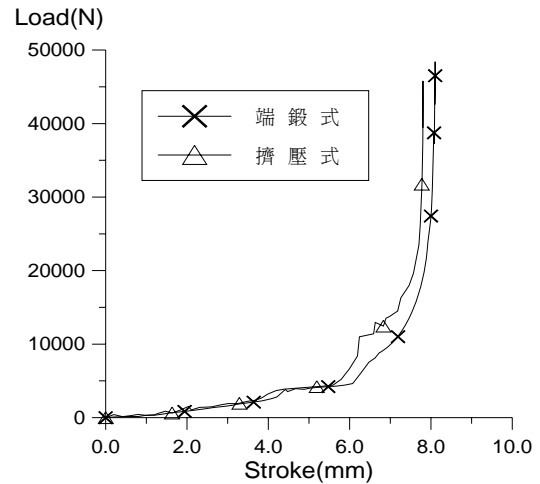


圖 13 端鍛式模鍛與擠壓式模鍛上模負荷比較

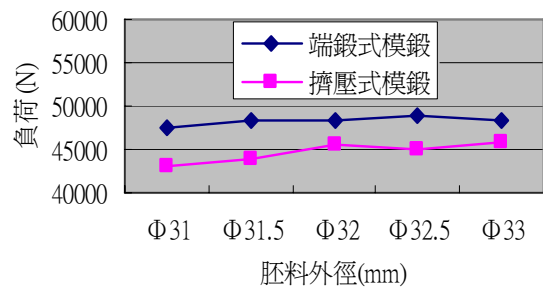


圖 14 不同胚料外徑對兩種模鍛成形負荷比較圖

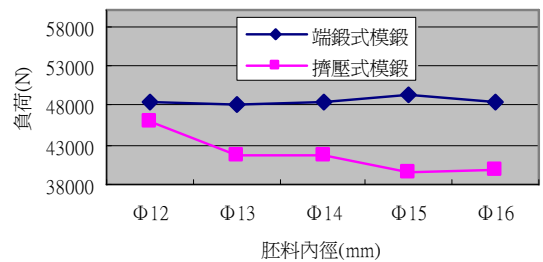


圖 15 不同胚料內徑對兩種模鍛成形負荷比較圖

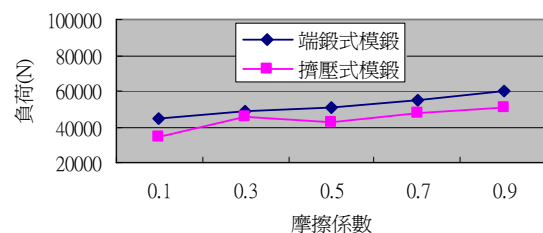


圖 16 不同胚料/模具介面之摩擦係數對兩種模鍛成形負荷比較圖

四、傘齒輪鍛壓模具應力分析

圖 17 為端鍛式模鍛之沖頭與下模的等效應力分佈圖，由圖可知，因沖頭齒型尖端處有較小的斷面，因此沖頭之齒型尖端處承受較大的應力，其值高達 1270 Mpa，而下模則分佈於齒型最終成形處，最大應力為 1050 Mpa。由此可知，端壓式模鍛之沖頭大端齒型模穴承受較大的應力。

圖 18 為擠壓式模鍛之模具應力分佈圖，u.61 圖可知，因沖頭(a)與胚料之接觸面為平面，故除內軸處有較大應力(101 Mpa)外，其餘皆為均勻分佈於沖頭底端面處。下合模(b)應力則分佈於齒型成形與沖頭接觸的部位，處的等效應力最大值為 982Mpa，下模(c)則集中分佈於齒型尖端處，最大等效應力為 1000 Mpa。由此可知，擠壓式模鍛之下模大端齒型模穴承受較大的應力。

總之，不論何種模鍛方式，模具設計時應避免有較尖銳的邊緣，以免形成應力集中，尤其在齒輪鍛模之齒型模穴處更容易因應力過大，致有磨耗、崩塌、斷裂之虞，進而影響模具壽命及鍛件品質。

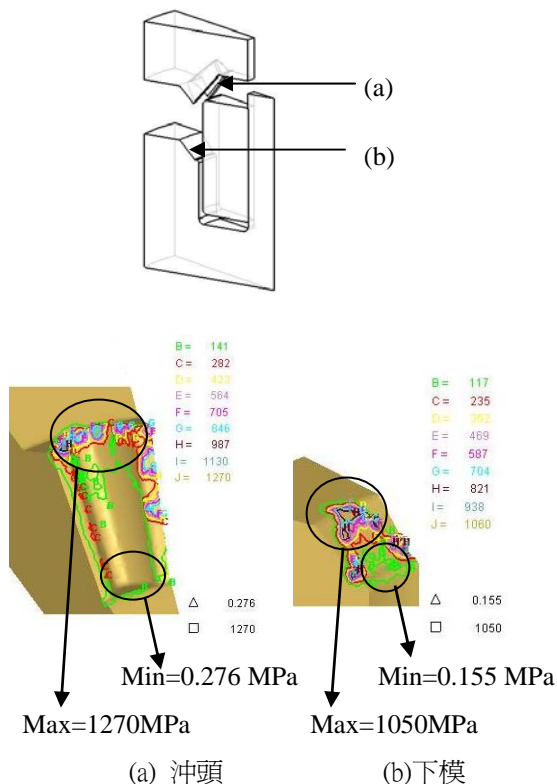


圖 17 端鍛式模鍛之模具應力分佈

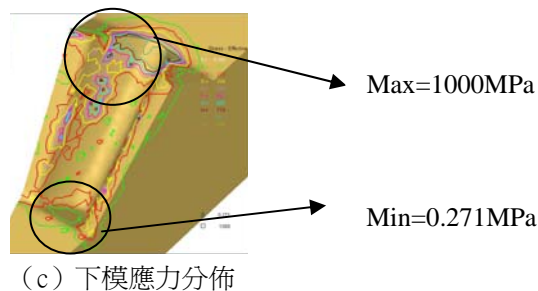
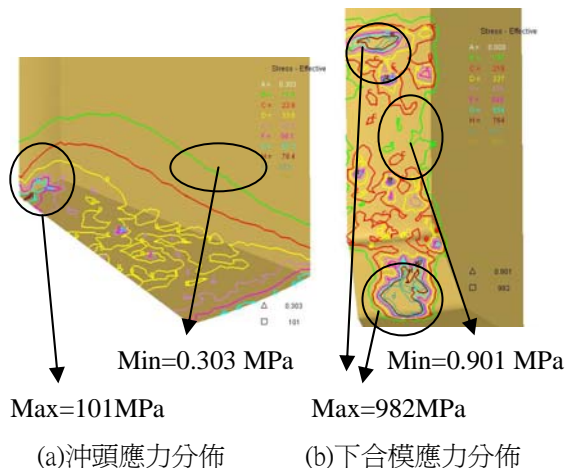
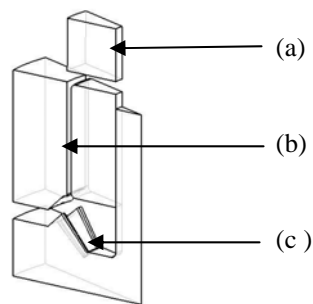


圖 18 擠壓式模鍛之模具應力分佈

伍、結論

本研究乃採用三維剛塑性有限元素數值模擬技術進行擠壓式與端鍛式兩種模具之傘形齒輪鍛造塑性成形分析，研究結論如後：

- 一、應用有限元素模擬可方便分析傘形齒輪冷鍛的塑性流動與輪齒充填成形演變，端鍛式模鍛較易產生毛邊。
- 二、以擠壓式或端鍛式模鍛鍛製傘齒輪時，其胚料變形效能並無太大差異，但擠壓式模鍛比端鍛式模鍛可使輪齒產生更高的強化作用。
- 三、端鍛式模鍛所需冷鍛負荷比擠壓式模鍛為

高，胚料內徑與外徑大小對冷鍛負荷有不同的影響，而且胚料/模具介面摩擦係數越大，所需的冷鍛成形負荷也就越高。

四、端壓式模鍛之沖頭大端齒型模穴承受較大的應力，而擠壓式模鍛則在下模大端齒型模穴處承受較大的應力。

參考文獻

1. TaKshi Nakano. Modern application of complex forging and multi - action forming in cold forgig J. Mater. Proc. Tect. 1994,46:201~226
2. 山本明、楊國彬，日本閉式模鍛技術的發展.汽車工藝與材料，11期，1995
3. 楊慎華、寇淑清、徐成林，轎車差速行星與半軸齒輪冷閉塞鍛造成形研究，鍛壓技術，1期，2004年
4. M. Fu, B. Shang, Stress analysis of the precision forging die for a bevel gear and its optimal design using the boundary-element method, Journal of Materials Processing Technology, 53, 1995
5. A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, A. K. Baldouks, Finite- element simulation of axisymmetric perform in precision forging at elevated ttemperatures, Journal of Materials Processing Technology, 57, 1996.
6. A. G. Mamalis, D. E. Manolakos, A. K. Baldouks, Simulation of the precision forging of bevel gear using implicit and explicit FE techniques, Journal of Materials Processing Technology, 57, 1996.
7. Y. K. Lee, S. R. Lee, C. H. Lee, D. Y. Yang, Process modification of bevel gear forging using three dimensional finite element analysis, Journal of Materials Processing Technology, 113, 2001
8. J. R. Cho, W. J. Kang, M. G. Kim, J. H. Lee, Y. S. Lee, W. B. Bae, Distortions induced by heat treatment of automotive bevel gears, Journal of Materials Processing Technology, 153-154, 2004
9. W. Bochniak, A. Korbel, R. Szyndler, R. Hanarz, F. Stalory-Dobrzanski, L. Blaz, P. Snarski, New forging method of bevel gears from structural steel, Journal of Materials Processing Technology, 173, 2006
10. 楊慎華、寇淑清、趙勇、董蕾，傘齒輪冷閉塞鍛造成形過程數值仿真，農業機械學報，2003
11. 周琨、陳國學，傘齒輪精密模具變形的數值模擬分析，塑性工學報，2002
12. S. kobayashi, S. Oh, and T. Altan, Metal forming and the finite-element method, Oxford University Press, 1989

Die design and Process Simulation Analysis of Closed Cold Forging for Bevel Gear

Yuan-Chuan Hsu^{1*} Wann-Yih Lin² Yu-Fang Peng³

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

²Instructor, Department of Mechanical and Computer, National Formosa University

³College student, Department of Mechanical and Computer, National Formosa University

Abstract

Being an important part of mechanical transmission, gear has been extensively applied in various machines. Bevel gear produced by forging possesses the advantages of material reduction, lower cost, higher efficiency, and better mechanical properties. Therefore, the technique development of forging for bevel gear has been increasingly emphasized. In the current study, 3D rigid-plastic finite element simulation technique was employed to analyze the plastic forming of bevel gear. Two specifically designed dies were used to form the gears, aiming to explore the effects of various cold forging models, die types, and billet characteristics on the processed, dies, and products of bevel gear cold forging.

Key Words: bevel gear, cold forging, finite element analysis

*Corresponding Author: Department of Mechanical and Computer, 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

