

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

應用有限元素法於傘齒輪精密鍛造之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC91-2212-E-041-001-

執行期間：91年08月01日至92年07月31日

執行單位：嘉南藥理科技大學資訊管理系

計畫主持人：徐宏修

計畫參與人員：曹怡婷, 陳嘉偉

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 92 年 10 月 20 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫 成果報告 報期

中進度
報告

應用有限元素法於傘齒輪精密鍛造之研究

計畫類別： 個別型計畫 整合型計畫
計畫編號：NSC 91 - 2212 - E - 041 - 001
執行期間：91年 8月 1日至 91年 7月 31日

計畫主持人：徐宏修
共同主持人：
計畫參與人員：曹怡婷 陳嘉偉

成果報告類型(依經費核定清單規定繳交)： 精簡報告 完整報告

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

處理方式：除產學合作研究計畫、提升產業技術及人才培育研究計畫、列管計畫及下列情形者外，得立即公開查詢

涉及專利或其他智慧財產權， 一年 二年後可公
開查詢

執行單位：嘉南藥理科技大學資訊管理系

中 華 民 國 92 年 10 月 20 日



行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

應用有限元素法於傘齒輪精密鍛造之研究

A Study on Precision Forging of Bevel Gear by Using Finite Element Method

計畫編號：NSC 91-2212-E-041-001

執行期限：91 年 8 月 1 日至 92 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：曹怡婷 陳嘉偉 嘉南藥理科技大學資訊管理系

一、中文摘要

傘齒輪精密鍛造所包括的程序有預形成，以及材料在幾何形狀複雜的齒型模具內的成形。和傳統的切削加工製成傘齒輪比較，以鍛造加工的傘齒輪有一些優點。如減少材料的耗損，和縮短前置作業時間，材料在齒形模具內的塑性流動利於齒輪品質的改善等。過去，模具設計師常依的設計經驗以試誤法來設計此類產品的模具。最近，已經發展出利用 FEM 方法來模擬傘齒輪精密，找出最佳具設計，以及產品品質等相關資料。本文中以三維 FEM 剛塑性模型模擬傘齒輪鍛造，適用於模具設計，確保有效的材料流動以改良品質。

關鍵詞：傘齒輪、精密鍛造、FEM

Abstract

Precision forging of bevel gear includes preformed and the plastic deformation of material in the of die cavity. The precision forging of bevel gear has the advantages including reduction of material cost, lead-time and improved mechanic strength due to the plastic flow. In the past, the die designer used to design such die by experience and try-and error. Recently, FEM is used to investigate in this forge of bevel gear and find the optimal process, die design and related data of product quality of the precision forging of bevel gear. In this study, a three dimensional rigid-plastic FEM analysis is used to explore the precision forging of bevel gear. It is valid for die design, the material flow and quality improvement.

Keywords: Bevel Gear, Precision forging, FEM (Finite Element Method)

二、前言

最近製造業的趨勢，以低成本來生產高精度、高強度和機械元件。尤其是汽車工業中，愈來愈多製造廠利用精密鍛造來生產較幾何形狀複雜元件。精密鍛造的齒輪。由於改良的機械性質，可代替以機器切削的齒輪，藉由冷鍛也可提高齒輪的精密度。

Douglas[1]指出藉著精密鍛造，大約能節省 15% 的材料，即鍛造成本能減少 7.5%。精密鍛造程序的變數，大致分為工件相關、模具相關以及生產機器相關的變數等，各變數的控制將影響鍛造成品精確度。

Meidert[2]曾採用業界提供之模具設計尺寸，使用 DEFORM 材模擬傘齒輪熱間鍛造製程。其傘齒輪的三維變形模式簡化為二維剛塑性 FEM 來分析。此外，也用塑性黏土為試材，疊成層狀的圓柱形試材，施以鍛壓來觀察其鍛流線分布並和 DEFORM 預測值做比較。

Fu[3]使用邊界元素法 (Boundary Element Method) 探討傘齒輪精密鍛造中，鍛件所受的三維應力分析。解得徑向應力 σ_r ，圓周向應力 σ_θ ，等效應力 $\bar{\sigma}$ 之分布。

Mamalis[4]使用套裝軟體 MARC 分析傘齒輪熱間精密鍛造。Mamalis 採三維的剛塑性 FEM 模式模擬，將鍛件分割為六面體單元，MARC 在三維分析時並無 auto remeshing 之功能，需將前次未達收斂條件之應力及應變態，以前後處理器 (pre-processors post-processors) 重新載入、分割網目、重新計算，此過程將造成時間及資源的浪費。

Lee[5]使用剛塑性 FEM 模式，分析直

齒傘齒輪之冷間鍛造製程，材料為SCM420H，摩擦因子為0.15，鍛件以六面體單元分割，應用自行開發的FEM程式模擬，在每次疊代中，代入瞬時邊界條件，並應用自行提案的網目重分割方式(SEL)，重建網目。Lee提出了兩種模具設計方式，以改善鍛件在模穴中，導角處無法填滿的缺陷。此研究並未計算出模具的應力分布。

四、FEM分析

直傘齒輪的鍛造為大形交通齒輪的傳動元件為考量。因為齒輪公差限制，齒輪的成形較為複雜。傘齒輪常用切齒加工製造方式。以鍛造加工方式生產之齒輪需要二次以上之加工程序。往往是依靠試誤法來修改模具設計尺寸。

有限元素法分析軟體DEFORM-3D，有網目自動重分割功能(Auto remesh)，比MARC縮短模擬時間。可作成型負荷預估、模具應力解析、缺陷模擬與預測、製程參數最佳化、鍛流線分析等。本研究擬應用套裝軟體DEFORM-3D，探討冷間傘齒輪精密鍛造時，材料於模穴內之變形行為。在進行鍛造實驗前，首先執行材料試驗，本研究之實驗以鉛為齒胚材料，採用鍛壓試驗，獲得材料之應力-應變關係式。

本計畫使用Solidworks的結構立體模型。圖1所示為傘齒輪立體圖，齒數為33，模數為2。圖2所示為傘齒輪精密鍛造之模具示意圖。分為上模(upper die)及下模(lower die)，設計以齒輪本體底面為分界，以方便排除潤滑劑；又考慮胚料(billet)之流動特性，將齒輪錐面朝下，並在下模之模穴內成形，以減低沖頭(punch)負荷。

本文使用Pentium 4, 2.4 G CPU, 768 M RAM之桌上型電腦作為計算工具，為節省計算時間並有效地分析它，考慮了齒輪對稱之特性，在剛塑性FEM模擬中僅分析33個齒形區域中之一部份。

圖3所示為傘齒輪鍛造過程中之速度場分佈，其加工條件如表1所示。本文模擬，以鉛為試材，FEM分析時採用四面體元素及定剪磨擦模式($m=0.2$)，其中材料之應力應變關係式自定，由實驗所得 $\sigma = 37.2\bar{\epsilon}^{0.167}$ (MPa)。圖3所示為全部150個

step中之第75個step，如圖所示，在齒輪柄和本體底面交界處之速度變化最大，設計上應有導角，適當導引材料進入模穴內錐體之區域。

圖4為傘齒輪鍛造之等效應變分佈圖，在錐體區域內之變形量大致均勻，而最大應變發生在模穴中央底面。以傘齒輪齒形區域而言，在此step時，齒輪錐頂面之變形量大於齒輪錐底面，表示錐頂比錐底先完成變形，往後之step中，錐頂之壓力將比錐底處越愈來愈高。

鍛造時，因為大部份胚料在閉模內成形，使齒形部份的壓力增加。如圖5所示為等效應力分佈，最大應力發生有兩處，一為在齒輪底面和齒輪柄交界處，一為下模中央底面處，設計模具實應特別考慮兩處之油溝，否則潤滑油無法排出將造成該處缺陷情形。

本研究規劃之實驗為利用鉛為試材，其材料試驗為利用圖6之萬能試驗機以進行壓縮試驗，得到如圖7之應力應變曲線圖。假設應力應變為指數律關係，經過曲線湊合，獲得材料如表2所示， $\sigma = 37.2\bar{\epsilon}^{0.167}$ (MPa)。

實驗進行時，需注意沖頭需在與機器軸向速度進給，以避免模具受損。模具接觸面均加入潤滑油、實驗溫度控制在室溫下。本實驗將自動紀錄負荷和行程，換算得壓力-行程的關係圖，以及量測鍛件的填充情形，所得之實驗值將與FEM分析結果進行比較。

計畫中鍛造實驗亦在此萬能試驗機進行，圖8所示為傘齒輪鍛造成品。

為了要分析鍛造程序，以剛塑性FEM分析來探討材料在模具內的變形。其計算結果與實驗值之比較如圖9所示。兩者為負荷值之差異性尚可，因此實施傘齒輪鍛造時，鍛機之加工能力之選定可參考FEM預測值。

五、結果與討論

本文利用Deform 3D對傘齒輪精密鍛造做FEM模擬，並以鉛為試材，得到結論如下：

- (1) 傘齒輪鍛造時，錐體部分應朝下並置於下模，齒輪柄部分應在上模內成形，上

下模之界面可剖油溝以適當釋放潤滑油的壓力。

- (2) 錐體和齒輪柄轉角部分應以適當導角，使材料均勻地在模穴內成形，模穴底面可以放電鑽孔方式製作小孔以適當排除潤滑油。
- (3) 錐頂在成形時先完成填充，至成形末期時，該處壓力增加，須以適當導角以緩和縮增加之壓力。
- (4) 預測鍛造負荷-行程之關係和實驗之結果有相同的趨勢。

以鉛為實驗的胚料，實驗時易發生表面破裂，胚料也易黏附在模具內面。未來將改採中碳鋼，並製作大尺寸之齒輪，以提供業界參考之模具設計資料。

六、參考文獻

- [1] R. Douglas and D. Kuhlmann, "Guidelines for precision hot forging with applications", J. Mater. Process. Technol., Vol.98, No.1, pp.182-188 (2000)
- [2] M. Meidert, M. Knoerr, K. Westphal and T. Altan, "Numerical and physical modeling of cold forging of bevel gears", J. Mater. Process. Technol., Vol. 33, pp.75-93 (1992)
- [3] M. Fu and B. Z. Shangm, "Stress analysis of the precision forging die for a bevel gear and its optimal design using the boundary-element method", J. Mater. Process. Technol., Vol. 53, pp.511-520 (1995)
- [4] A. G. Mamalis, E. E. Manolacos and A. K. Baldokas "Simulation of the precision forging of the bevel gears using implicit and explicit FE techniques", J. Mater. Process. Technol., Vol. 57, pp.164-171 (1996)
- [5] Y. K. Lee, S. R. Lee, C.H. Lee and D.Y. Yang, "Process modification of a bevel gear forging using three-dimensional finite element analysis", J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, pp.59-63 (2001)

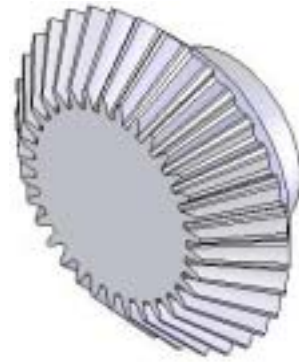


圖 1 傘齒輪模形立體圖(齒數 33, 模數 2)

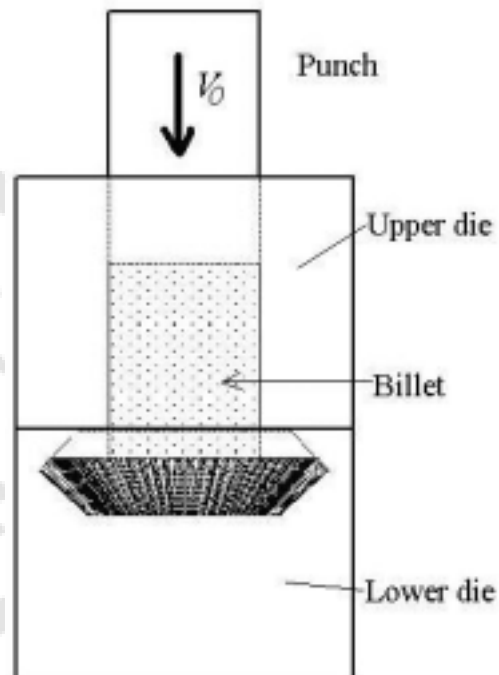


圖 2 傘齒輪鍛造模具示意圖

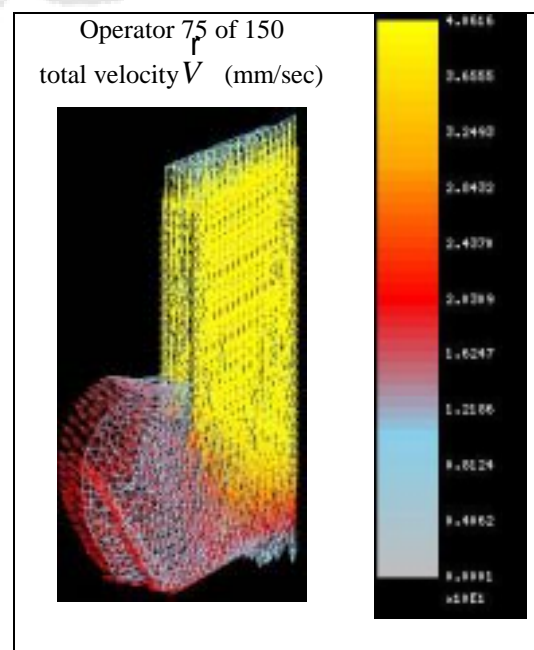


圖 3 傘齒輪鍛造速度場分佈圖

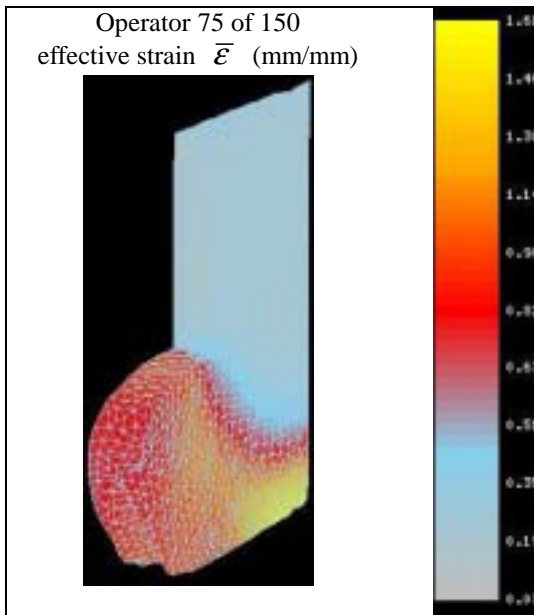


圖 4 傘齒輪鍛造之等效應變分佈圖

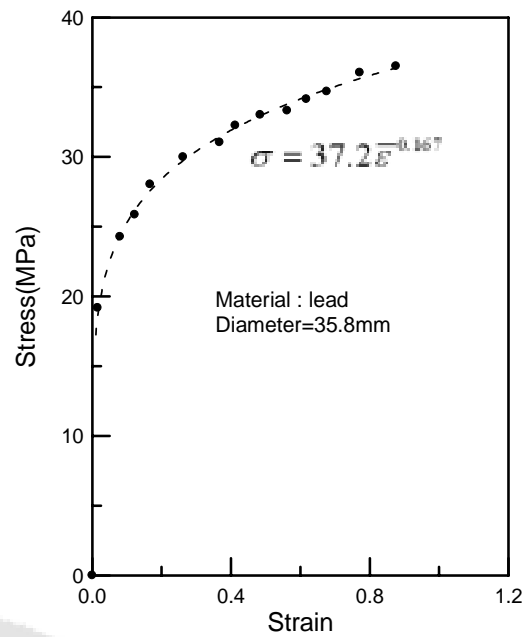


圖 7 實驗材料之應力應變關係圖

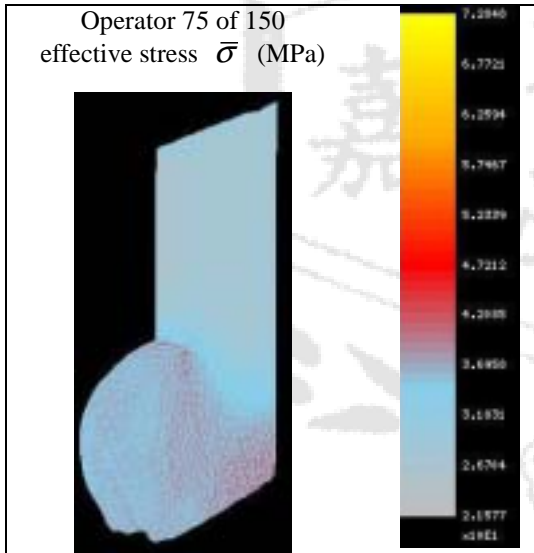


圖 5 傘齒輪鍛造之等效應力分佈圖



圖 8 實驗鍛造後之傘齒輪



圖 6 萬能實驗機

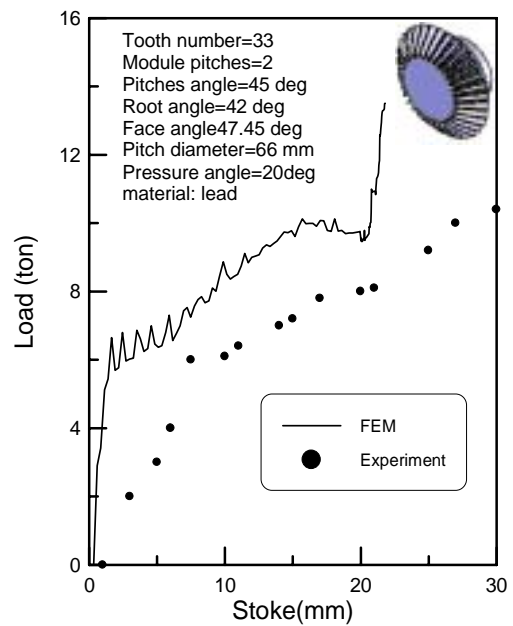


圖 9 負荷-行程關係 FEM 預估值與實驗值比較

表 1 FEM 模擬之參數設定

Element type	→ Tetrahedral
Initial mesh	→2650 nodes, 5000 surfaces 8681 Tetrahedral
Iteration method	→Direction iteration
Inner Diameter(die)	→36mm
Height(billet)	→65mm
Deformation Solver	→ Sparse
Friction(shear)	→ 0.2
Convergence error	→Velocity error 0.005, Force error limit 0.5
Punch speed	→1mm/sec
Stress-strain	→ $\sigma = 37.2\bar{\epsilon}^{0.167}$ MPa

表 2 實驗條件

Material	→Lead
Diameter(billet)	→35.8mm
Height(billet)	→65mm
Temperature	→room temperature
Stress-strain	→ $\sigma = 37.2\bar{\epsilon}^{0.167}$ MPa

