

正齒輪滾壓塑性成形有限元素模擬分析

許源泉¹ 林萬益² 黃國禎³ 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

正齒輪滾壓塑性成形法具有加工時間短、材料節省及製品性能提高等優點，因此，近些年來已逐漸進入實用階段。本文採用二維剛塑性有限元素模擬分析技術，進行齒條形模具之正齒輪滾壓塑性成形分析，以探討齒輪滾壓過程中的變形規律，換言之，本文係從材料流動變形趨勢、滾壓成形負荷、輪齒等效應變及模具應力等進行齒輪滾壓之分析。研究發現齒輪滾壓塑性成形後的金屬流線，隨著齒輪形狀分佈，壓下進給比滾壓創成所需成形負荷高，但形成的輪齒等效應變則小，齒形接近成型時模具應力也較高。

關鍵詞：正齒輪、滾壓塑性成形、有限元素法

壹、前言

齒輪是傳動系統關鍵零組件之一，廣泛應用於機械、航空、航海等工業之中，齒輪品質的優劣直接影響機器的工作性能及使用壽命，而齒輪的品質與加工方法及加工技術息息相關。目前齒輪加工大多採用傳統的切削加工方法，亦即使用圓棒胚料經車端面、鑽孔、車外徑、滾齒、剃齒及熱齒理等多道次加工。但此種方式其材料利用率及生產率低，產品成本高，同時由於金屬纖維被切斷而降低了齒輪強度、承載能力及使用壽命。因此，齒輪塑性成形技術就成為產業界尋求的重要加工方法。

滾壓塑性成形乃是滾壓模具與胚料進行轉動與壓入，使胚料表面層產生塑性變形，因而成形出所要求形狀的加工方法。齒輪滾壓塑性成形法有兩種，創成滾壓法是將淬火硬化的齒條形模具，或小齒輪形模具，或內齒輪形模具壓入胚料，在模具與胚料轉動的同時，由於產生塑性變形而創成齒形。成形滾壓法則是使用和滾壓齒輪的齒形相對應的成形滾壓模具，經特殊的滾軋加工而成形齒形的方法。[1]

滾壓塑性成形技術很早就成功地被用於螺紋零件的製造中，但對齒輪零件來說，該技術的運用進入實用階段則是近些年來的事情。這是因為滾壓成形相對切削加工而言，雖然具有成形時間短，無切屑，強度提高等特點，但是成形精度低，模具壽命短等滾壓塑性成形問題仍有待突破，故就持續發展階段的齒輪滾壓塑性成形技術而言仍是值得繼續深入探討的課題。

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，Dohamann[2]應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[3]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[4]開發一套圓柱正齒輪精鍛模具參數化CAD軟體。Abdel[5]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[6]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[7]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[8]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。

滾壓塑性成形的研究則以螺紋較多[9-15]，譬如，Ivanov[9-11]提出螺紋滾壓之滾輪外形設計的方法。Gagg[12]進行螺紋滾壓模具失效的研究。Domblesky等人[13]利用有限元素模擬進行外螺紋滾壓製程參數對材料流動及螺紋外形的影響分析。Pater等人[14]綜合論述螺紋滾壓的新方法。但有關正齒輪滾壓塑性成形的研究[16]則較少，尤其利用齒條形模具滾壓創成正齒輪的模擬分析更是闕如。

本文乃試圖利用二維剛塑性有限元素模擬法來分析利用齒條形模具創成滾壓正齒輪的變形規律，亦即從材料流動變形趨勢、滾壓成形力量、輪齒等效應變及滾壓模具應力等進行齒輪滾壓成形之分析，冀期對正齒輪滾壓塑性創成技術獲得更進一步的資訊。

貳、滾壓塑性成形有限元素模擬

一、有限元素法

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[17]：

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

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

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

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

二、模擬設定與配置

本文之滾壓塑性成形齒輪之模數為 2、齒數 28、壓力角 20°、齒頂圓直徑 60mm，齒輪外觀如圖 1 所示。利用二維剛塑性有限元軟體

DEFORM-2D 建立正齒輪之滾壓塑性成形模擬模式，圖 2 為其模擬配置，初始胚料為直徑 56mm 之 AISI-1045 鋼料，並將其設定為 5000 個四邊形元素之塑性體，而齒條形滾壓模具則先假設為剛體，並以 0.1mm/sec 速度進行滾壓成形，胚料與模具介面的定剪摩擦係數為 0.3。

為節省模擬時間，本研究之齒輪滾壓僅進行三道次，如表 1 所示，亦即在第一道次中先進行 2mm 壓下進給，再配合上下齒條形模具使胚料逆時針迴轉滾壓，第二道次以 1mm 壓下進給，胚料順時針迴轉滾壓，第三道次進行 0.5mm 微量壓下進給，其後再使胚料逆時針迴轉滾壓使輪齒成形，如圖 3 至圖 5 所示。

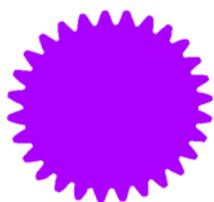


圖 1 圓柱正齒輪的外觀

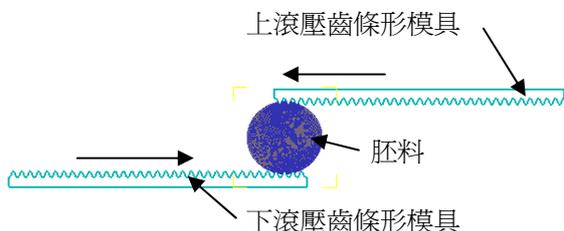
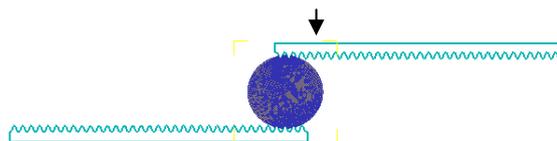


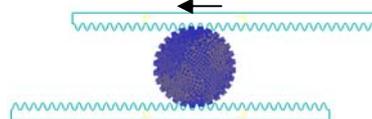
圖 2 模擬配置

表 1 滾壓塑性成形各道次參數

	第一道次	第二道次	第三道次
壓入量	2 mm	1 mm	0.5mm
滾壓方向	逆時針	順時針	逆時針
齒條形模具 進給速度	0.1mm/sec	0.1mm/sec	0.1mm/sec

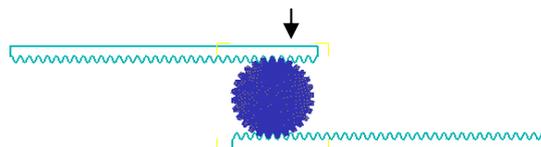


(a) 壓下進給

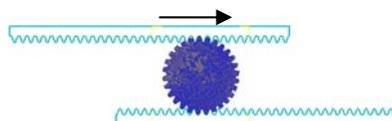


(b) 滾壓創成

圖 3 第一道次滾壓成形

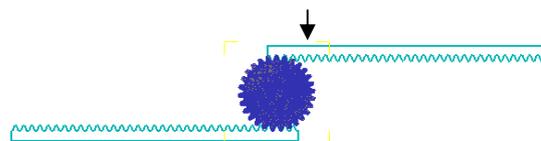


(a) 壓下進給

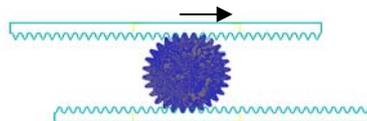


(b) 滾壓創成

圖 4 第二道次滾壓成形



(a) 壓下進給



(b) 滾壓創成

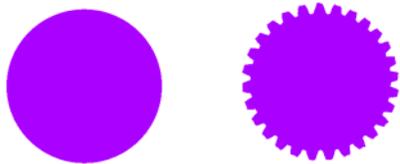
圖 5 第三道次滾壓成形

參、結果與討論

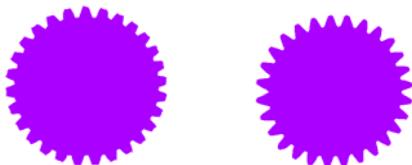
一、材料流動分析

如圖 6 為胚料經三道次滾壓塑性成形有限元素模擬的齒輪演變，而圖 7 至圖 9 為各道次滾壓胚料的速度場，由圖可知，在第一道次壓下進給時，材料往胚料中心垂直接流動，而在滾壓創成時，材料係與上模具同方向之同心圓流動。在第二道次壓下進給時，材料往胚料中心放射流動，而在滾壓創成時，材料也是與上模具同方向之同心圓流動。在第三道次齒形接近完全成形時，在壓下進給時，材料逐步往齒形空穴處流動補滿，而在滾壓創成時，材料亦與上模具同向以同心圓流動，如此將使得齒輪成形後的金屬流線隨著齒輪形狀分佈，對於齒輪韌性、強度等有相當助益。

在冷滾壓成形時，輪齒需經過多道次的滾壓方能成形，理論上齒根的壓入量應等於齒頂的突出量，但實際齒頂的突出是偏向某一側，如果滾壓參數設計不當，甚至有可能形成齒頂出現摺料現象，如圖 10 所示，其原因可能是齒面材料流動與心部材料流動速度不等所致。

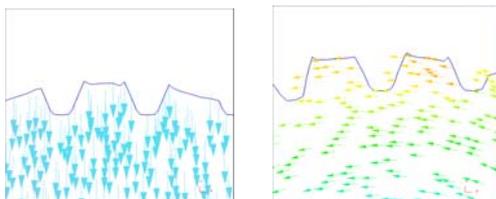


(a)成形前胚料 (b)第一道次滾壓



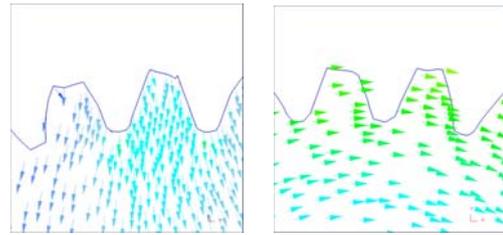
(c)第二道次滾壓 (d)第三道次滾壓

圖 6 胚料經三道次滾壓塑性成形為齒輪的演變



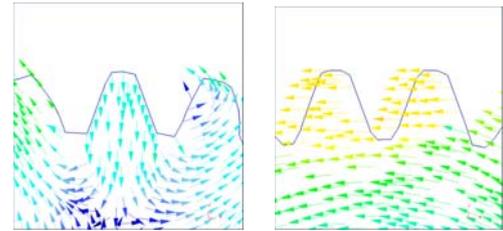
(a) 壓下進給 (b) 滾壓創成

圖 7 第一道次滾壓之速度場



(a) 壓下進給 (b) 滾壓創成

圖 8 第二道次滾壓之速度場



(a) 壓下進給 (b) 滾壓創成

圖 9 第三道次滾壓之速度場

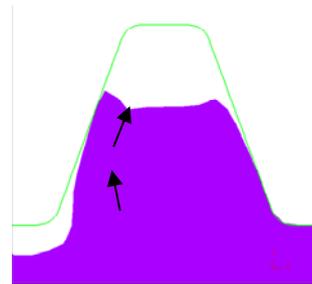
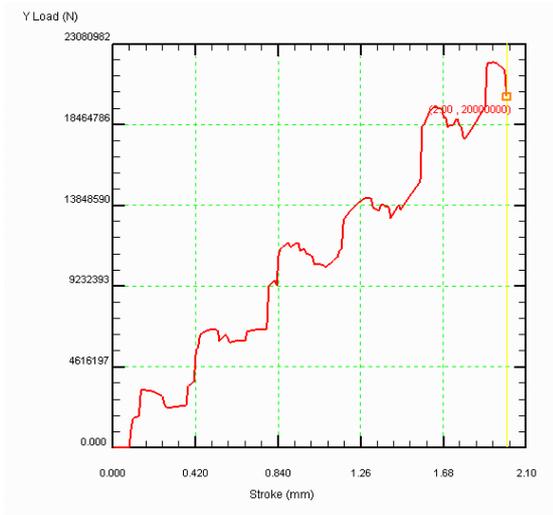


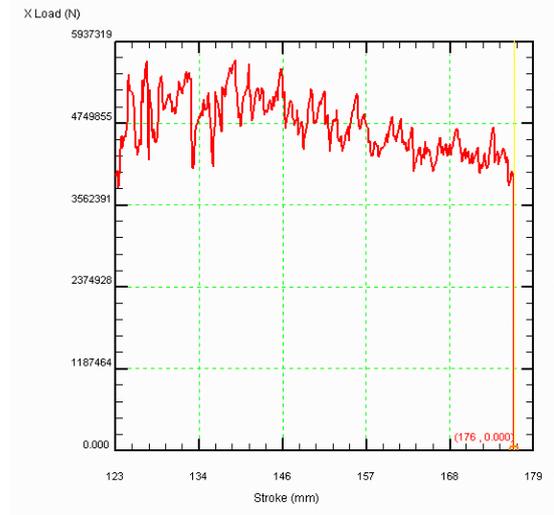
圖 10 滾壓成形輪齒突起所致摺料趨勢

二、滾壓成形負荷分析

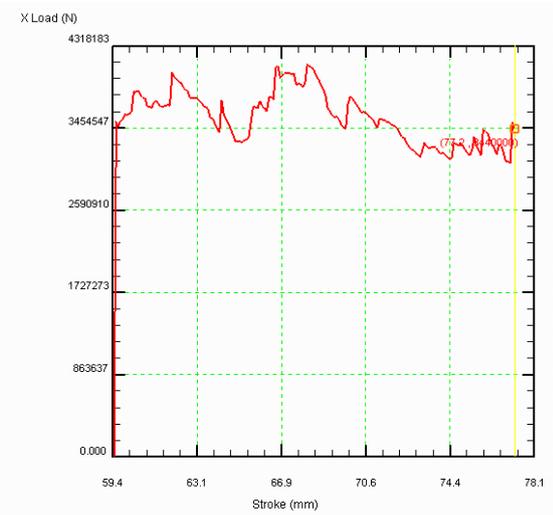
圖 11 為各道次滾壓塑性成形的負荷曲線圖。由圖可知，在各道次壓下進給時，其成形負荷隨著壓下量的增加而逐漸增高，滾壓創成則在滾壓模具滾壓運動初始即急速增高，其後以較平緩的負荷進行，但在第三道次的滾壓創成末段又小幅增加，此可能是齒輪之齒形接近完成時所需求較大的充填壓力。又圖 12 為各道次滾壓之單位壓入量所需成形負荷，由圖可知，各道次壓下進給比滾壓創成之單位壓入量所需成形負荷高，且越接近齒形完成的道次，其單位負荷需求也就越高。因此，在進行齒輪滾壓塑性成形時，每道次壓入量應降低，尤其愈是齒形接近完成階段，其壓下進給與滾壓創成皆不可太大以免成形負荷過大。



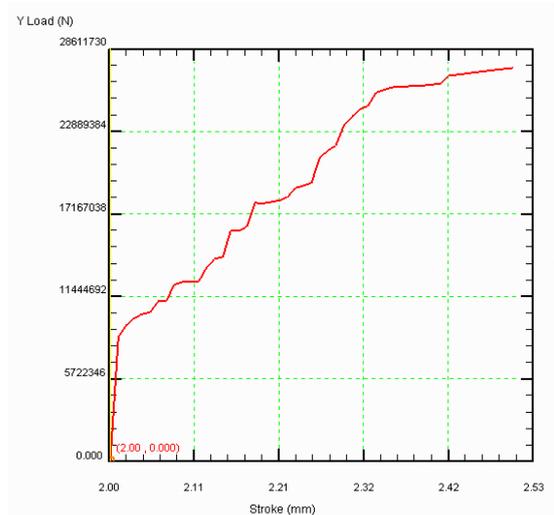
(a)第一道次壓下進給



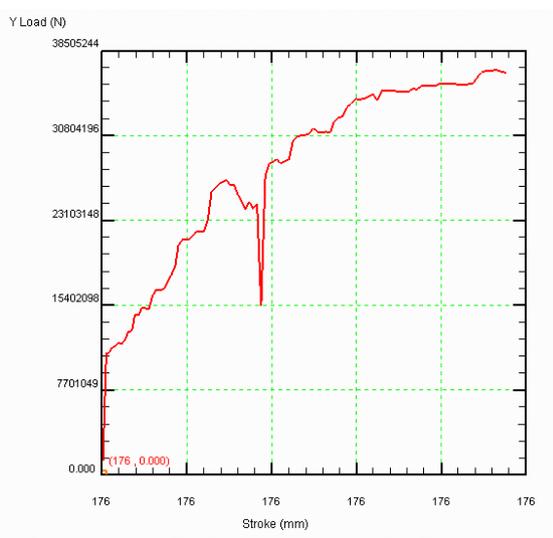
(d)第二道次滾壓創成



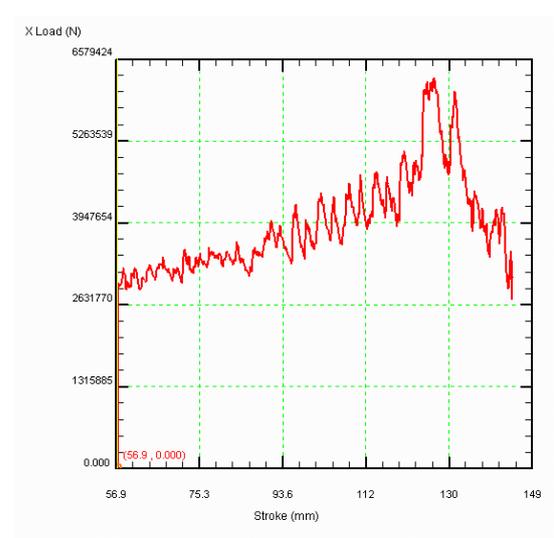
(b)第一道次滾壓創成



(e)第三道次壓下進給



(c)第二道次壓下進給



(f)第三道次滾壓創成

圖 11 滾壓塑性成形負荷

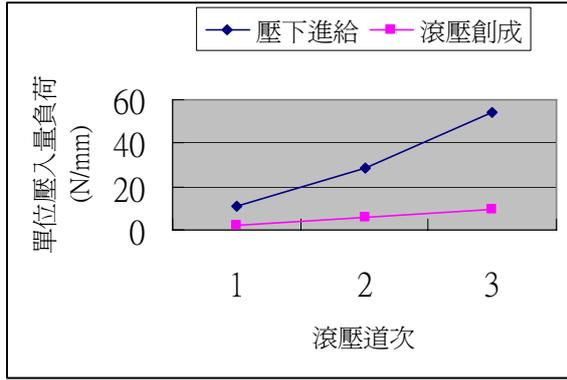
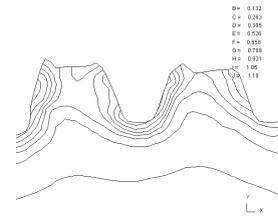


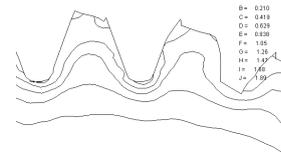
圖 12 各道次滾壓之單位壓入量所需成形負荷比較

三、輪齒等效應變分析

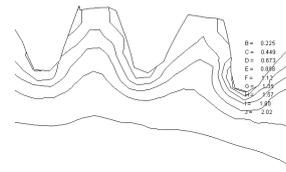
圖13為各道次滾壓塑性成形輪齒的等效應變分佈，尤其在第一道次及第二道次前，亦即齒形成形率85%以內時，壓下進給及滾壓創成所致之輪齒等效應變易隨輪齒形狀均勻分佈，而在滾壓成形末階段，滾壓運動所致等效應變分佈影響較為敏感，故雖輪齒滾壓接近完成，滾壓成形的參數控制仍需得當，始能獲致較佳的輪齒特性。又圖14為各道次滾壓之單位壓入量的等效應變比較，各道次的滾壓創成比壓下進給所形成的單位等效應變量大，而愈接近輪齒完全成形階段，單位等效應變量明顯比初期大，換言之，輪齒之強化作用將隨著滾壓成形逐漸累積，尤其在冷滾壓塑性成形製程中應特別注意，若有需要則應進行製程退火，以免輪齒因加工硬化而導致破裂缺陷的形成。



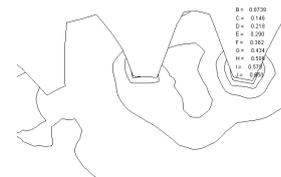
(b)第一道次滾壓創成



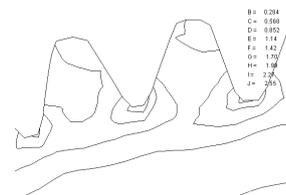
(c)第二道次壓下進給



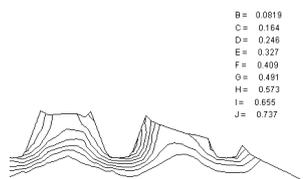
(d)第二道次滾壓創成



(e)第三道次壓下進給



(f)第三道次滾壓創成



(a)第一道次壓下進給

圖 13 滾壓塑性成形輪齒等效應變分佈

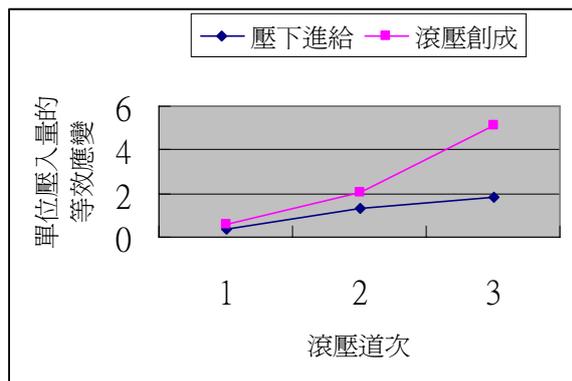
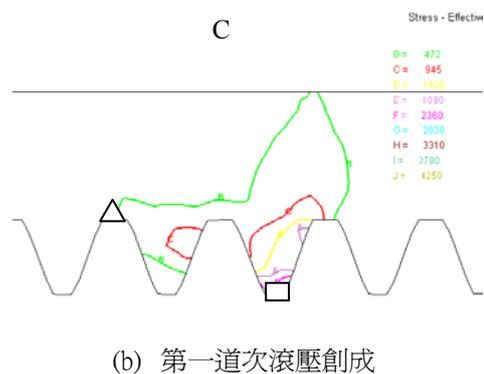


圖 14 各道次滾壓之單位壓入量的等效應變比較

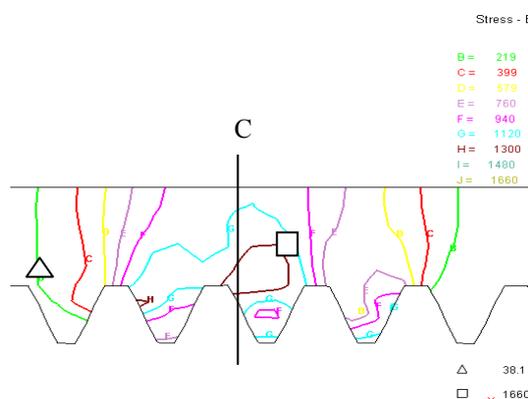
四、齒條形滾壓模具應力分析

圖 15 為各道次模具應力分佈圖，由圖可知，模具應力集中在齒輪胚中心軸線附近，且各道次在壓下進給時分佈在齒條形模具各齒區的應力較為均勻，而在齒形的滾壓創成時，應力則分佈在齒條形模具各齒區側面，第一及第三道次齒條形模具係向左進給，故應力集中在齒區左側面，第二道次則在右側面分。

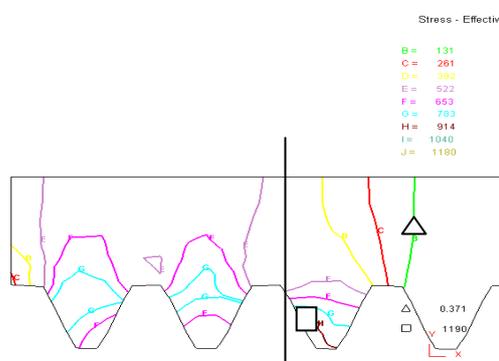
又圖 16 為各道次模具之等效應力比較，各道次的滾壓創成比壓下進給所產生的模具等效應力大，其中第一道次因壓下量較大，故滾壓創成時的模具應力最高，第三道次雖然其變形量不大，但可能因齒形接近成型，成形阻力較大，導致模具應力也較高。因此，在齒輪滾壓塑性成形的成形末段，其成形量皆應降低，以免模具應力過高而影響模具壽命。



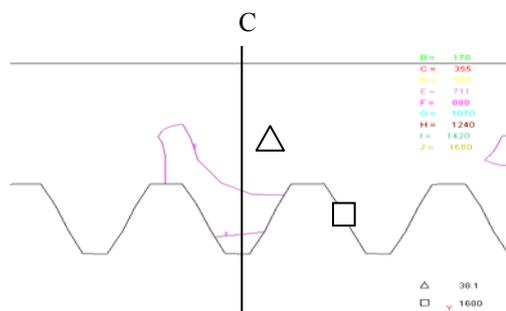
(b) 第一道次滾壓創成



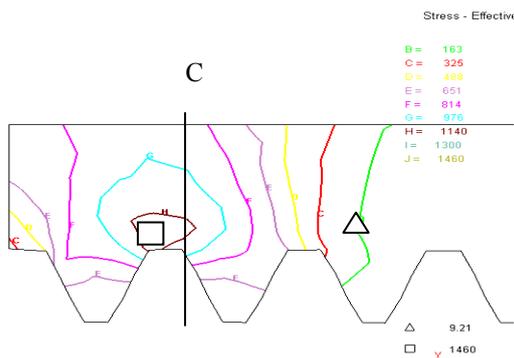
(c) 第二道次壓下進給



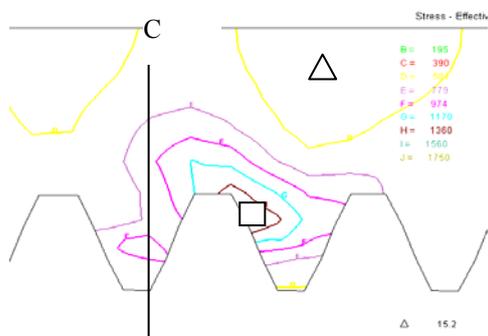
(a) 第一道次壓下進給



(d) 第二道次滾壓創成



(e) 第三道次壓下進給



(f) 第三道次滾壓創成

圖 15 模具應力分佈圖(C 為齒輪胚中心位置, □ 為最大等效應力處, △為最小等效應力處)

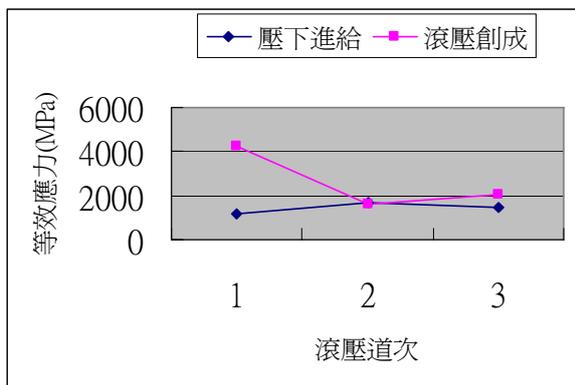


圖 16 各道次滾壓之齒條形模具等效應力比較

肆、結論

本研究採用二維剛塑性有限元素模擬分析技

術進行齒條形模具之正齒輪冷滾壓塑性成形分析,以探討齒輪滾壓過程中的變形規律,換言之,本文係從材料流動變形趨勢、滾壓成形力量、輪齒等效應變及模具應力等進行齒輪滾壓之分析。研究有如後之結論:

- 一、齒輪滾壓塑性成形後的金屬流線隨著輪齒形狀分佈,但需避免齒頂出現摺料現象。
- 二、壓下進給比滾壓創成所需成形負荷高,且越接近齒形完成階段其單位負荷需求也就越高。
- 三、各道次的滾壓創成比壓下進給所形成的輪齒單位等效應變量大,而越接近輪齒完全成形階段,單位等效應變量明顯比初期大。
- 四、模具應力集中在齒輪胚料中心軸線附近,齒形接近成型模具應力也較高。

總之,利用滾壓塑性成形技術來製造齒輪具有相當的可行性與優異特質,但需對各製程參數適宜設計,以獲得較佳的效果。

參考文獻

1. 塑性加工學會, 壓力加工手冊, 機械工業出版社(大陸), 1984。
2. F. Dohmann and O. Traudt, Metal flow and tool stress in cold forging of gear component, Advanced Technology of Plasticity, 2nd ICTP, Stuttgart, 1987.
3. O. P. Groover and B. L. Juneja, Analysis of closed die forging of gear like element, Advanced Technology of Plasticity, 1st ICTP, Tokyo, 1984.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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
 8. 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.
 9. V. Ivanov, Profiling of rollers for thread rolling, Journal of Materials Processing Technology, 59, 1995.
 10. V. Ivanov, Rolling of internal threads:Part 1, Journal of Materials Processing Technology, 72, 1997.
 11. V. Ivanov, Rolling of internal threads:Part 2, Journal of Materials Processing Technology, 72, 1997.
 12. V. Ivanov, Rolling of long screws, Journal of Materials Processing Technology, 82, 1998.
 13. C. R. Gagg, Premature faile of thread rolling dies: material selection, hardness criteria and case studies, Engineering Failure Analysis, 8, 2001.
 14. J. P. Domblesky, F. Feng, A parametric study of process parameters in external thread rolling, Journal of Materials Processing Technology, 121, 2002.
 15. Z. Pater, A. Gontarz, W. Weronki, New method of thread rolling, Journal of Materials Processing Technology, 153-154, 2004.
 16. S. Uematsu, Effect of variation of angular velocity in gear rolling process on profile error, Precision Engineering, 26, 2002.
 17. S. kobayashi, S. Oh, and T. Altan, Metal forming and the finite-element method, Oxford University Press, 1989.

