

兩道式正齒輪分流冷鍛有限元素模擬分析

許源泉^{1*} 林萬益² 陳建利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四技生

摘 要

塑性成形齒輪具有頗多優異特性，故漸受重視。本研究提出兩道式分流冷鍛法以進行正齒輪的塑性成形，應用三維剛塑性有限元素法來進行正齒輪閉式模鍛的數值模擬分析，以探討正齒輪兩道式分流冷鍛與傳統單道式冷鍛在胚料塑性流動變形、成形負荷、齒輪鍛件應變分佈及模具應力分佈的差異。研究發現，此種兩道式分流冷鍛的新方案能達到增加材料流動、較佳齒形充填、降低成形負荷及模具應力、強化輪齒效果等特性，顯示此新設計方案的確是具有相當的可行性與優異性。

關鍵字：正齒輪、分流法、有限元素法。

*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

各式機械零件中，齒輪扮演著傳遞能量的重要角色，傳統切削式齒輪製造方法不但材料利用率不高，且經過切削後，工件本身的晶粒流線被切斷，導致齒輪本身的強度下降，故齒輪精鍛技術漸受重視[1]。

但是因為正齒輪冷鍛充填困難、成形負荷大、流動性差、產品品質與精度不易控制、模具壽命不易掌握，齒輪冷鍛模具材料費用高、加工精度要求高，在成形過程中一連串的變量，如加工方法的變更、齒模的修正、模具尺寸的調整、甚至胚料大小、潤滑等，皆將導致開發費用及開發週期大幅增加，因此對齒輪冷鍛成形過程研究探討有其必需性[2-3]。

變形規律分析、製程與模具設計分析、鍛件品質與精度控制及數值模擬研究是現階段圓柱正齒輪精鍛研究的四大方向。譬如 Dohmann[4] 曾將數值逼近法及主應力法應用於齒輪零件冷鍛中各成形階段的應力及流動情況分析。Choi[5] 透過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[6] 開發一套圓柱正齒輪精鍛模具參數化 CAD 軟體。Abdel[7] 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[8] 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[9] 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[10] 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。張清萍等人[11] 指出鍛造負載隨著模數和齒數的增加而增加，成形初始高度越小，鍛造負載越大，填充終了階段，隨高度增加，鍛造負載亦增加。

分流孔設計在齒輪精密成形中已倍受重視、探討與應用，Choi[12] 等發展了分流法，提出向內分流成形的齒輪冷精鍛方法，並且應用於空心正齒輪鍛造，以期能有效的改善正齒輪成形負荷急劇增加、齒型充填不夠完整的問題。Ohgqa[13] 闡述分流減壓原理的適用範圍，完整分析圓柱正齒輪分流精鍛技術的應用。程羽等人[14] 研究發現，適當的分流孔尺寸可降低成形負荷，過與不及對齒輪成品皆有影響。許源泉[15] 等人研究不同分流孔形狀對齒輪熱精鍛的影響。

本文乃在於分析兩道式分流冷鍛製程對圓柱齒輪冷精鍛的影響，亦即用三維剛塑性有限元素法來進行正齒輪的閉式模鍛數值模擬分析，探討傳統單道式及兩道式分流冷鍛成形的變化，以瞭解其對齒輪鍛造胚料塑性流動、成形負荷、模具應力及鍛件應變的分佈規律，冀期對冷精鍛正齒輪成形獲得更進一步的資訊。

貳、剛塑性有限元素模擬

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[16]：

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

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

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

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

目前有限元素分析模擬領域中，有相當多的分析軟體相繼發展起來，如 DEFORM、SuperForge、ABAQUS、FORGE、AutoForge、DYNA 等，又以其中的 DEFORM 最為業界廣泛性的使用，歐美及日本業界已有多家廠商在鍛造製程中，將模擬解析技術定為標準化流程，因此本文採用 DEFORM 有限元素模擬軟體來建構正齒輪冷鍛分析模型。

本研究欲製造的齒輪規格為模數 3、齒數 24、壓力角 20°、內孔直徑 15 mm、高度 30 mm、材料 AISI 1015。有限元素分析軟體 Deform-3D 將用來進行模擬分析，模具假設為剛體、上模速度 50 mm/s、定剪摩擦係數 0.1、每步下壓量 0.1mm、網格數為 40000，胚料選用空心圓柱，空心直徑 15.5mm，外徑採用接近齒根圓直徑以減少預鍛的時間，故取 62.5mm，利用體積不變條件計算出高度取為 43 mm，本次工件由於軸對稱的關係，為減少電腦模擬運算時間，故只採取全齒 1/24 作為模擬物件。

一般傳統單道式閉式冷鍛如圖 1 所示，而本研究之兩道式冷鍛乃在預鍛模具的上模(沖頭)及下模各設計一形狀參數相同之圓球冠形凸轂，凸轂半徑為 20.5 mm，高度為 16 mm，截面半徑為 20 mm，如圖 2 所示。終鍛模具則與傳統閉式模具類似，如圖 3 所示。

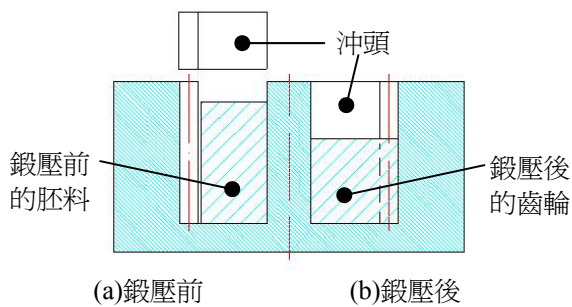
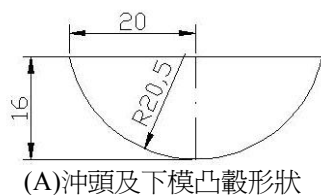
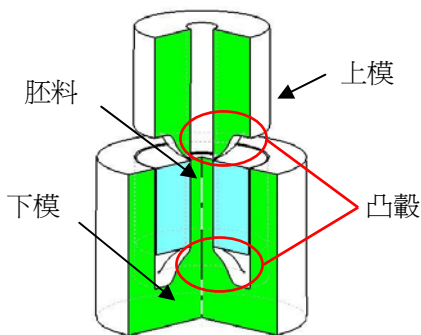


圖 1 傳統單道式閉模鍛造



(A) 沖頭及下模凸轂形狀



(B) 上下模配置圖

圖 2 兩道式分流冷鍛的預鍛模具

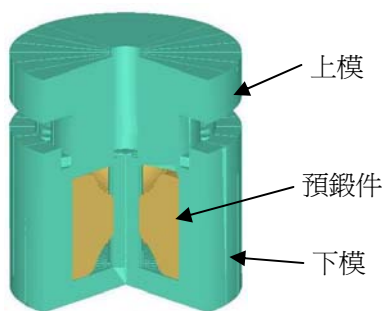


圖 3 兩道式分流冷鍛的終鍛模具

參、結果與討論

圖 4 所示為兩道式分流冷鍛法的預鍛件及終鍛件，從圖 4 可知，由於上下模具凸轂的關係，在預鍛完成後完成了圓弧形凹陷的預鍛件，而預鍛件在終鍛完成後，齒形充填情形良好，材料完全充填整個模穴，齒頂的部份也充填的相當完整。

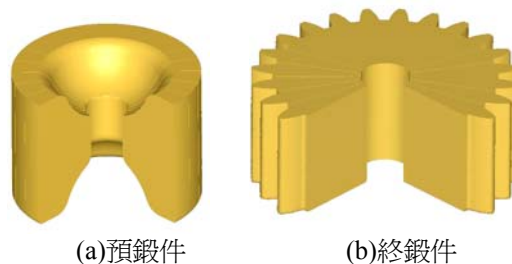


圖 4 兩道式分流冷鍛的預鍛件及終鍛件

一、速度場分析

如圖 5 所示為傳統單道式冷鍛成形過程的速度場，在精鍛沖程 25%(2.6mm)時，胚料受上模負荷作用及材料與模具齒根間隙影響，材料往下方及模穴流動，從精鍛沖程 45%(4.6mm)到最後沖程 100%的流向皆為一規律同心圓擴展，往齒型模穴方向充填完成。

如圖 6 所示為兩道式分流預鍛及終鍛之鍛件速度場示意圖。在預鍛成形過程中，精鍛沖程 10%(2.6mm)時，往胚料下方流動，在沖程 37%(10.2mm)為逆時針方向往下流動，在沖程 76%(20.6mm)為朝外徑方向往下流動，在 100%完全填滿時，材料為直線向下流動。在終鍛成形過程中，當沖程 20%(2.8mm)時，材料往下朝中心及圓周處流動，並逐漸往輪齒處充填，而在沖程 38%(5.4mm)至充填結束過程中，材料皆持續朝中心及外圓輪齒處流動，直到齒型完整成形。

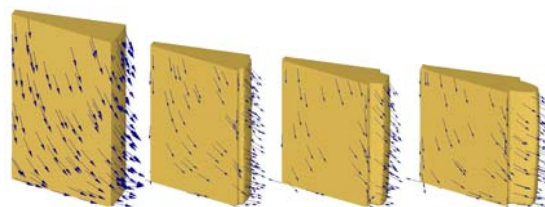
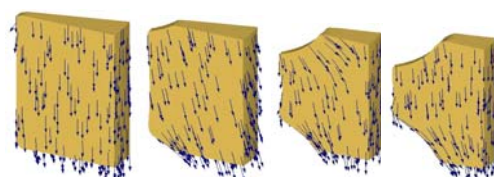
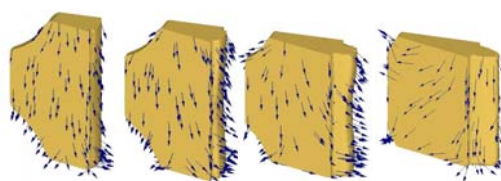


圖 5 傳統單道式冷鍛之輪齒速度場



(A) 兩道式分流預鍛成形



(B) 兩道式分流終鍛成形

圖 6 兩道式分流預鍛及終鍛之輪齒速度場

二、成形負荷分析

圖 7 為兩道式分流預鍛及終鍛之沖程負荷曲線圖，圖 8 為其對應之分流預鍛與終鍛齒形演變過程，由圖可知，分流預鍛的成形負荷在與終鍛負荷的比較下顯得相當的小，預鍛件的成形負荷最大為 200.122 KN 而終鍛件為 696.82KN。圖 9 為傳統單道式與兩道式分流冷鍛(終鍛)負荷曲線圖比較，圖 10 為其對應之傳統單道式齒形演變過程，在圖 9 曲線的比較下，行程初兩者的負荷大小差距不大，乃因齒根部分較大，材料的流動性較佳之故，行程中後則可清楚的比較出，由於齒根到節圓及齒頂的部份模穴逐漸縮小，分流式由於內側有預留凹穴，材料一面朝齒頂流動一邊向凹穴流動，流動性較佳，而傳統的完全流向齒頂部分，流動較為不易，負荷則隨之上升，傳統單道式之成形負荷最大值為 859.02 KN，而兩道式分流終鍛負荷最大值為 696.82 KN，兩種製程相較，可知兩道式分流冷鍛的負荷比傳統單道式冷鍛小 18.8%。

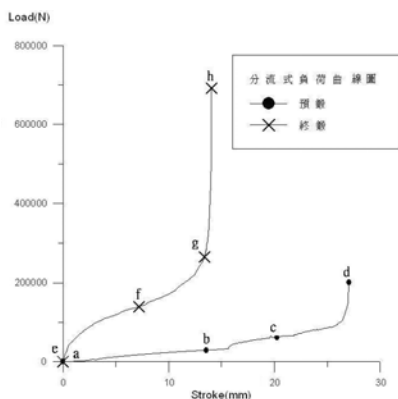


圖 7 兩道式分流預鍛及終鍛負荷曲線圖

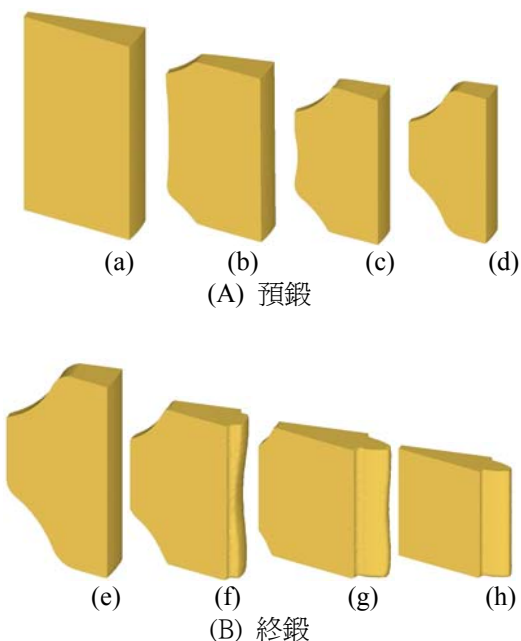


圖 8 兩道式分流冷鍛之齒型演變過程

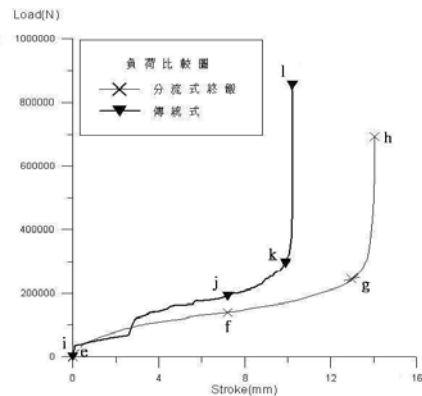


圖 9 傳統單道式與兩道式分流冷鍛負荷曲線圖比較

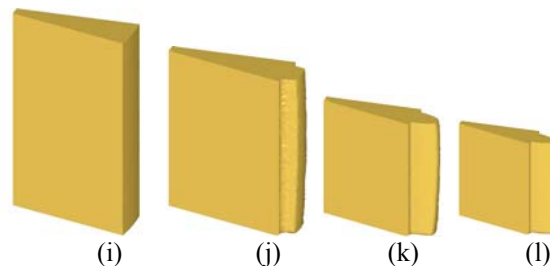
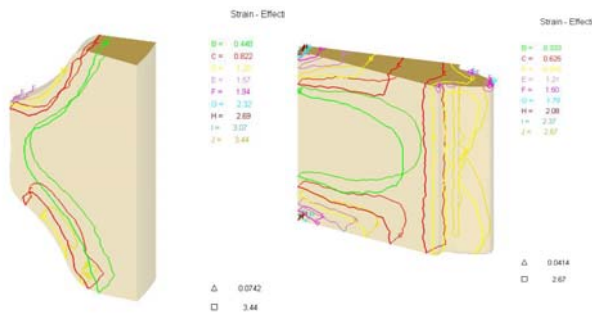


圖 10 傳統單道式冷鍛之齒型演變過程

三、鍛件等效應變分析

圖 11(a)為分流式預鍛後預鍛件等效應變分佈，由圖可知，胚料經過模具凸轂鍛壓後，鍛件在中心區域凸轂成形所致低凹處，形成較集中的應變分佈，最大等應變值為 3.44，最小應變值為 0.0742，而靠近外圓處並無明顯的變形強化。

圖 12 為傳統單道式冷鍛材料內部應變圖，與圖 11(b)之兩道式分流終鍛比較可知，兩道式分流終鍛由於凸轂導致材料形成的內部凹穴，使之鍛壓時造成分流的效果，故其應變分佈曲線相當均勻的分佈於材料上，等效應變最大值為 2.67 最小值為 0.0414，而傳統單道式在鍛壓時材料只能向齒模內流動，以致於應變曲線密集的分佈於齒根附近及齒頂，最大應變值 1.97、最小應變值 0.248。因此，兩道式分流冷鍛所成形的最終輪齒強化效果較大，比傳統單道式高 35.53%。



(a) 預鍛件 (b) 終鍛件
圖 11 兩道式分流冷鍛件等效應變分佈

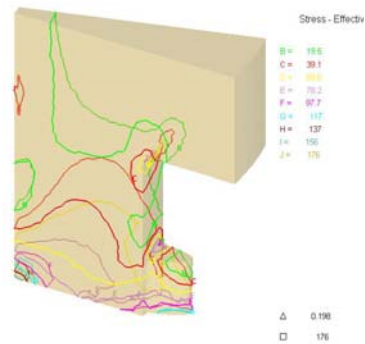


圖 14 傳統單道式冷鍛之上模應力分佈

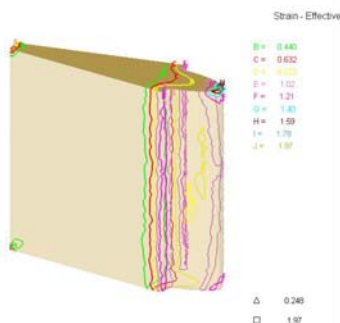


圖 12 傳統單道式冷鍛件等效應變分佈

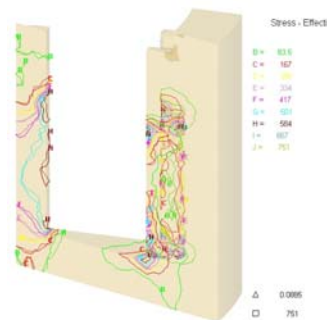


圖 15 兩道式分流終鍛之下模應力分佈

四、模具應力分析

圖 13 及圖 14 分別為兩道式分流冷鍛及傳統單道式冷鍛上模之模具應力分佈圖，傳統單道式之上模應力最大值為 176 Mpa，兩道式上模應力最大值為 131 Mpa，分流式比傳統式應力值小約 25.5%。圖 15 及圖 16 分別為下模的模具應力分佈圖，傳統式下模最大應力值為 773Mpa，分流式下模最大應力值為 751 Mpa，分流式下模最大應力比傳統式小約 2.8%，從下模應力分佈圖可以看出，從齒根到齒頂模穴逐漸縮小，材料的負荷增加，以致在齒穴中的應力變化較為激烈。

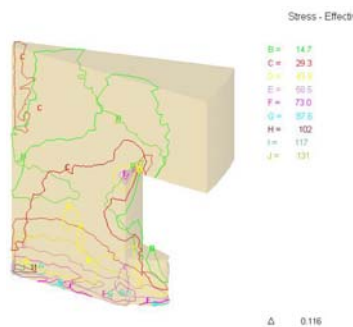


圖 13 兩道式分流終鍛之上模應力分佈

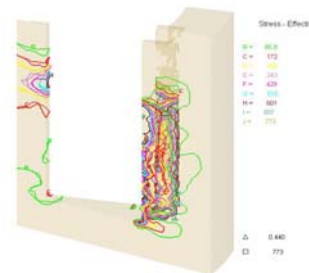


圖 16 傳統單道式冷鍛之下模應力分佈

肆、結論

本文乃利用三維剛塑性有限元素法來模擬閉式冷鍛正齒輪的塑性成形，並比較兩道式分流冷鍛與傳統單道式冷鍛的差異，研究後有如後的結論：

- 一、不論是兩道式分流冷鍛或傳統單道式冷鍛皆有充填良好的齒形，以獲得最終完整的正齒輪。
- 二、兩道式分流冷鍛所需成形負荷比傳統單道式冷鍛低。
- 三、兩道式分流冷鍛所成形的最終輪齒強化效果比傳統單道式為高。
- 四、不論上模或下模，兩道式分流冷鍛的模具應力皆比傳統單道式為低。

總之，應用三維剛塑性有限元素法進行正齒輪冷鍛的模擬分析有相當的方便性與參考性，而且兩道式分流冷鍛不論在齒形充填、成形負荷、輪齒強化效果及模具壽命等皆比傳統單道式冷鍛優異。

伍、參考文獻

1. 許源泉，塑性加工學，全華科技圖書股份有限公司，2004
2. 大賀喬一．分流方式による冷間精密鍛造技術とその應用 // 第5回中日精密鍛造シニポツウム論文集 [C]，西安：1996．
3. YANG D Y, CHO J R, LEE N K. 3D finite element simulation of complicated hot forging processes using a new remeshing scheme based on body fitted mapping technique/ / . Proc 4th ICTP [C], 1993.
4. F. Dohmann and O. Traudt, Metal flow and tool stress in cold forging of gear component, Advanced Technology of Plasticity, 2nd ICTP, Stuttgart, 1987
5. O. P. Groover and B. L. Juneja, Analysis of closed die forging of gear like element, Advanced Technology of Plasticity, 1st ICTP, Tokyo, 1984
6. 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
7. 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
8. D. Y. Yang, A three-dimensional rigid-plastical finite element analysis of spur gear forging using the modular remeshing technique, Proocess instrument and Mechanical Engineering, 25, 1991
9. 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
10. 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
11. 張清萍、趙國群、欒貽國、王廣春，直齒圓柱齒輪精鍛成形工藝及三維有限元模擬，塑性工程學報，10 卷 1 期，2003
12. J. C. Choi, Y. Choi, Precision forging of spur gears with inside relief, International Journal of Machine Tools & Manufacture 1999, 39 : 1575~1588
13. K. Ohga and K. Konod, Research on application range of the precision cold die forming utilizing divided flow to thick products. Advanced Technology of Plasticity – Proc. Of 4thICTP, Peking, 1993
14. 程羽、楊程、李剛、臧順來、邢光漢，齒輪精密成形技術的研究，塑性工程學報，11 卷 6 期，2004
15. 許源泉、楊東昇、余尚翰，分流孔形狀對圓柱齒輪熱精鍛的影響，國立虎尾科技大學學報，25 卷 1 期，2006
16. S. Kobayashi, S. Oh, and T. Altan, Metal forming

Finite Element Simulation And Analysis of The Two-stages Divided Flow Cold Forging for Spur Gear

Yuan-Chuan Hsu^{1*} Wann-Yih Lin² Jian-Li Chen³

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

With overwhelming advantages, the plastic forming process for gear manufacturing has been an important technique. In the current study, the two-stages divided flow cold forging process was employed to manufacture the spur gear. The 3D rigid-plastic finite element simulation technique was used to analyze the plastic forming of closed forging for spur gear. The plastic flow deformation, the forming loads, the strain distribution of forging gears and the stress distribution of forging dies between the two-stage divided flow cold forging and the traditional single stage cold forging were explored. The results indicated that the new method, the two-stage divided flow cold forging, posed enhanced material flow, better teeth profile filling, lower forming loads, lower die stress and strengthened gear tooth effect. The new approach proved to be valuable for manufacturing spur gears.

Key Words: spur gear, divided flow method, finite element method.

*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

