

# 分流孔形狀對圓柱齒輪熱精鍛的影響

許源泉<sup>1</sup> 楊東昇<sup>1</sup> 余尙翰<sup>2</sup>

國立虎尾科技大學機械製造工程系<sup>1</sup>

國立虎尾科技大學機械與機電所碩士班<sup>2</sup>

## 摘 要

圓柱正齒輪精鍛研究是金屬塑性成形領域的重要課題，本文採用三維剛塑性有限元素模擬分析技術進行圓柱正齒輪的閉式模鍛數值模擬熱鍛分析，以探討不同形狀分流孔胚料對齒輪精鍛的影響。研究發現具分流孔胚料鍛壓負荷增壓較和緩，具分流孔胚料比實心胚料更有利於齒輪精鍛成形。在三種分流孔胚料中，凸壁分流孔胚料最有利於齒輪精鍛成形，直壁分流孔胚料次之，而凹壁分流孔胚料則較差。

**關鍵字：**圓柱正齒輪，分流孔，有限元素法

## 壹、前言

齒輪是工業上廣泛使用的重要傳動零件，其加工方法繁多，傳統切削加工法製造齒輪零件，由於金屬纖維不連續導致強度降低、材料利用率與生產率亦低、成本較高等缺點。齒輪精鍛法乃是指輪齒由胚料經由鍛造直接鍛壓成形，而齒面不需切削加工或僅要少許精加工即可使用的齒輪製造技術。與傳統切削加工法比較，齒輪精鍛法的材料利用率由目前 40% 提高到 70% 以上，生產效率則提高到 40% 左右、抗彎強度與抗疲勞強度、耐衝擊性等等亦提高 20% 以上的優勢，因此受國內外高度重視。[1]但因精鍛成形技術難度高、齒形模穴隅角填充不易、模具壽命短等因素，故直齒輪精鍛技術仍在發展階段，亦是值得再探討的課題。

圓柱正齒輪精鍛的研究可歸納為四方向：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。譬如 Dohmann[2] 曾運用數值逼近法及主應力法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。張清萍等人[9]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亦被應用，Ohgqa[10]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[11]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。但有關分流孔形狀對齒輪精鍛影響的研究則顯少。

本文乃在於分析不同分流孔形狀胚料對圓柱齒輪精鍛之影響，亦即用三維剛塑性有限元素法來進行直齒圓柱齒輪的閉式模鍛數值模擬分析，探討不同分流孔形狀對齒輪鍛造胚料變化、塑性變化過程、應力及應變的分佈情況等等，冀期對精鍛直齒輪成形獲得更進一步的資訊。

## 貳、精鍛成形有限元素模擬

### 2.1 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，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[15]：

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

(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

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

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

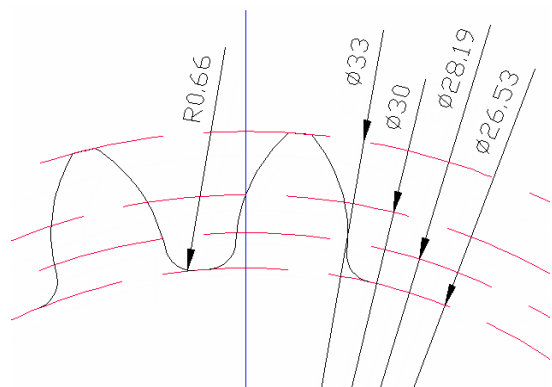
### 2.2 模擬設定與配置

本文為了探討分流孔形狀對精鍛圓柱齒輪的影響，以閉式模鍛方法鍛造圓柱齒輪，利用三維剛塑性有限元軟體 DEFORM-3D 模擬熱鍛，模擬齒輪尺寸為模數 1.5、齒數 20、壓力角 20°，齒輪外觀及齒型尺寸如圖 1 所示。

如表 1 所為胚料及模具相關特性，胚料為中碳鋼，胚料外徑則設計為接近齒根圓的 26.5mm，其尺寸如圖 2 及圖 3 所示，胚料初始溫度為 1100°C。模具初始溫度為 300°C，模具設定為剛體，上模速度 50mm/s，每步下壓量為 0.08mm。因其對稱性，故採取 1/4 進行模擬，以節省模擬時間，模擬配置如圖 4 所示。



(a)圓柱正齒輪外觀



(b) 輪齒細部設計(單位: mm)

圖 1 圓柱正齒輪的外觀與齒形細部設計

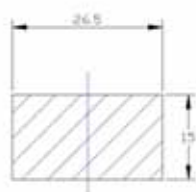
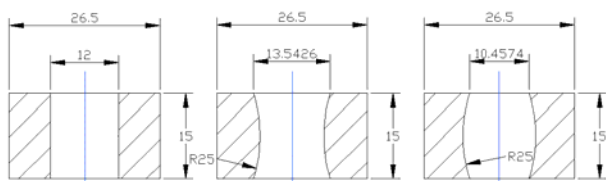


圖 2 實心坯料



(A)直壁分流孔 (B)凸壁分流孔 (C)凹壁分流孔

圖 3 具分流孔胚料

表 1 胚料與模具特性

胚料	材 質	AISI-1045
	溫度(°C)	1100
	熱輻射係數 (N/sec*mm*°C <sup>4</sup> )	0.7
	楊氏係數(MPa)	206754
	蒲松氏比	0.3
	熱膨脹係數(mm/mm*°C)	1.2×10 <sup>-5</sup>
模具	材質	Rigid
	溫度(°C)	300
	沖頭鍛壓速度(mm/sec)	50
環境	定剪摩擦係數	0.2
	環境溫度(°C)	25°C
	熱對流係數 (N/sec*mm*°C)	0.02

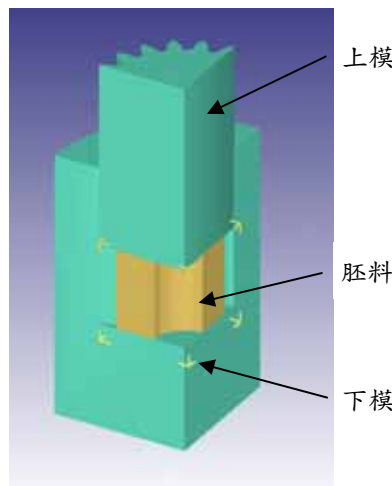


圖 4 模擬配置

## 參、結果與討論

### 3.1 鍛壓負荷分析

圖 5 為實心與直壁分流孔胚料的負荷位移曲線圖，由圖可知，實心與直壁分流孔胚料具類似鍛壓負荷發展趨勢，但在各鍛壓行程中，實心胚料所需鍛壓負荷比具分流孔者為高，此與文獻[11]所述頗為吻合。對模具受力而言，以直壁分流孔胚料緩慢增壓較不易使模具因疲勞而損壞，有利於提高模具壽命。

圖 6 為三種分流孔胚料之鍛壓負荷曲線圖，直壁、凸壁、凹壁三種分流孔胚料彼此的負荷差距僅在 1kN 之內，且差距時有變動，而對於整體所需的 300kN 而言影響不大，故其鍛壓負荷的差異性並不顯著。

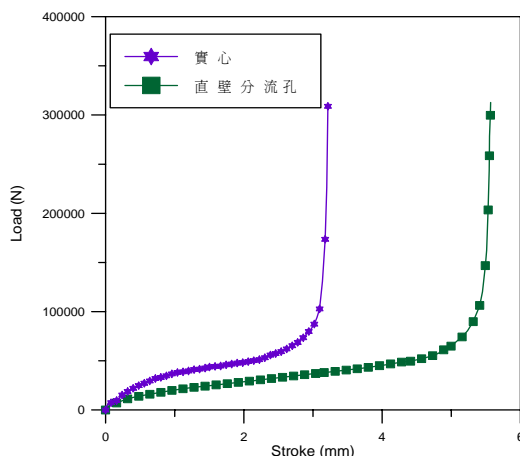


圖 5 實心與直壁分流孔胚料之齒輪精鍛負荷一位移曲線圖

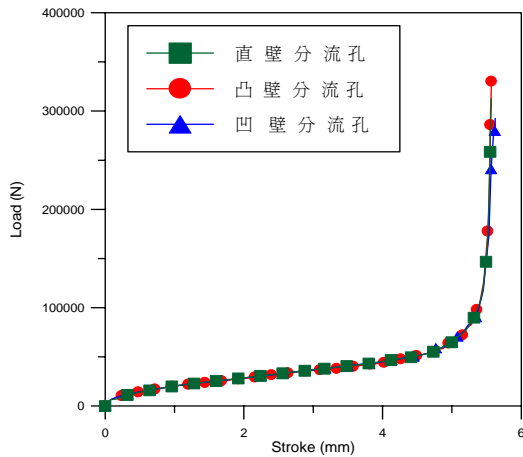


圖 6 不同形狀分流孔胚料之齒輪精鍛負荷—位移曲線圖比較

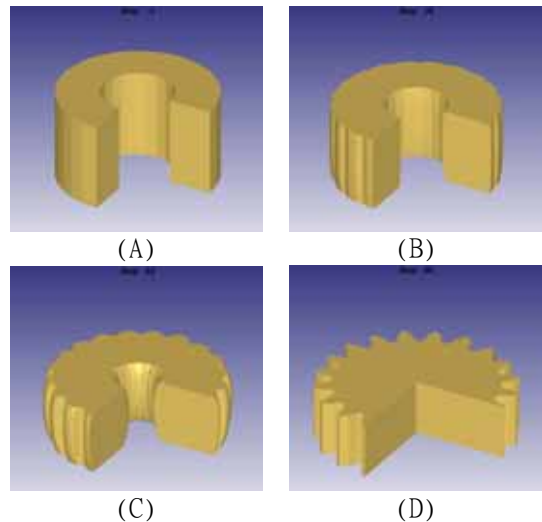


圖 8 直壁分流孔胚料精鍛齒輪成形過程

### 3.2 齒型成形變化

圖 7 至圖 10 為各種胚料之精鍛齒輪成形過程，由圖可瞭解直齒輪成形時，其齒形模穴充填的情況與分流孔塑性變形的演變。隨著上模下壓量增加，材料開始充填齒形模穴，分流孔亦開始緩慢閉合，而當分流孔閉合時，齒形亦接近充填完成，使分流孔達到其分流作用。

再由圖 8 至圖 10 詳細分析可知，不同形狀分流孔之閉合情況亦不相同，凸壁分流孔胚料其分流孔閉合時，易於先從中端接觸，再往上下兩端閉合，不易有空氣殘留於齒輪內部，直壁分流孔胚料與凸壁分流孔胚料其分流孔閉合情況變化雷同，凹壁分流孔胚料因其分流孔形狀為內凹狀，故變形時由內凹變直筒狀，再由直筒變外凸狀，分流孔閉合屬於全面性閉合，若曲率過大時有可能上下兩端先接觸閉合，除了容易有殘留空氣在齒輪內部外，也有產生摺料缺陷之虞。

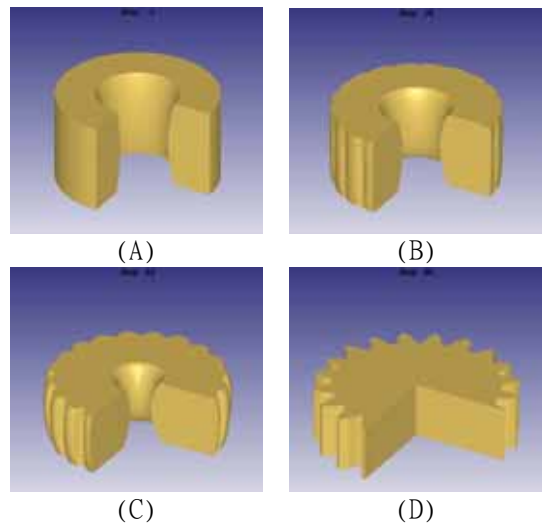


圖 9 凸壁分流孔胚料精鍛齒輪成形過程

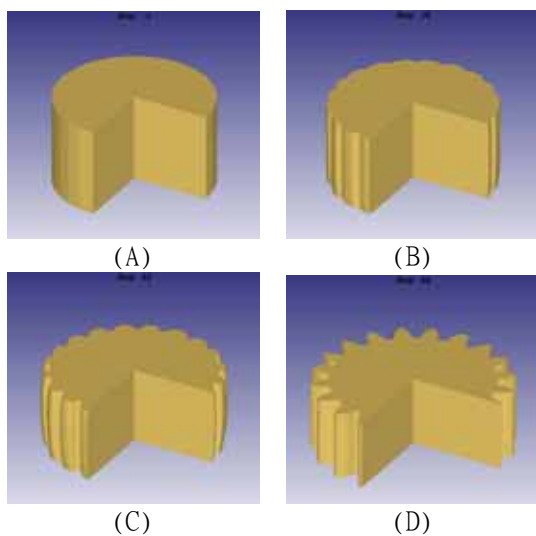


圖 7 實心胚料精鍛齒輪成形過程

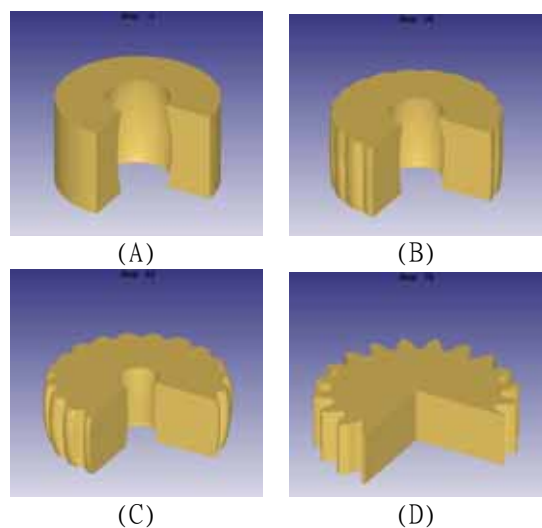


圖 10 凹壁分流孔胚料精鍛齒輪成形過程

### 3.3 等效應變分佈分析

如圖 11 所示為實心胚料與直壁分流孔胚料在各鍛壓行程之齒輪最大等效應變發展比較，由圖可知，實心胚料在同行程下其齒輪成形件之最大等效應變較直壁分流孔胚料高，此乃因實心胚料無分流孔，故當實心胚料在鍛壓變形充填齒型時，材料只能朝齒型模穴方向變形，而直壁分流孔胚料在變形充填齒型時，材料除了朝齒型模穴方向變形外，還有分流孔方向可供材料流動，故最大等效應變較實心胚料為低。

實心胚料鍛壓行程在 3.22mm 時，完成圓柱齒輪精鍛成形，直壁分流孔胚料則在鍛壓行程 5.57mm 時完成圓柱齒輪精鍛，其後半行程最大等效應變主要發生在分流孔閉合處，因為實心胚料無分流孔，故後半行程以直壁分流孔胚料的最大等效應變較大。

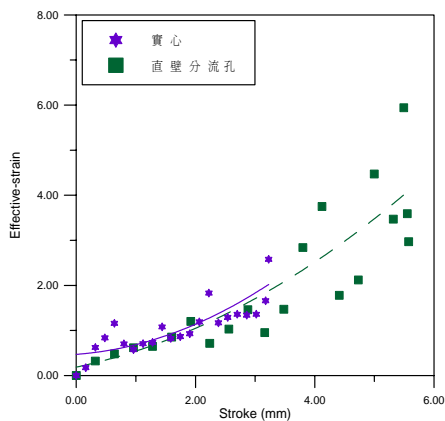
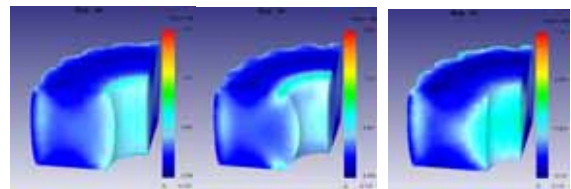


圖 11 實心與直壁分流孔胚料最大應變與位移圖

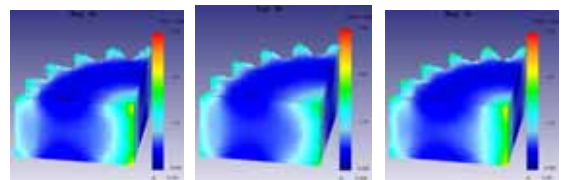
圖 12 及圖 13 分別為具各種分流孔胚料於鍛壓行程為 3.41mm 和 5.57mm 時之等效應變分佈圖，以高度方向來看，齒型成形處與分流孔閉合處之等效應變較大，且越接近上下兩端其應變也越大，材料最慢充填完成的位置，等效應變亦較大。

就直壁分流孔、凸壁分流孔、凹壁分流孔三種胚料而言，凸壁分流孔胚料其分流孔中段金屬流動緩和，因其分流孔形狀為外凸，在變形時中段金屬容易先接觸閉合，閉合後中段材料流動變緩和，故等效應變較小，凹壁分流孔胚料其分流孔中段金屬流動較為劇烈，因其分流孔形狀為內凹，在變形時中段金屬要先向外凸出後再閉合，故中段材料流動較為劇烈其應變亦較大，直壁分流孔胚料之中段金屬流動情況則介於兩者之間。

由圖 14 可知，凹壁分流孔胚料的最大等效應變上升較為劇烈，凸壁分流孔胚料則較緩和，而直壁分流孔胚料則介於兩者之間。



(A)直壁分流孔 (B)凸壁分流孔 (C)凹壁分流孔  
圖 12 不同分流孔胚料之鍛壓齒輪等效應變分佈 (鍛壓行程 3.41 時)



(A)直壁分流孔 (B)凸壁分流孔 (C)凹壁分流孔  
圖 13 不同分流孔胚料之鍛壓齒輪等效應變分佈 (鍛壓行程 5.57mm 時)

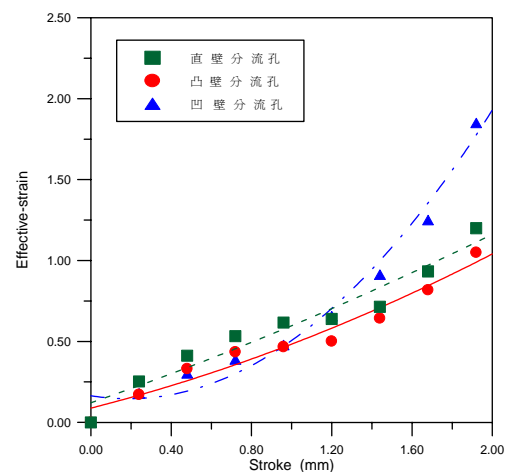
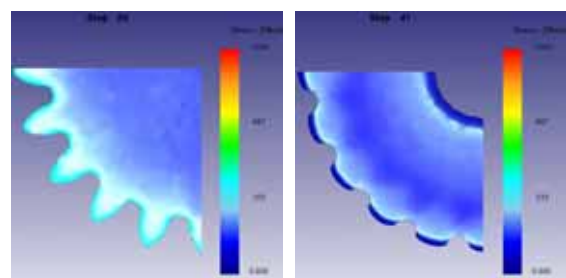


圖 14 具分流孔胚料最大等效應變與位移圖

### 3.4 等效應力分佈分析

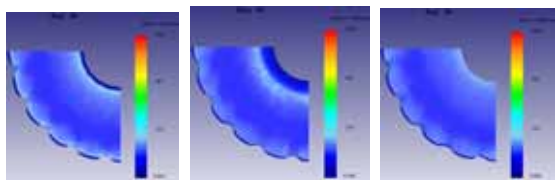
實心胚料直接往齒型模穴充填而無分流孔，故體積大於具分流孔胚料，其下壓行程遠小於直壁分流孔胚料，而最大應力集中在齒輪過渡圓角處，如圖 15 所示。



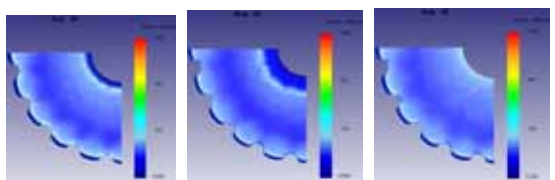
(A)實心胚料 (B)直壁分流孔胚料  
圖 15 實心與直壁分流孔胚料之鍛壓齒輪等效應力分佈比較(鍛壓行程 3.17mm 時)



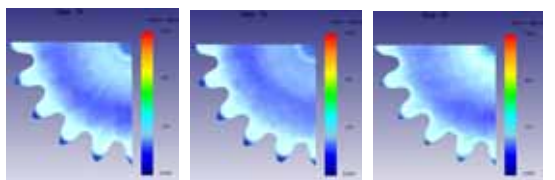
由圖 16 可觀察出直壁分流孔、凸壁分流孔、凹壁分流孔胚料在變化初期，以分流孔端緣等效應力較大，而隨著胚料變形逐漸充填齒形時如圖 17，則以齒形過渡圓角處的應力較大，由圖 18 可知當分流孔開始閉合時，齒形過渡圓角處應力亦會隨之增大。



(A)直壁分流孔 (B)凸壁分流孔 (C)凹壁分流孔  
圖 16 不同分流孔胚料之鍛壓齒輪等效應力分佈 (鍛壓行程 1.52mm 時)



(A)直壁分流孔 (B)凸壁分流孔 (C)凹壁分流孔  
圖 17 不同分流孔胚料之鍛壓齒輪等效應力分佈 (鍛壓行程 3.09mm 時)



(A)直壁分流孔 (B)凸壁分流孔 (C)凹壁分流孔  
圖 18 不同分流孔胚料之鍛壓齒輪等效應力分佈 (鍛壓行程 5.4mm 時)

由圖 19 可知三種具分流孔胚料的等效應力增加趨勢類似，在最後齒型完成、分流孔閉合時，直壁分流孔胚料等效應力最大，凸壁分流孔胚料次之，等效應力最小為凹壁分流孔胚料。

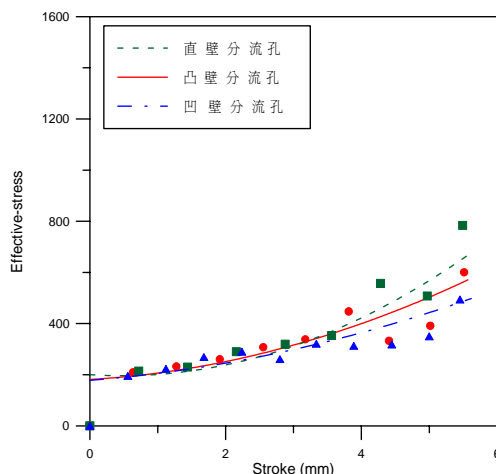


圖 19 具分流孔胚料應力與位移圖

## 肆、結論

本研究乃利用有限元素法對三種不同形狀的分流孔以及無分流孔的實心胚料進行模擬分析，以探討分流孔形狀對齒輪精鍛的影響。研究有如後之結論：

1、實心胚料與具分流孔胚料有相近負荷位移趨勢，但具分流孔胚料鍛壓負荷增壓較和緩，有益於模具壽命。三種不同形狀分流孔胚料，其所需鍛壓負荷差異性並不顯著。

2、凸壁分流孔胚料從中端開始往上下兩端處閉合，直壁分流孔胚料與凸壁分流孔胚料變化雷同，凹壁分流孔胚料分流孔閉合屬於全面性閉合，但若曲率過大時有產生摺料等缺陷之虞。

3、實心胚料的等效應變較具分流孔胚料高，凸壁分流孔胚料其分流孔中段金屬流動緩和，凹壁分流孔胚料其分流孔中段金屬流動則較為劇烈，直壁分流孔胚料則介於兩者之間。

4、齒輪精鍛時在齒形過渡圓角處的等效應力最大，而三種具分流孔胚料在變化初期，以分流孔端緣應力較大，當胚料變形充填齒形時，則以齒形過渡圓角處的應力較大，在最後齒型完成、分流孔閉合時，直壁分流孔胚料等效應力最大，凸壁分流孔胚料次之，凹壁分流孔胚料則最小。

總之，凸壁分流孔胚料略優於直壁分流孔胚料而凹壁分流孔胚料則較差，而具分流孔胚料比實心胚料更有利於齒輪精鍛成形，且有益於模具壽命提高。

## 伍、參考文獻

1. K. Kondo Ohga, Precision cold die of a ring gear by divided flow method, International Journal of Machine Tools and manufacturing, 35(8), 1995
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. 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, 第十卷, 第一期, 2003
10. 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
11. 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, 第十一卷, 第六期, 2004

# The Influence of Profiles of Divided-Flow Hole on Hot Precision Forging of the Cylindrical Spur Gear

Yuan-Chuan Hsu<sup>1</sup> Tung-Sheng Yang<sup>1</sup> Shang-HanYu<sup>2</sup>

Department of Mechanical Manufacturing Engineering  
National Formosa University<sup>1</sup>

Institute of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering  
National Formosa University<sup>2</sup>

## Abstract

Research related to precision forging of cylindrical spur gear is one of the important issues in metal forming studies. In this study, the three-dimensional rigid-plastic finite element simulation technique is used to analyze the closed-die hot forging processes for manufacturing cylindrical spur gear. The influence of various divided-flow holes on gear precision forging is explored. The study results revealed that the forming load needed at the billets with divided-flow holes is increased at a slower speed, and is more beneficial to gear precision forging than solid billets. The billet with convex divided-flow hole is the most beneficial to the gear precision forging, while the billet with straight hole comes second. The billet with concave hole ranks the last among the three different billets.

**Key Words:** cylindrical spur gear, divided-flow holes, finite element method