

# 汽車排檔用結合齒精密鍛件之複合鍛造製程開發研究

## The Study and Development of Hybrid Forging Process for Automobile Shifting Conjunction Precision Forging Gear

楊俊彬<sup>1</sup>、趙柏勳<sup>2</sup>

Jin-Bin Yang<sup>1</sup> Po-hsun Chao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>副教授、<sup>2</sup>研究生

<sup>1</sup> Associated Professor, <sup>2</sup> Graduate Student

精密鍛壓製程技術中心 國立高雄第一科技大學  
Precision Forming Process and Technology Center

National Kaohsiung First University of Science and Technology

通訊作者：[binbin@nkfust.edu.tw](mailto:binbin@nkfust.edu.tw)

**關鍵字：**結合齒，複合鍛造

### 摘要

結合齒主要用於汽車手排變速箱的傳動、換檔，一般每台變速箱中有4~6件，使換檔傳動產生不同之等級速度。其傳統製程為機械切削加工，因傳統製程加工時間較長且材料使用率較低，成本偏高。因此，為降低生產成本，利用熱間鍛造與冷間鍛造之複合鍛造製程就被開發出來。由於齒形是由鍛造而成，可大幅縮短加工時間與材料成本材料，此外，齒形流線為完整，其機械性質獲得提升。因此，複合鍛造製程為在結合齒之製造上最具有競爭力之技術。

故本研究開發結合齒複合鍛造(熱間鍛造+冷間鍛造)，首先利用CAE模擬分析軟體—DEFORM-3D來模擬材料在模穴成形時之材料流動之情形及負荷與應力，探討結合齒成形工程及模組結構設計之可行性，藉以尋找結合齒複合鍛造製程之最佳設計與成形參數。接著依模擬結果設計與製造模具，最後進行實際鍛造試驗。實驗材料使用AA6061鋁合金棒材，首先將棒材加熱至400°C進行熱鍛製程(包含預成形、完成鍛)，接著進行冷鍛(包含垂直冷整形、側向冷整形)，最後進行量測，以期建立製程參數。

結果顯示，本研究所開發之複合鍛造製程，即為熱間鍛造+冷間鍛造，前者為預成形、完成鍛，後者為垂直冷整形、側向冷整形，共四個道次成形做實際鍛造。經鍛造實驗所得之相關成形負荷與鍛件外觀皆與DEFORM模擬分析結果相當吻合，鍛件並無缺陷、鍛件尺寸符合圖面要求，顯示藉由DEFORM模擬分析最佳參數開發結合齒之複合鍛造製程為可行方式，而實際鍛造結果驗證本研究所設計之複合鍛造模組運作順暢且可成功地將目標載具鍛造成形。

**Keyword：** conjunction gear, hybrid forging

### Abstract

The conjunction gears are used for automobile transmission gear shift. Usually each gearbox has 4 to 6 pieces to produce different kinds of level. Because in the traditional process, machining time is long and more material is used, which make cost up. So the so-called hybrid forging process (hot forging and cold forging) were developed to make the final gear profile by direct forging. The mechanical properties of the gears were enhanced due to the integrity of the flow line and the cost was

down due to the processing machining time reduced and less materials used. Therefore, the hybrid forging process is the most competitive process in manufacturing this kind of gear.

The aim of this project is to develop the hybrid forging process of the conjunction gears. First, the CAE software, "DEFORM-3D", is not only used to analyze the stress and strain in the die but also the situation of material flow during forging to investigate the feasibility of hybrid forging process and the forging die design as well. Then, the optimum variables according to the results of CAE simulation are set up to design the actual die and are used to perform by the actual forging process. AA6061 aluminum alloy is used as the testing billet. The materials is first heated to around 400°C to do the hot forging, which forging process include performing and finishing, then followed by cold forging, which include vertical forging and lateral forging. Finally, the measuring for the gears were proceeded and the process variables were expected to be set up.

The results show that not only the forging load but also the stress distribution and product appearance in the actual forging conform to those in the DEFORM simulation. Therefore, it is feasible that using the DEFORM software simulates the forging process to find the optimum variables previously and then the design of the forging die is proceeded according to the optimum variables. The forging gears are no defects and which dimensions conform to the requirements of the drawing. It showed that the automobile shifting conjunction gear were developed successfully. The hybrid forging dies were operated smoothly in the actual forging process. So, the design of the hybrid forging die was feasible.

## 1、前言

隨著鍛造技術日益精進，精密鍛造技術已經漸漸取代傳統切削加工跟鑄造成形等，且在精度上也有較大之突破。在現今機械製造發展趨勢中，提高生產效率、產品品質、增加產品競爭力及降低生產成本等驅使下，鍛造加工將會取代愈來愈多之其他加工方式。

齒輪為最常用之機械元件，廣泛運用在機械之傳動裝置中，加工方式可大致分為滾齒刀切齒，成形砂輪研磨，搪研磨加工，輥軋加工，鍛造加工等。其中齒輪鍛造加工為最近快速崛起之加工方式，由於金屬模具設計和鍛造技術快速進步下，齒輪鍛造加工精度漸漸追上切削加工的精度，且加工時間及人事成本較為經濟，且成品機械性質較為優異與內部鍛流線完整，無切削加工所有之材料內部流線切斷導致疲勞性質劣化之現象，所以成品在使用上都有優越的表現。

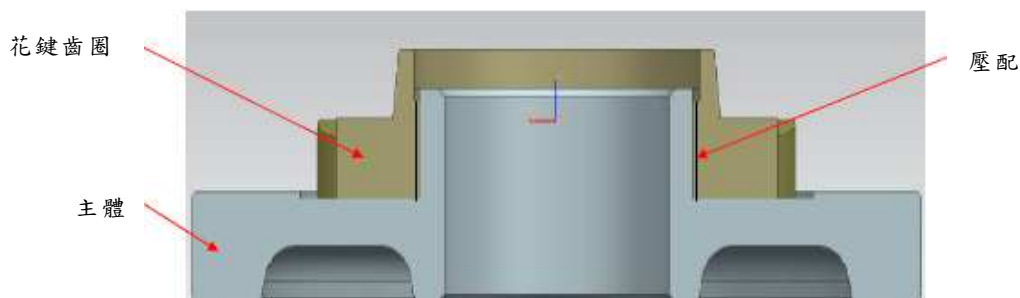
在本世紀汽車產量與生產技術快速發展下，全球汽車年產量已達 7000 萬輛以上，汽車零件之生產製造技術是值得關注。汽車零組件在傳統的切削加工技術和傳統的鍛造技術已難滿足市場需求，所以在零組件走向精密化、高效率、低成本下，精密鍛造已經成為現今不可或缺的生產方式。

結合齒是汽車變速箱中的重要傳動零部件如圖(1)所示，但由於結合齒外形較複雜、排檔用的齒形為倒錐齒，鍛造成形極為困難，不能用傳統的鍛造方式成形，基本上其主要製造方式有齒形之齒圈採機械加工方式，再與本體進行兩件式電子束銲接或壓配組合，少數使用一體式鍛造方式，前者如圖(2)與圖(3)所示。然而兩件式製程工序多，機加工成本高，產品性能差且壽命低，若是一體型鍛造方式則強度佳，效率高，製造成本低，由於一體型結合齒之齒形精密且有倒錐設計，在傳統鍛造之垂直方向成形方式無法將之成形，即使齒形可以成形也無法脫模，必須以特殊之複動化模具才可。因此現行之先進鍛造技術為採用熱間鍛造先將鍛胚主要形狀鍛

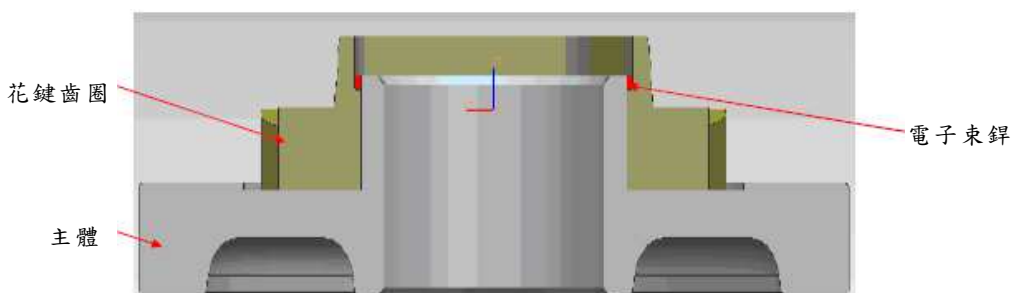
出，再以垂直冷間整形方式將齒形精鍛成形，接著再以側向成形鍛造方式將倒錐齒形鍛打出來，如此，除齒形可精鍛成形外，鍛件又可脫模。但此製程牽涉到複雜之模具設計技術與模具精密加工技術，技術門檻高，在國內尚無人開發。由於其具有競爭優勢，精鍛件市場須求量大，值得投入研發。



圖(1) 變速箱傳動齒輪箱內部圖與結合齒



圖(2) 花鍵齒圈與主體壓裝配合

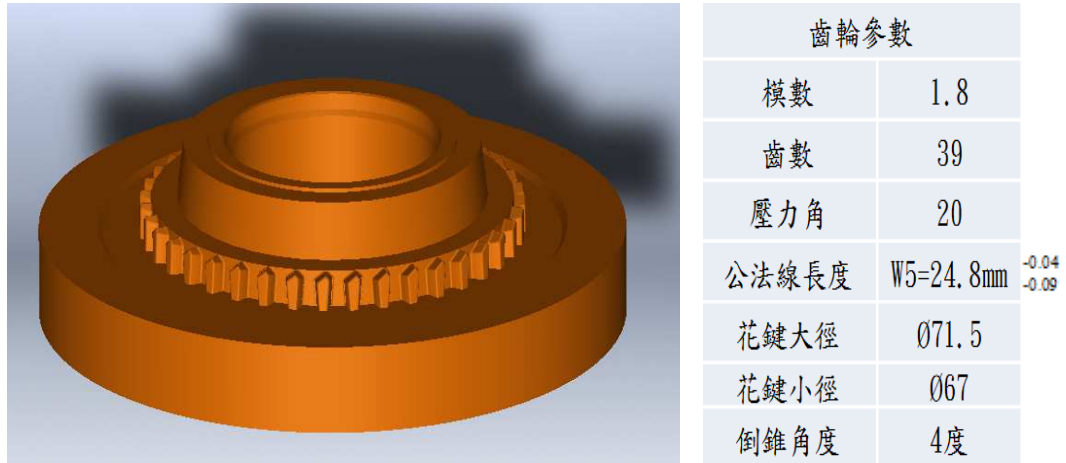


圖(3) 花鍵齒圈與主體電子束銲接組合

## 貳、研究目的

本研究即針對廠商所須之變速箱一體型結合齒開發精密鍛件進行精密鍛造製程研究與模具開發，即鍛造完成後齒形精度已達要求，不須再機械加工，以降低生產成本，鍛件如圖(4)所示。由於一體型結合齒之齒形精密且有倒錐設計，在傳統鍛造之垂直方向成形方式無法將之成形，即使齒形可以成形也無法脫模，因此現行之先進鍛造技術為採用熱間鍛造先將鍛胚主要形狀鍛出，再以垂直冷間整形方式將齒形精鍛成形，接著再以側向成形之鍛造方式將倒錐齒形鍛打出

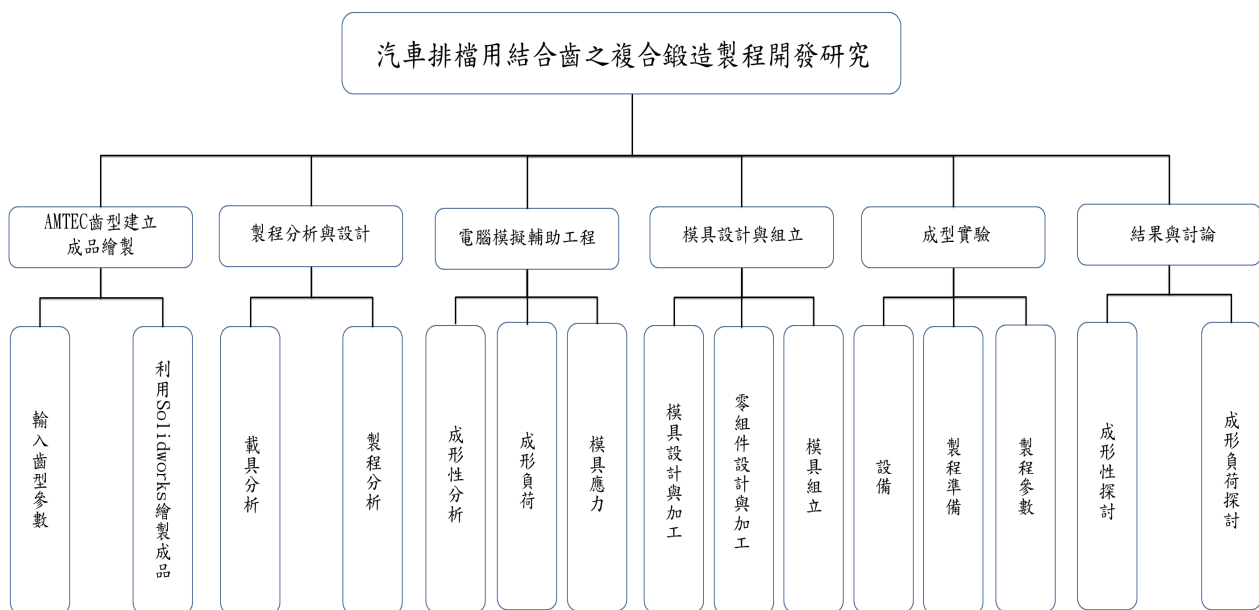
來，如此，除齒形可精鍛成形外，鍛件又可脫模。本研究即採用複合鍛造技術(即熱間鍛造+冷間垂直與徑向整形)，進行模具與精鍛件開發。首先利用 CAE 電腦輔助分析軟體進行結合齒成形過程模擬，探討結合齒複合鍛造之可行性與建立各模擬成形之參數，接著進行實體模具設計開發與小批量試鍛。期望以此研究架構能開發汽車排檔用結合齒之複合鍛造製程與建立模具設計技術，另一方面也探討量產之可行性。



圖(4) 結合齒鍛件(資料來源:重慶鑫贏)

### 參、研究方法

本研究採用複合鍛造鍛造技術(即熱間鍛造+冷間整形)，開發結合齒精密鍛件。由於本研究中心鍛機能力不足，無法鍛製鋼質鍛件，故材料選用軟質AA-6061鋁合金，進行鍛造製程開發與模具設計可行性之探討。在鍛造工程設計上分為兩段，前者為熱鍛製程，將AA6061鋁合金加熱至400°C，進行預成形與完成鍛，將齒胚成形出來，接著為冷精整製程，即為垂直冷整形、側向冷整形，將齒形精度與倒錐齒形冷整出來，總共須四個道次成形。首先利用CAE電腦輔助分析軟體進行結合齒成形過程，探討結合齒複合鍛造之可行性與各模擬成形之參數。並進行實體模具設計與量產測試。期望以此研究架構能達成汽車排檔用結合齒之複合鍛造製程開發研究，如圖(5)。



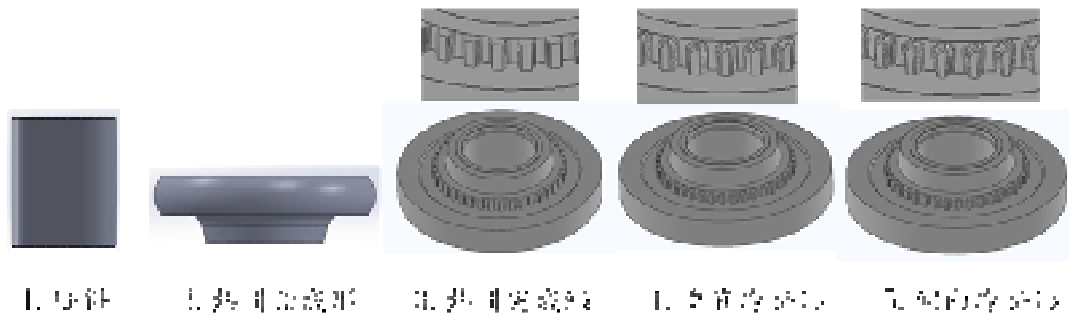
圖(5) 本計畫研究架構



## 肆、實驗結果與討論

### 1. 鍛造工程設計

本研究採用複合鍛造鍛造技術(即熱間鍛造+冷間整形)，開發結合齒精密鍛件。在鍛造工程設計上分為兩段，前者為熱鍛製程，為預成形與完成鍛，將齒胚成形出來，接著為冷精整製程，即為垂直冷整形、側向冷整形，將齒形精度與倒錐齒形冷整出來，總共須四個道次成形。各道次鍛胚設計如圖(6)所示。在熱間完成鍛先將大略齒形鍛出，接著在垂直冷整形時將齒頂角錐整形出來，最後再以側向整形將倒錐整形出來。



圖(6) 複合鍛造各道次鍛胚設計圖

### 2. CAE 模擬分析

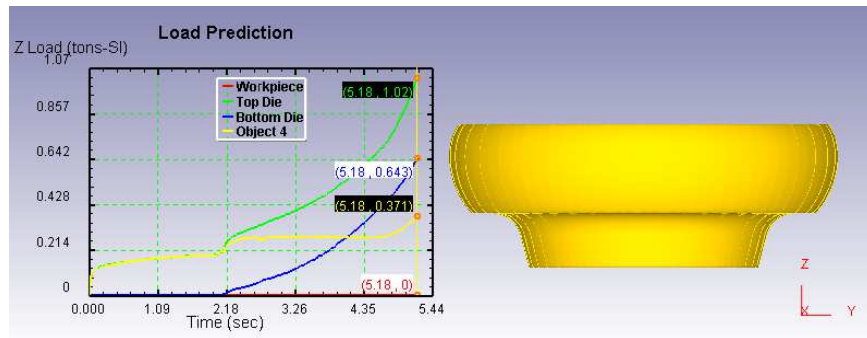
依上述之鍛胚設計進行鍛造成形模擬。本製程所使用之材料為AA6061鋁合金(機械性質如表一)，在不影響得到所需資訊情況下，對CAE分析過程做一些簡化的假設，以求在最短時間內得到足夠的分析資訊，各項模擬分析參數設定如(表二)，其熱鍛製程為400°C進行熱間鍛造，再以20°C進行冷間整形。探討在此複合鍛造製程下，觀察即熱、冷間鍛造其胚料成形性、成形負荷等情況，因齒形特徵較小與複雜，故將原胚料以1/39進行成形模擬。DEFORM軟體模擬結果如圖(7)(8)(9)(10)所示，熱間鍛造預成形與完成鍛鍛壓成形負荷約為39.8ton及296.8ton，冷間鍛造垂直冷整形與側向冷整形234.8ton與11.6ton。由材料流動情形分析，顯示沒有缺陷產生，為可行之設計。

表一、6061 鋁合金機械性質

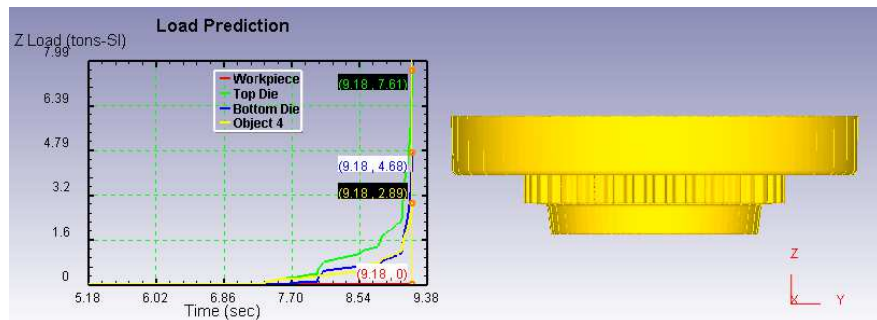
特性 合金	機械性質			
	拉伸強度 kgf/mm <sup>2</sup>	降伏強度 kgf/mm <sup>2</sup>	伸長率 %	硬度 BHN
6061	12.5	5.0	37	30

表二、CAE 模擬數據

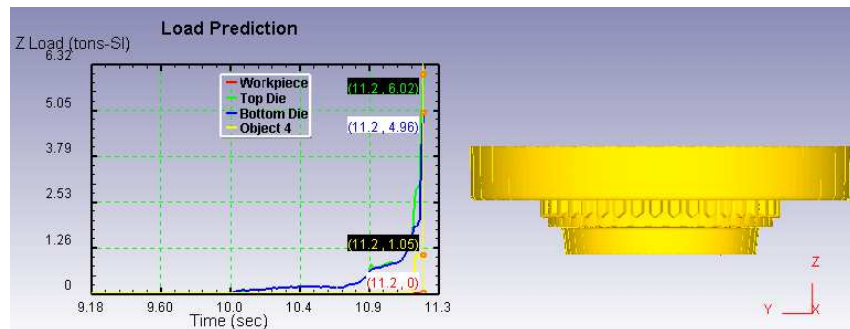
項目	模擬數據
分析解法	Sparse
鍛機作動速度	10mm/s
胚料與模具溫度	1. 胚料 400°C、模具 200°C 2. 胚料 20°C、模具 20°C
降伏準則 (Yield function)	畸變能理論 (Von Mises)
硬化法則 (Hardening rule)	等向性 (Isotropic)
定剪摩擦係數	1. 熱鍛 0.3 2. 冷鍛 0.12
熱傳導係數	5
網格數量	10 萬個



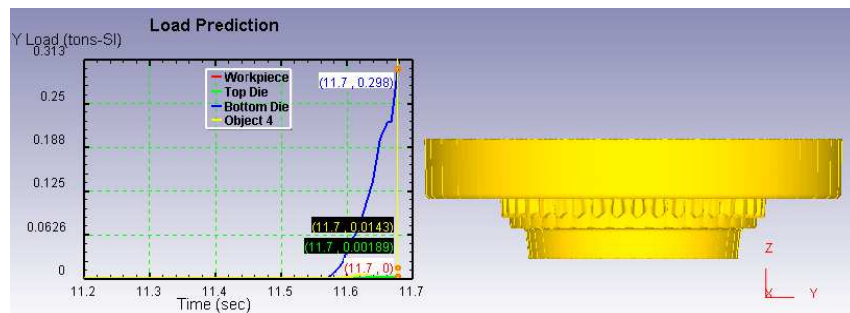
圖(7) 預成形道次模擬結果



圖(8) 完成鍛道次模擬結果



圖(9) 垂直冷整形道次模擬結果

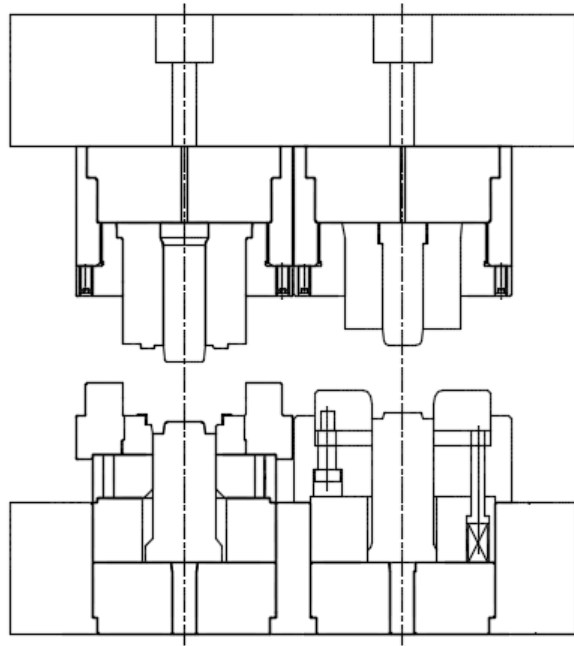


圖(10) 側向冷整形道次模擬結果

### 3. 模具與模架設計

#### 3.1. 結合齒熱間鍛造模具結構設計

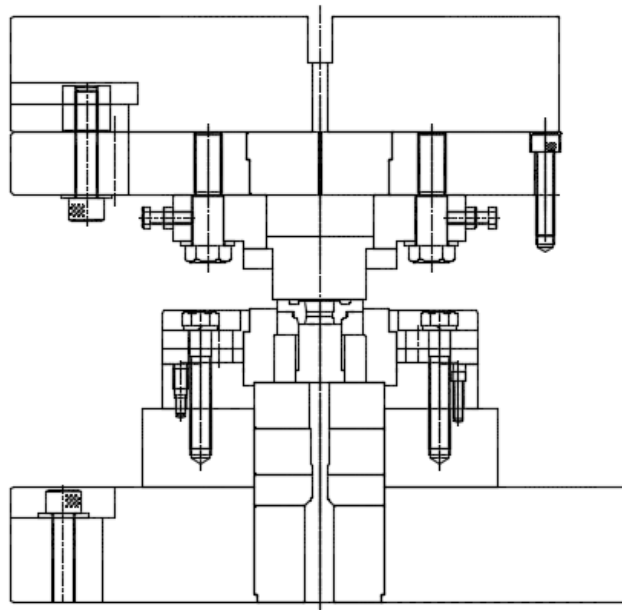
根據模擬結果進行預成形及完成鍛模具設計，模具是使用 KT-400ton 鍛壓機進行作業，預成形模具設計為開放式，完成鍛模具設計為密閉式，模具結構如圖(11)所示。



圖(11) 熱間模具結構示意圖(右為預成形，左為完成鍛)

### 3. 2. 結合齒冷間(垂直)鍛造模具結構設計

本道次垂直整形是為了達到齒輪頂部角錐與齒形精度而設計，垂直整形冷間鍛造模具結構示意圖如圖(12)。鍛造作業開始時，胚料置入，上模往下移動，將胚料往下擠壓，將熱鍛時所鍛出之齒形再做冷整形，將齒形精度與齒形角錐鍛壓成形。



圖(12) 冷間垂直整形模具結構示意圖

### 3. 3. 結合齒倒錐冷間(徑向)鍛造模具結構設計

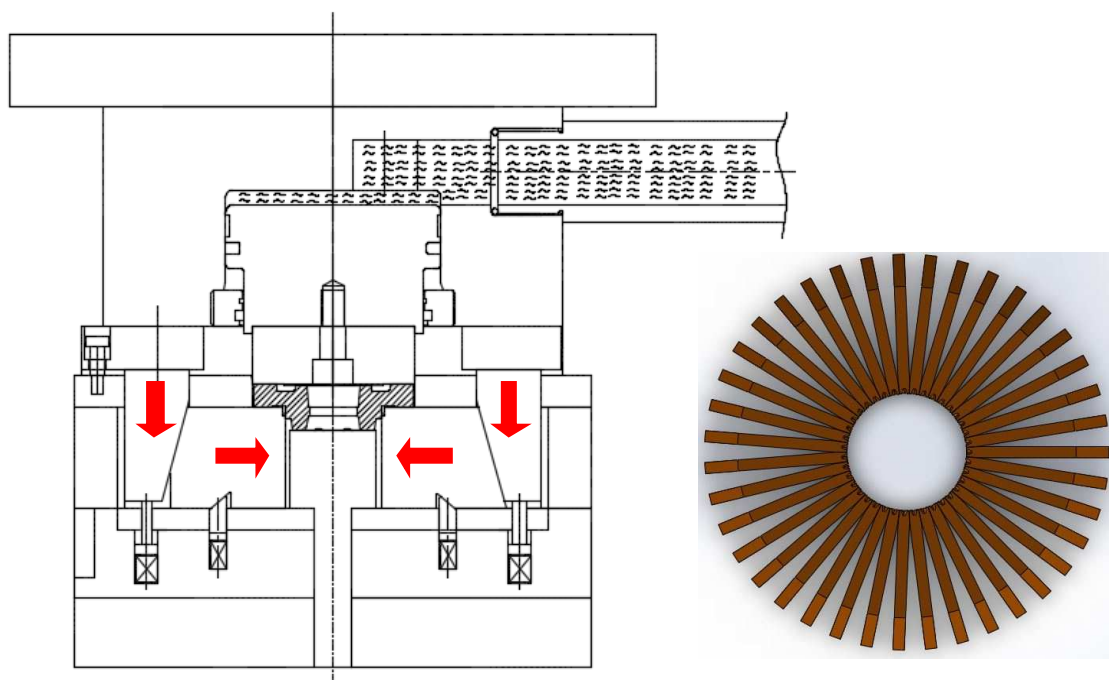
本道次側向冷整形是為了達到成形齒輪倒錐和使胚料成形後順利脫模而設計。此側向整形冷間鍛造模具在上模具有一 50ton 油壓缸，做為成形時持壓用，避免側向成形時鍛胚傾斜導致齒形與中心軸之垂質度產生偏差。在側向設計有 39 件齒形沖頭，環繞中心軸呈環形排列。作動時，工件放在組合模上，隨著壓機的運行上模逐漸往下移動，接著採油壓力將活塞與胚料接觸進行定位，使胚料齒形位置不會錯位，後油壓缸接觸壓板使壓桿推動側向沖頭使組合模開始沿著徑向運動，逐漸完成倒錐齒形之成形，倒錐齒形成形完成後，

上模回覆，在彈簧作用下，產生向上運動使側向沖頭組沿徑向向外運動復位，則側向沖頭脫離鍛胚，鍛件便可取出，模具結構示意圖如(13)所示。

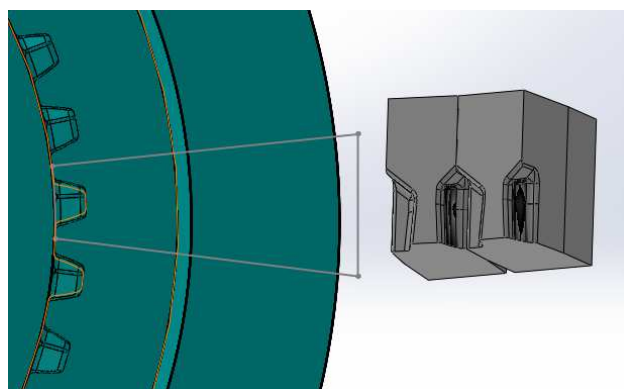
該模具結構最關鍵的是側向沖頭齒形倒錐模穴之設計，如圖(14)所示。此模具特點是因結合齒齒形複雜，故成形時以沖頭齒形模腔將直形之錐齒齒形之左右兩側材料，進行徑向擠壓，將兩側多餘的材料擠壓到齒形根部，形成倒錐齒形。

### 3.4 實際試模結果

模具結構設計完成並確認可行後，即製作模具。圖(15)為各道次之模具外觀圖。圖(16)，圖(17)為各道次實際試模之成品及小批量成品圖。表三為模擬分析與實際試模所得成形負荷比對，預成形成形負荷約為69.9ton，完成鍛成形成負荷約為300.1ton，垂直冷整形成形負荷約為237.4ton，側向冷整形成形負荷約為18.1ton，與模擬分析有所差異，經由實際鍛打，顯示鍛件成形時，材料流動情形與模擬結果相符；但在成形負荷部分，除了實際鍛打時圓棒由加熱爐中取出接觸空氣且預成形模具設計為開放式故有些外在因素產生誤差，其餘道次誤差不大約 $\pm 10$ ton。



圖(13) 側向(徑向)冷間整形鍛造模具結構



圖(14) 側向沖頭倒錐齒形模穴

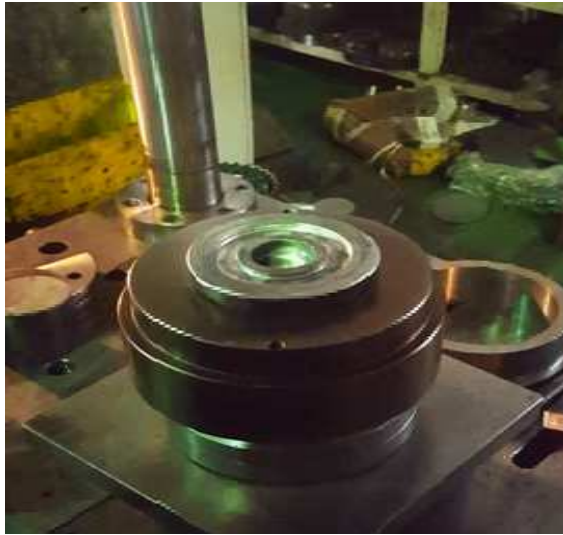




(a)預成形模具外觀



(b)完成鍛模具外觀



(c)垂直冷整形模具外觀



(d)側向冷整形模具外觀

圖(15) 各道次模具外觀圖



下料      熱鍛預成形      熱鍛完成離      齒形冷間垂直整形      齒形冷間側向整形      倒錐齒形

圖(16) 各道次實際試模之成品與完成後倒錐齒形



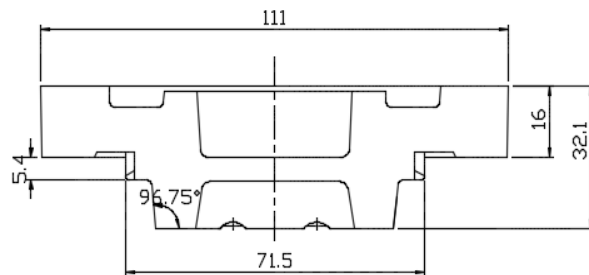
圖(17) 小批量成品圖

表三、各道次鍛造成形負荷比較

	鍛造溫度 (°C)	成形負荷 (ton)	
		模擬	實際試模
預成形	400	39.8	69~71
完成鍛	400	296.8	285~312
垂直整形	20	234.8	230~245
側向整形	20	11.6	16~21(含油壓力 8ton)

### 3.5 鍛造量產測試與尺寸檢驗

經小批量測試，量測各尺寸均符合設計尺寸如圖(18)所示，檢驗成品之外觀，除了少許毛邊外，鍛件表面無太大缺陷。而本鍛件之關鍵尺寸為跨5齒之公法線長度要求，其跨齒距要求為 $24.8_{-0.09}^{-0.04}$  mm，使用盤式分厘卡檢測10pcs結合齒跨齒距之值，鍛件尺寸39齒皆達到要求。10pcs結合齒跨齒距量測平均值如表四所示。



未標示公差者採用 $\pm 0.10$ mm公差

圖(18) 鍛胚設計主要尺寸圖

表四、跨齒距( $24.8_{-0.09}^{-0.04}$  mm)量測平均值

編號	跨齒距(5齒)	編號	跨齒距(5齒)
1	24.73	6	24.75
2	24.72	7	24.73
3	24.73	8	24.74
4	24.75	9	24.74
5	24.73	10	24.74

#### 4. 後續研發工作

由於本研究中心鍛機能力不足，無法鍛製鋼質鍛件，將來若應用到鋼質材料需討論鋼質材料流塑應力、材料溫度、材料縮水率及摩擦係數等因子，則須修改原鋁合金材質用之模具尺寸及鍛機的選用。

#### 伍、結論

- (1) 本研究所開發之複合鍛造製程，即為熱間鍛造+冷間鍛造，前者為預成形、完成鍛，後者為垂直冷整形、側向冷整形，共四個道次。經由 DEFORM-3D 模擬結果顯示材料流動合理。經鍛造實驗所得之鍛件並無缺陷，顯示此一製程設計與鍛造工程設計為可行。
- (2) DEFORM-3D 模擬結果顯示之負荷，預成形約 39.8ton、完成鍛約 296.8ton、垂直冷整形約 234.8ton、側向冷整形約 11.6ton，而實際鍛打之成形負荷預成形約 69.9ton、完成鍛約 300.1ton、垂直冷整形約 237.4ton、側向冷整形約 18.1ton，由數據顯示除預成形負荷差距誤差值為 30ton 及側向冷整形因實際鍛打時上模具約有 8ton 油壓力負荷差距外，其餘差距在 7ton 以內。
- (3) 經小批量量產測試，本研究之複合鍛造製程所開發之鍛件尺寸符合圖面要求，鍛件尺寸穩定，所開發之模具運作順暢，顯示此設計鍛造製程參數與模具設計為理想可行。

#### 陸、參考文獻

1. 張猛，論鍛造技術之發展，鍛造，第十卷，第二期，P19-23，中華民國鍛造協會，2001。
2. <http://finance.sina.com.cn/stock/t/20140611/171219381690.shtml>
3. 王如鈺、王雲峰，2003，齒輪原理概要，憬藝企業有限公司出版。
4. 財團法人工業技術研究院著作，2008，精密齒輪傳動系統設計、製造與應用，工研院機械所出版。
5. 賴耿陽 譯著，1989，齒輪加工技術，復漢出版社。
6. 鄭炳國等，1991，赴英國伯明罕大學研習齒輪鍛造技術訓練報告，金屬工業研究發展中心。
7. 蔡盛祺等，1997，鍛造技術手冊—複合鍛造製程設計與應用資料，金屬工業研究中心。
8. 林文樹等，1993，溫間鍛造製程研究，金屬工業研究中心。
9. 周金龍，林文樹，鍛造模擬解析技術應用實例，機械月刊，第十八卷，第十二期，

P159-168，越吟出版社，1992。

10. 王凱宏，2000，精密鍛造技術手冊-鍛造製程電腦模擬技術之應用，金屬工業研究中心。
11. ReverseEngineering, <http://www.paravoix.com/rpcenter>
12. 楊東昇，正齒輪鍛造之有限元素分析，中國機械工程學刊，第二十六卷第五期，第553-557頁，94年。
13. Richard Douglas, 2000, Guidelines for precision hot forging with application, Journal of Materials processing Technology98, p182-188
14. 張馳等，2014，汽車變速器結合齒溫鍛-冷整形複合精鍛工藝及模具研究，重慶理工大學(材料科學與工程學院)。
15. T.A Dean, 2000, The net-shape forming of gears, Materials and Design21, p271-278.
16. 曾德濤，2014，汽車結合齒冷鍛數值模擬與工藝研究，重慶大學(材料加工工程)。
17. P.A.F. Martins, 2001, Cold forging of gears experimental and the oretical investigation, Finite Element in Analysis and Design, 549-588.