

10. 鍛打螺釘頭十字槽用沖頭之擠鍛成形製程分析與改善

許源泉 副教授、林恆勝、彭御芳
國立虎尾科技大學 機械與電腦輔助工程系/
創意工程與精密科技研究所

摘要

針對大部份螺釘沖針製造廠所產之十字沖頭，在沖製螺釘頭之十字槽時，沖頭尖端易造成過早破損斷裂的問題點進行分析改善。因此本計劃結合幾何模型、有限元素分析軟體及製程最佳化方法，對十字沖頭擠鍛進行擠鍛成形特性研究，與擠鍛製程改善，以及參數最佳化的完整分析，從一開始的傳統十字沖頭擠鍛的基礎特性、胚料預成形設計的至後來製程參數的最佳化的設計，並透過商用軟體DEFORM的分析功能，進行十字沖頭擠鍛成形的參數最佳化，而後與實驗進行比對。從十字沖頭擠鍛製程參數對鍛件之應變、鍛流線與微組織結構的影響，進行製程參數的最佳化設計；期望將傳統的十字沖基礎擠鍛製程，以作最小的製程變化，改善擠鍛十字沖頭的產品品質，進而獲取最大的生產效益。本計劃以改善沖針製造廠所生產之十字沖頭使用壽命為主，可由生產的擠鍛製程作改善並最佳化的工程，提供參與工作人員擠鍛技術的研究基礎與經驗，對於國內相關產業有技術提升的有極大的參考價值。

1. 前言

隨處可見的螺釘雖然不起眼卻是不可或缺的重要元件，具有強而有效的連接功能；在傢俱、汽機車、機械與醫療上都可見到螺絲的運用；但在美麗流線的產品外觀要求下，螺絲潛藏其中，我們很難從產品外觀中看到螺絲的存在，但一旦抽離螺絲後，這些產品將會瓦解至不可使用的狀態。

我國螺絲螺帽產業（簡稱扣件業）在1967年以前屬萌芽階段，當時以拆船鐵板沖壓螺帽，以拆船板抽成線材為螺絲原料，隨著螺絲產業周邊與原料的供應漸趨完善，自動化生產與品質管制度的逐步成熟，使我國螺絲外銷世界140餘國，甚至在2004與2005年出口值皆位於首位，成為世界主要螺絲供應國。然而，生產技術成熟、生產設備投資金額不大，對有意進入產業的業者而言，進入障礙不大，而主要面臨的障礙在於既有廠商已建立之品牌信譽。

國內螺絲螺帽產業以中小企業為主，截至2005年為止，共計有1249家，從業人數約22000人；工廠分佈地區以南部的高雄縣市與台南縣市的比例最高，達40%；員工人數分佈在20人以內者有969家，比例高達77%；資本額在新台幣4000萬以下者約有920家，佔總廠家數的七成。我國螺絲螺帽產業發展約自1945年開始，發展歷程共分6個階段整理，如表1。

表1 我國螺絲螺帽產業發展歷程

| 年代 | 生產投入 | 產品/市場 | 產業狀況 |
|-------------------|----------------------------|-----------------|--------------------|
| 1945-1967年 萌芽期 | 原料及設備均自日本進口 | 技術層次低、產品種類少、品質差 | 建立大量生產雛形 |
| 1968-1978年 成長期 | 自行研發螺絲螺帽成形機、開發各種材質的螺絲螺帽 | 開發出高品質不鏽鋼螺絲螺帽 | 進入大量生產階段 |
| 1979-1983年 茁壯期 | 中鋼開始供料、持續研發高速、高品質、低價成形機 | 品質交期穩定 | 上下游產業群聚，進入起飛期 |
| 1984-1987年 成熟期 | 中鋼供應各種符合國際標準之碳鋼線材，自動化設備研發 | 低單價、高品質交期準確 | 1984起取得螺絲王國美譽 |
| 1988-1994年 南進期 | 螺絲螺帽工廠大量設立，建立螺絲自動化生產與品質管制度 | 著眼歐盟市場 | 投資馬、泰、菲，提昇跨國經營能力 |
| 1995年~ 西進期 | 國內土地、勞力、環境成本高漲 | 著眼大陸低製造成本及發展潛力 | 機器、模具、熱處理、電鍍等週邊赴投資 |

隨著全球景氣自2002年回升後，我國螺絲螺帽產值便不斷創下新高，2002年產值首度超過650億新台幣，2004年產值更已達918億新台幣，自2001至2004年產值複合年成長率(CAGR)達14.9%。在產量方面，國內扣件產量最高點是在2000年，當年產量為166萬公噸，從量、值關係來看，2000年產值僅648億新台幣，2004年產量為165萬公噸，但產值已達918億新台幣，加上出口平均單價的提升，顯見國內產業近年來在提昇產品附加價值上的努力，詳見圖1。

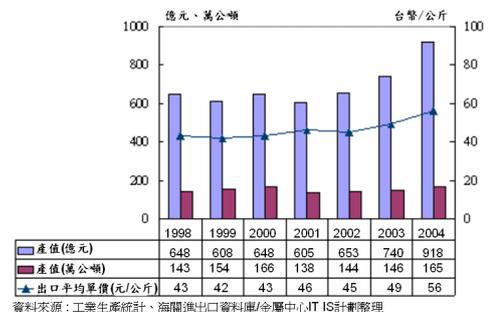


圖1 我國螺絲螺帽1998~2004年之產值、產量狀況

由以上ITIS所提供的資料，可以發現國內螺絲螺帽的產業扮演著極為重要之角色，甚至曾因產量曾佔全世界的百分之三十，而贏得「螺絲螺帽王國」的美譽；但在近年來，大陸低成本競爭下，面對大陸扣件產品競爭有「技術研發不足」、「產品同質性高」、「出口市場集中美國」等問題；因此，國內螺絲螺帽產業必得另尋出路，已不再適合去生產一般規格品，應以日本產品品質為目標，轉型朝生產特殊品、專利品、汽車等高附加價值產品發展，並成立研發聯盟，增加國內研發高品質產品的能力，適當導入學術的應用，包括品質最佳化工程與製程分析等，以鞏固國內生產技術，並提昇國際競爭力。

螺絲起子約1780年左右誕生於倫敦，木匠們發現用螺絲起子旋緊螺釘比用榔頭敲擊還能夠把東西固定得更好，尤其細紋螺絲釘效果更佳。雖只是一個小小的緊固件，螺絲釘卻一直無停歇的演進，直到1774年才發明了螺絲起子。1936年，亨利 飛利浦發明了十字螺絲和十字螺絲起子，與傳統的一字槽釘頭螺釘不同的是十字槽釘頭螺釘的十字槽釘頭的邊緣，這種設計使螺絲起子自動居中，不易滑脫，且擁有較強的抗變形能力，因而深受歡迎，後來亨利 飛利浦為十字槽釘頭的螺絲釘申請了專利，這也標示著螺絲釘根據技術有了重大的進展，故十字螺絲和十字螺絲起子也被稱為飛利浦螺絲(Phillips screws)和飛利浦螺絲起子(Philips screwdriver)，如圖2所示。



圖2 十字螺絲與十字螺絲起子

用於鎖緊螺絲的螺釘頭凹槽型式主要有一字（負號）和十字（正號）兩種；除此之外，也有四角、六角、梅花與米字等多種型式，用於沖製螺釘頭型槽之模具稱為螺釘沖頭(又稱沖針)，如圖3所示；不同之螺釘凹槽型式各有其特性，且各有相匹配之幾何形狀沖頭進行沖製，而螺釘沖頭的優劣更是影響螺釘頭凹槽品質的主要因素，專用於沖製十字螺絲釘的沖頭即為十字沖頭(Phillips Punch)，因精密度的要求，一般以冷間擠鍛進行生產。



圖3 螺絲沖頭

傳統十字沖頭擠鍛製程係以車錐形之預成形，以單道次多沖程的方式利用油壓冷鍛機擠壓成形，如圖4所示；當中車錐形製程參數是以製造廠之生產經驗所設計，此法除了在車錐形製程上增加生產與廢料等成本，預成形亦可能影響擠鍛製程中，產生的內部缺陷；十字沖頭用於沖製螺釘頭十字凹槽，對於衝擊性與強度等機械性質的要求相當高，若十字沖頭內部的缺陷產生裂紋而導致過早破損，嚴重的降低模具的使用壽命，除了造成製造廠所生產之產品品質外，也將影響下游廠家沖製螺釘頭凹槽的成本與廢品的增加；故如何提升此鍛件品

質，已是迫在眉睫的問題，這也是沖針製造廠欲積極尋求解決的關鍵技術。

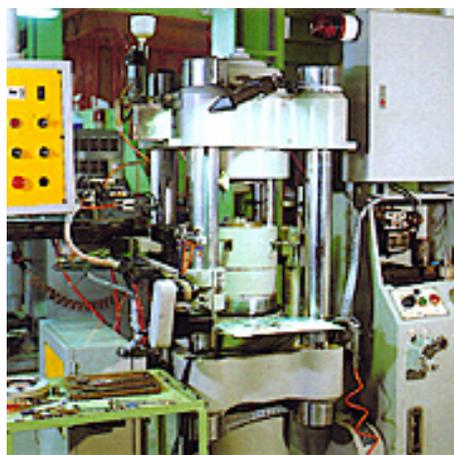


圖4 用於擠鍛十字沖頭之油壓冷鍛機

模具在使用過程中，產生的破壞型式包含磨耗、熱龜裂、機械性破裂與塑性變形等，模具依不同的作業條件如加載方式、應力大小與加工材料的差異而有所不同。冷鍛模具輕載荷型(磨損、啃傷等)，重載荷型(脆斷、疲勞破裂、塑性變形等)，強磨耗型(磨損、熔熱等)[1]。而本文所探討之十字沖頭用於沖打螺釘頭十字槽時，最常發生的損壞形式為破損(左)與磨損(右)，如圖5所示，為十字沖頭常見之損壞形式。



圖5 十字沖頭常見之損壞形式

螺釘頭十字形凹槽係利用十字沖頭以沖鍛成形方式進行沖製，如圖6，而傳統的十字沖頭的冷擠鍛係利用，如圖7(a)所示。十字錐形母模以擠壓的方式，使得錐形預製胚，受到凹模的擠壓，使得材料一部份往模穴處擠壓充填成十字錐形，一部份則形成鍛粗，如圖7(b)所示。然而在以沖打生產十字沖頭沖螺釘頭十字槽時，十字沖頭尖端處易過早發生破損、斷裂，而增加製程成本的消耗。因此，探討十字沖頭的擠鍛製程以尋求沖頭壽命的提升有其重要性。

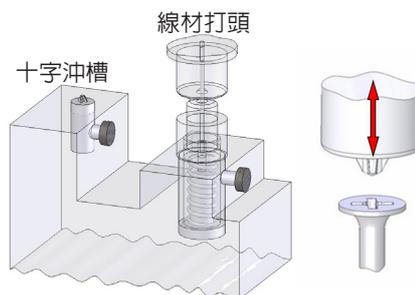


圖6 螺釘十字形槽沖鍛成形



圖7 十字沖頭擠鍛之(a)母模(b)預製胚與鍛件

擠鍛在鍛造工業有著相當的重要性，因此有許多擠鍛的相關研究陸續被提出，但歸納言之，就分析對象主要有不同之胚料材質與外形、摩擦條件與係數、模具幾何外形等，就探究方向有變形負荷與能量、充模及變形外形、成形性等變形行為或流動模式，而就研究方法而言，常見的有上界限、有限元素等數值分析與模擬、物理模擬及實驗等[2-12]。譬如，Maccarini等人[2]利用有限元素法及實驗來探討擠鍛與反向擠伸之外力及模具/工件介面摩擦問題。Rao 等人[3]使用有限元素法及物理模擬等方式，來分析錐孔狀上模與平下模在尖釘鍛造時，其網格扭曲、應變分佈等，以瞭解其胚料流動行為。Maccarini 等人[4]亦是藉助有限元素法來探討鋼在冷擠鍛時，模具幾何形狀對充模問題的影響。Hu及Hashmi[5]利用有限元素法及實驗來探討鉛之矩形胚料在擠鍛時的外形變化及負荷，以研討金屬之流動行為。Giardini等人[6]以有限元素法來探討不同模具形狀、摩擦條件對材料流動及延性破裂標準的影響，以求得擠鍛的成形性，以利於模具設計。

沖頭失效及壽命等相關研究亦有些論文提出探討，譬如張桓等人[7]針對某批十字沖頭，上線生產後使用壽命為正常件之1/4~1/3即產生裂紋之鍛件樣品進行硬度量測、金相觀察、鍍層檢測及鍛流線檢測，結果發現異常件之硬度與基地組織與正常件並無明顯異常，而由鍛流線的檢測發現十字沖頭肋部鍛件與正常件不同，與碳化物集束組織呈紊亂不連續情形，易引起橫向裂痕。王建中[8]對冷鍛沖頭破損分析在沖頭的結構、材料選擇及熱處理製程方面進行試驗研究，結果顯示冷鍛沖頭在鍛擠過程中，螺紋冷鍛沖頭結構不合理，經改善結構設計後，使得沖頭壽命明顯提高。徐金富等人[9]在內六角使用條件及破損形式下分析的基礎上，提出了模具材料最佳化、熱處理及表面處理等技術措施，研製出高性能且較為經濟之六角沖頭。由上可知大部份的論述皆從材料及熱處理方面分析，涉及十字沖頭擠鍛塑性成形的分析則鮮少。所以經由瞭解擠鍛製程中胚料特性、製程設計，以獲知十字沖頭冷擠鍛成形狀態、胚料設計與製程改善等方向以提高沖頭壽命，是值得探討的課題。

最簡單的擠鍛是利用圓孔形上模對平板狀下模進行下壓運動時，模具間的胚料會往上模孔口及側向間隙流動。如圖8所示。換言之，擠鍛進行時，接近胚料外徑部位的材料會往徑向外側流動，而靠近中心頂部的材料則往上模孔口擠出，亦即圓柱狀胚料同時產生逆向擠壓與側向展寬之鍛粗[12]。通常擠鍛變形可分成三階段：(1)胚料因剪力作用而產生之變形使中心凸出之高度比原始高度小，(2)中心凸出之高度維持不變不隨側邊突緣變形而產生變化，(3)出現真正擠伸製程而致胚料流出孔口時高度即增大[2,11]。

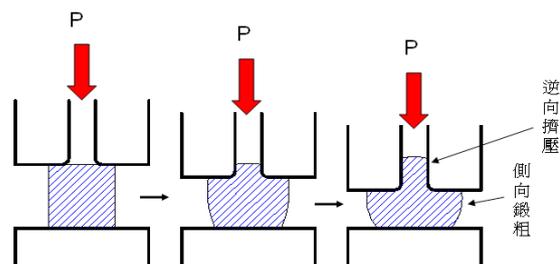


圖8擠鍛原理示意圖

擠鍛之流動變形模式不但影響鍛件品質，也會影響模具磨耗及其壽命。材料流動變形主要的影響因素有：上模孔徑、模具形狀、胚料材質、胚料高度/直徑比、胚料與模具介面摩擦等[12]。

在實務經驗上，十字沖頭的冷鍛製程上，其模具作動方式分為兩種，一為下模退出，置入胚料，再以油壓同時驅動下模與頂桿以單道次多次行程進行反覆擠壓，每次沖打量約為1mm，待成形後下模退出，胚料由頂桿頂出；二為由下模退出，置入胚料，而後下模先行移置母模下方定位，再以油壓驅動頂桿以進行擠壓，待成形後下模退出，胚料由頂桿頂出[14]。其下模由模仁與壓力環組成，模仁材質為鎢鋼，壓力環為AISI-D2冷鍛工具鋼，頂桿、母模為AISI-M2高速鋼材質，擠鍛時，母模必須有大量的潤滑，故有通氣孔的設計，以助潤滑液流通，且端面與十字錐模穴皆有TiN鍍層，而胚料為AISI-M42退火處理過之原材。本文所使用之作動方式為第一種，油壓同時驅動下模與頂桿進行擠壓。擠壓之鍛件必需經過唇部、外徑及底部修整，修整量約為2.6%。

2. 研究目的

國內的製造業在國際間有著舉足輕重的地位，近年來，受國際競爭激烈的情況下，製造技術的提升已成為大家關切的課題，其中模具技術的水準，更是決定了該國製造業競爭力的強弱；冷鍛模具在鍛打期間受到極大的負載，模具容易受高應力而造成疲勞裂紋、破裂與磨耗，最後嚴重影響模具使用壽命；模具的提早破損將嚴重影響生產線停擺、產品品質、產量與生產成本，甚至對於廠家產品信譽造成不良的影響；因此，如何提高模具使用壽命已是許多模具業者極欲尋求的關鍵技術。

傳統十字沖頭擠鍛製程係以車錐形之預成形，因需充分的潤滑，與成形力之考量，故利用單道次多沖程的方式擠壓成形，以利於充分潤滑；當中車錐形製程參數是以製造廠之生產經驗所設計，此法除了在車錐形製程上增加生產與廢料等成本，預成形亦可能影響擠鍛製程中，產生的內部缺陷；十字沖頭用於沖製螺釘頭十字凹槽，對於沖擊性與強度等機械性質的要求相當高，若十字沖頭內部的缺陷產生裂紋而導致過早破損，嚴重的降低模具的使用壽命，除了造成製造廠所生產之產品品質外，也將影響下游廠家沖製螺釘頭凹槽的成本與廢品的增加；故本計劃擬定亦將在此製程上進行改善分析，以期獲得較為明顯的產品品質改善。

另外，十字沖頭在進行冷擠鍛時，因製程參數控制不佳，易造成成形力過大或充填不足，產生模具應力增大與不良品增加等影響，致使生產成本增加與生產效率降低。現今實際生產上，製程參數皆由技術人員憑藉個人經驗或不斷試誤而得最佳製程參數，這將耗費許多時間及成本，所建立之資料亦不盡詳。對於螺絲沖頭擠鍛之相關研究鮮少，而如何提高製程開發效率及降低生產成本，一直是鍛造工業極為關切的課題。

隨著工業的迅速發展下，螺釘這類型的元件需求也逐漸增高，對品質、強度的要求也有增高的趨勢，再加上國際競爭的衝擊；因此，奠定台灣螺絲螺帽王國的基業，提升國內生產螺絲螺帽的技術已是絕對必要的投入。其中生產螺絲螺帽的模具產業被稱為機械工業之母，模具開發的優劣直接影響到加工件的品質，因此提高模具的開發技術是提昇整個螺絲螺帽生產技術的根本；若能掌控優異的螺絲螺帽模具生產技術，必可主導螺絲螺帽產業的發展；相信對於此相關研究計劃執行的一小步，將是國內螺絲螺帽業轉型的發展邁向國際新新開始的一大躍進。

3.研究方法

本研究乃利用三維剛塑性有限元素數值模擬技術進行十字沖頭冷擠鍛成形分析，期望以傳統的十字沖擠鍛製程為基礎，瞭解其在十字沖頭擠鍛中，金屬之成形狀態、應變與鍛流線的分佈狀態，並對其不同胚料與製程

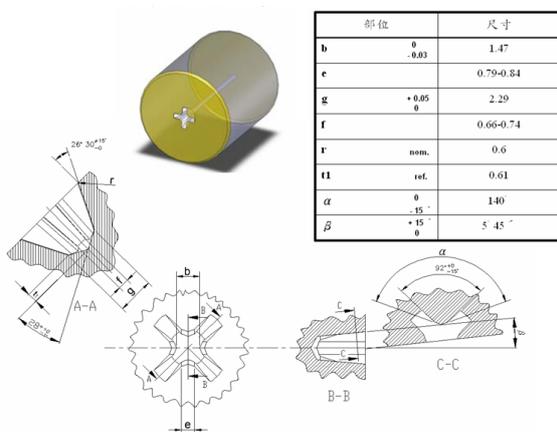


圖9 十字模外形及十字螺釘凹槽各部要求之尺寸

在金屬塑性成形的製程中，以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：[15]

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

其中s 是等效應力，e 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

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

其中k 是penalty常數，ε_v 是體積應變率。

目前事業上，DEFORM可說是最廣為使用的鍛造製程模擬分析專用軟體，尤其在歐美及日本等工業發達國家，已有相當多廠家導入此模擬分析技術。因此，本研究乃使用SolidWorks建構出十字沖頭實體模型，並應用DEFORM-3D進行擠鍛的塑性成形模擬分析。

因考慮到對稱性，為清楚、精細並節省模擬計算時間，本模擬只取四分之一進行模擬。圖10為十字沖頭傳統製程預製胚尺寸及模具配置。有限元素模擬乃設定頂桿速度為1mm/s，工件與模具介面間的定剪摩擦因子為0.2，胚料為錐形之預製胚，材料為AISI-M42高速鋼，材料性質及摩擦因子皆經由壓縮試驗而得，母模通氣孔為Φ1.2mm，網格劃分為50000並集中建立於工件尖端十字錐型成形處，以減少其誤差量，且將模具設為剛體，胚料設為塑性體。

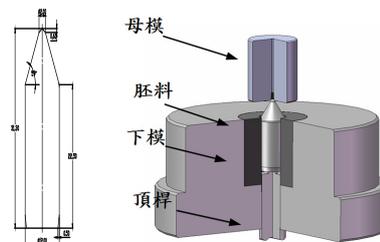


圖10 十字沖頭傳統製程預製胚尺寸及模具配置

在十字沖針冷擠鍛的實務經驗上，各製程參數皆可能影響擠鍛的成行負荷與鍛件的充填品質，包含胚料預成形角度、潤滑條件、母模圓角、頂桿形狀和冷鍛速度等。本文以有限元素法結合田口方法進行最佳化分析。實際生產，希望成形力越小越好，充填品質越佳越好，此分析設計配合L9(34)直交表選擇四個影響成形力與充填品質的製程參數，並分為3個水準，如表2所示。A因子為定剪摩擦因子，在擠鍛過程中，模具材質的不同，其介面的摩擦條件亦不同，在本文此將定剪摩擦係數皆假設為相同，以0.2為準，每間距差0.1。B因子為預成形錐度，實際生產使用α約60°，水準每間距差70°。C因子為母模R角，水準每間距差0.2mm。D因子為頂桿凸出形狀，以球面高度為定義球形2高度為1.2mm，水準每間距差0.6mm，固定體積，適宜調整寬度W，如圖11所示。在擠鍛生產過程中，雖母模凹槽設計留有預修量，但為品質要求，仍期望鍛件可充填飽滿，十字沖頭之擠鍛品質會有充填飽滿、過通氣孔與充填不足等三種現象，本文將充填品質Q依充填之通氣孔位置到唇部距離分為5個等級，如圖12為充填品質分級圖。故本文所使用之品質特性為望小特性，其S/N計算公式：

$$S/N = -10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \quad (3)$$

y_i為第i組的實驗數據，n為實驗總次數。

表2 十字沖針冷擠鍛模擬分析之控制因子及水準表

| 因子 | 說明 | 水準1 | 水準2 | 水準3 |
|----|----------------|-----|-----|-----|
| A | 定剪摩擦係數m | 0.1 | 0.2 | 0.3 |
| B | 預成形角度 α | 53° | 60° | 67° |
| C | 母模圓角R(mm) | 0.1 | 0.3 | 0.5 |
| D | 頂桿球形高度H(mm) | 1.8 | 1.5 | 1.2 |

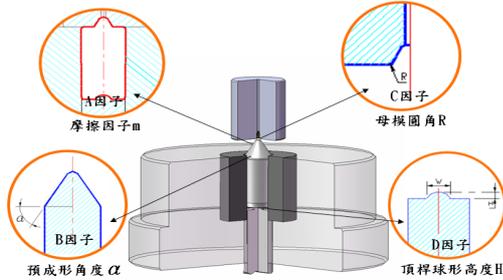


圖11 十字沖頭擠鍛之控制因子

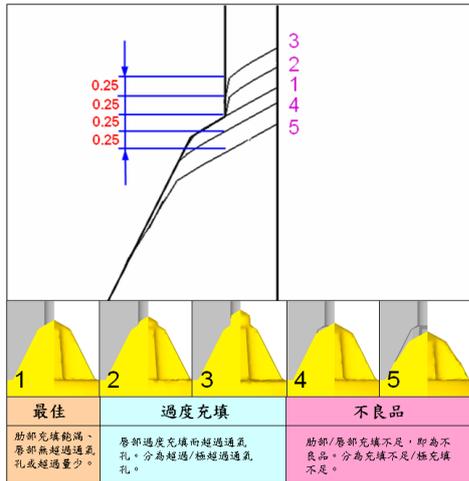


圖12 擠鍛充填品質分級圖

4. 結果與討論

4-1 AISI-M42圓環/圓柱之壓縮測試

利用有限元素進行金屬塑性成形可快速且準確得到詳細之分析資料，但在此之前必須輸入材料性質之參數。為取得AISI-M42高速鋼之材料性質材料與摩擦因子，本研究分別以AISI-M42經退火處理之材料，以200噸萬能材料試驗機進行圓柱壓縮試驗(Cylindrical upsetting test)與圓環壓縮試驗(Ring compression test)，以取得材料塑流應力 $\sigma = 1387 \epsilon^{0.19}$ ；而摩擦因子經由圓環壓縮試驗與Lee及Altan[16]之校正曲線求得其定剪摩擦因子約為0.22。圖13與圖14分別為AISI-M42原材之材料塑流曲線與Lee及Altan摩擦因子校正曲線。

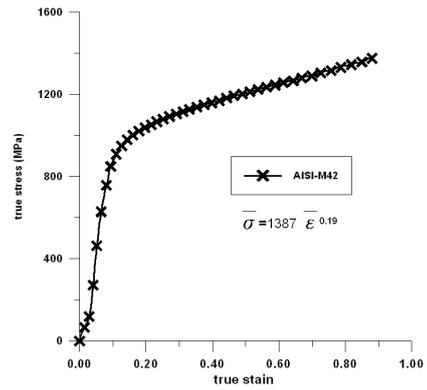


圖13 AISI-M42原材之材料塑流曲線

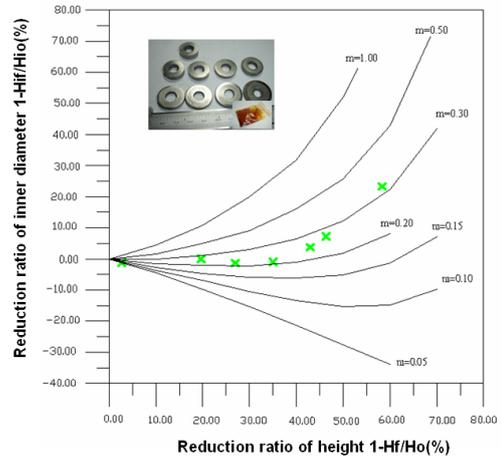


圖14 Lee及Altan摩擦因子校正曲線

4-2傳統擠鍛製程基礎研究之有限元素模擬分析

傳統十字沖頭擠鍛皆由十字母模，以單道次多行程經多次擠鍛成形。如圖15為油壓冷鍛機與擠鍛模擬分析之十字沖頭之沖程負荷與胚料變形演變圖，初始之預製胚，受頂桿球面形狀與擠鍛的作用，材料由肋部開始成形(即沖程27%)，接著受到十字錐形凹槽的影響，逐漸形成十字錐形，隨著變形量增加，沖程為78%時頂桿球面形狀的擠壓作用結束，十字沖頭逐漸成形，沖程為94%時變形阻力變大，主要為肩部鍛粗與唇部成形，成形負荷遽升，直到最後肩部擠平，尖部充填完成，獲得預期的鍛件形狀。其成形負荷約為37噸。而實際以油壓冷鍛機生產十字沖針最終沖程之成形力約為34噸。

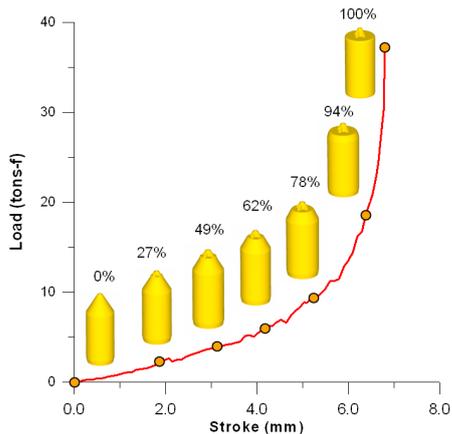


圖15 十字沖頭之模擬分析沖程負荷與胚料變形演變圖

不同的模具作動方式對成形負荷亦會有影響，針對此模具配置，分析三種模具作動方式包括1.下模與頂桿同動2.母模作動 3.頂桿作動，經由模擬分析，下模與頂桿同動所需成形負荷為36.9噸，母模作動為43.7噸，而以頂桿作動為50.0噸。故以下模與頂桿同動進行擠鍛所需之成形力較小。

十字沖頭傳統製程其等效應變分佈，以整體而言，等效應變分佈於肋部與肩部鍛粗處，於肩部表面有最大應變分佈，依據十字沖頭品質要求，破損常發生於肋部距唇部1/3處，故以其作為本文探討之重點，如圖16所示；分佈於肋部的應變分別為1.07與2.13，差異率達0.99倍。製程上為了降低成形力，並使材料可順利充填飽滿，故鍛胚採預成形(車錐形)之設計，而使得擠鍛時頂部所產生之鍛鍊效果極小，導致頂部與肋部之應變差異大，造成等效應變分佈不均，而影響到十字沖頭本身之品質與強度。圖17 為傳統製程之等效應變等高線分佈與剖切平面之微小維氏硬度(HMV)，利用微小維氏試驗機以荷重9.81N，壓痕時間30秒所測得結果；由圖可知，唇部應變小之部位，其維氏硬度值亦較小，而肋部越接近肩部，硬度值則較大。

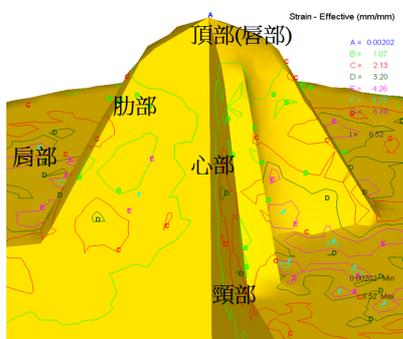


圖16 傳統製程之等效應變等高線分佈

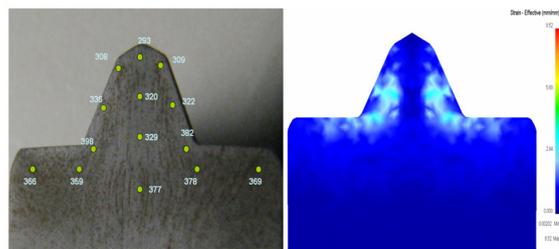
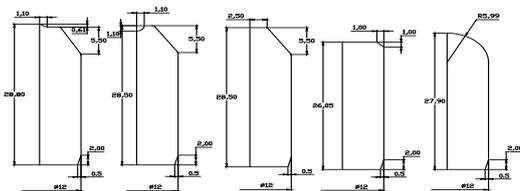


圖17 十字沖頭剖切平面等效應變分佈與微小維氏硬度比較

4-3製程改善設計規劃與分析

4-3-1 預成形端面設計之分析

為克服預成形冷擠鍛造成的應變不均，本文設計出不同端面形狀，試圖分析並找出最佳之胚料形狀，以改善其應變較為均勻之十字沖頭鍛件。如圖18所示為五種胚料端面形狀之設計。



a.平尖 b.凹孔 c.平錐端 d.平端 e.圓端

圖18 不同端部形狀的胚料設計

不同胚料之端面預成形設計製程中，十字沖頭等效應變比較，如表3所示；雖凹孔與平錐之胚料預成形可得到較傳統高之等效應變，但因凹孔處在擠鍛成形時，材料往凹孔處流動，內部材料無法往上流動，而形成了往內包覆的狀態，故無法獲得期望的鍛件形狀；而平錐端、平端及圓端的胚料因無預成形，故唇部無尖端成形，其中「等效應變差」乃是指十字沖頭錐端處之最大與最小等效應變的差異值(即 $\bar{\epsilon}_{max} - \bar{\epsilon}_{min}$)，而「等效應變差異率」乃是指十字沖頭錐端處之最大與最小等效應變的差異倍率(即 $\frac{\bar{\epsilon}_{max}}{\bar{\epsilon}_{min}}$)。圖19為不同預成形端面形狀之十字沖頭等效應變比較圖。

表3 不同胚料之端面預成形設計製程尖端處等效應變比較表

| 胚料 | 差異 | Min | Max | 差異率 (倍) | 成形力 (噸) | 備註 |
|-----|----|------|------|---------|---------|----|
| 平尖端 | | 0.94 | 2.80 | 1.99 | 122.08 | |
| 凹孔端 | | 1.51 | 3.01 | 0.99 | 292.00 | × |
| 平錐端 | | 2.67 | 5.51 | 1.06 | 137.32 | |
| 平端 | | 2.42 | 3.62 | 0.50 | 103.92 | |
| 球端 | | 1.56 | 3.11 | 0.99 | 127.76 | |

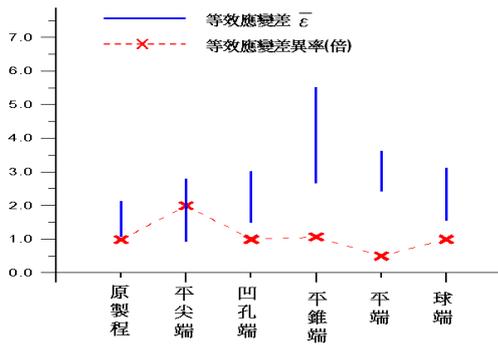


圖19 胚料之端面預成形設計製程肋部處等效應變比較圖

4-3-2 兩道次分析設計之分析

由端面預成形設計分析雖可得鍛鍊效果較佳之鍛件，但因其成形力大，對於實際生產難以實現，成形不易，故本文擬定預成形形狀仍傳統之錐形，而將原先之製程分為兩道次擠鍛，由初始材料形狀擠鍛成預製胚形狀，再擠鍛成鍛件形狀；即為胚料形狀及最終鍛件形狀皆為擠鍛成形，為考慮充填飽滿及毛邊整修量，將體積增加3%，如圖20所示為兩道次之模具胚料配置圖。圖21則為各種不同的初始胚料形狀。

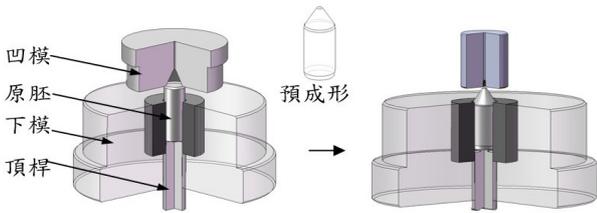
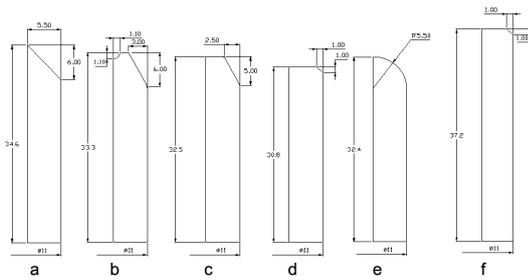


圖20 預、終鍛製程兩道次之模具胚料配置圖



a:尖錐狀 b:凹孔狀 c:平錐狀
d:平端狀 e:球端狀 f:長形平端狀

圖21 不同形狀的初始胚料

在不同胚料之端面預成形設計製程中，十字沖頭等效應變比較，如表4所示，以應變之差異率而言，凹孔端與平端之預成形可得較為均勻之應變。圖22為不同預成形端面形狀之十字沖頭等效應變比較圖，以凹孔端預成形可得最大可達之應變其次為平端。凹孔狀之初始材料形狀，因於擠鍛時，凹孔處呈往內流動形成包覆，在成形後尖端內部形成缺陷，故無法形成預期之鍛件形狀，其中平端狀與長形平端狀可得較大應變，分別為4.80與4.21。而以平端狀之初始胚料之等效應變差異率最小。

表4 兩道次不同初始胚料製程肋部等效應變比較表

| 胚料 | 第一道次 | | 第二道次 | | 差異率(倍) | 備註 |
|-------|------|------|------|------|--------|----|
| | Max | Min | Max | Max | | |
| 尖錐狀 | 0.19 | 1.41 | 2.82 | 1.00 | | |
| 凹孔狀 | 1.50 | 1.57 | 3.04 | 0.94 | x | |
| 平錐狀 | 1.20 | 1.44 | 2.81 | 0.95 | | |
| 平端狀 | 1.62 | 3.21 | 4.80 | 0.50 | | |
| 球端狀 | 0.51 | 1.39 | 2.75 | 0.98 | | |
| 長形平端狀 | 1.36 | 2.15 | 4.21 | 0.96 | | |

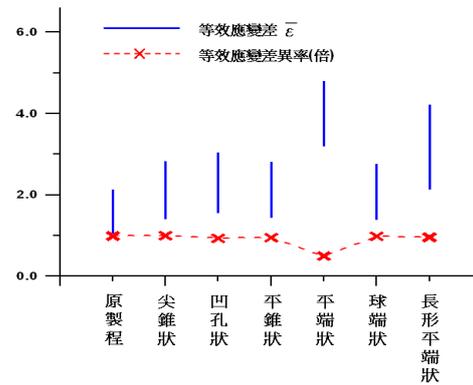


圖22 兩道次不同初始胚料製程肋部等效應變比較圖

4-4 製程之最佳化分析

表4為十字沖針冷擠鍛模擬分析數據L9(34)直交表計劃及分析結果，由圖23直交表分析十字沖頭冷擠鍛模擬分析之成形力因子反應圖顯示，可得設計參數之影響成形力之權重為A → B → C → D，而最佳因子組合為A1 B3 C1 D1，如表6所示，經由最佳化預測值與FEM驗證比較誤差為3.0%。

表4 十字沖針冷擠鍛模擬分析數據L9(34)直交表計劃及分析結果

| Exp. | A | B | C | D | Load (tons-f) | S/N | Q |
|------|---|---|---|---|---------------|--------|-----|
| Q | 1 | 1 | 1 | 1 | 33.11 | -30.40 | 1.4 |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 32.21 | -30.16 | 1.4 |
| 3 | 1 | 3 | 3 | 3 | 31.36 | -29.92 | 1.2 |
| 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 36.60 | -31.27 | 4.6 |
| 5 | 2 | 2 | 3 | 1 | 34.88 | -30.85 | 1.1 |
| 6 | 2 | 3 | 1 | 2 | 32.36 | -30.20 | 1.4 |
| 7 | 3 | 1 | 3 | 2 | 44.64 | -33.00 | 5.0 |
| 8 | 3 | 2 | 1 | 3 | 36.08 | -31.15 | 5.0 |
| 9 | 3 | 3 | 2 | 1 | 34.64 | -30.79 | 5.0 |
| 平均 | | | | | 35.10 | -30.86 | 2.9 |

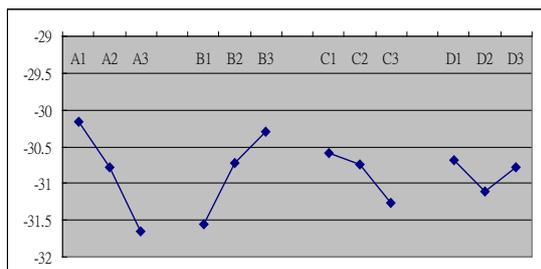


圖23 十字沖頭冷擠鍛模擬分析之成形力因子反應圖

最佳組合的成形負荷P預測值為:

$$P = \bar{P} + (A1 - \bar{P}) + (B3 - \bar{P}) = 35.10 + [-2.87] + [-2.31] = 29.92$$

表6 成形力之最佳組合的預測與驗證

| 因子 | A | B | C | D | Predicted | FEM | 誤差% |
|------|-----|-----|-----|-----|-----------|-------|-----|
| 最佳組合 | 0.1 | 67° | 0.1 | 0.6 | 29.92 | 30.86 | 3.0 |

4-5 擠鍛成形對鍛件品質之影響

經由十字沖針擠鍛製程的整理與了解，造成沖頭提早損壞之癥結，針對擠鍛成形過程中對十字沖頭品質的影響問題為以下：

1. 車錐形之預成形，經擠鍛成形後，僅對局部有鍛鍊效果，致使鍛件應變不均。而影響鍛件之品質。
2. 材料為滾軋之高速鋼棒材，碳化物呈軸向集束分佈，如圖24所示；經由錐形預成形之車削，切斷了碳化物之連續性，經擠鍛成形後，僅於肩部產生徑向鍛粗，以驅使鍛流線於肩部有呈曲線的走勢，其餘部份仍呈縱向走勢，這也因此於尖端無流動變形，失去了鍛造所能賦予鍛件改善鍛流線的獨特優勢。圖25為十字沖頭傳統製程實際鍛件與模擬分析之鍛流線比較圖。

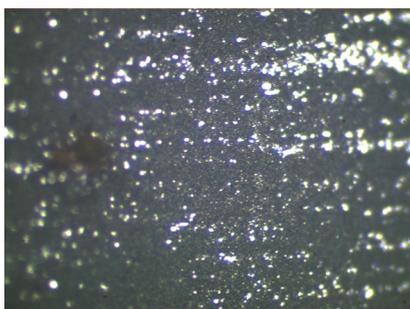


圖24 原材碳化物呈軸向集束分佈

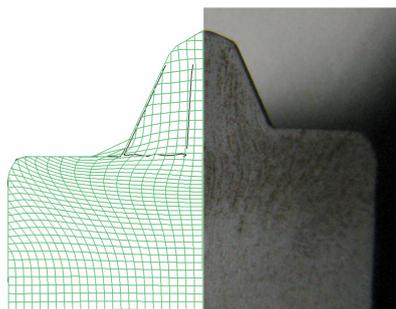


圖25 十字沖頭傳統製程實際鍛件與模擬分析之鍛流線比較

3. 鍛件之擠鍛過程中，因材料於模具之流動不佳，使得肋部與底部表面”刮料”嚴重，促使表面產生極大應力，金屬可能因而超出成形極限，導致表面產生微裂紋，沖頭表面微裂紋將不利於循環載荷，容易造成疲勞破壞。圖26為模擬與實際鍛件之肋部底部表面狀況圖。

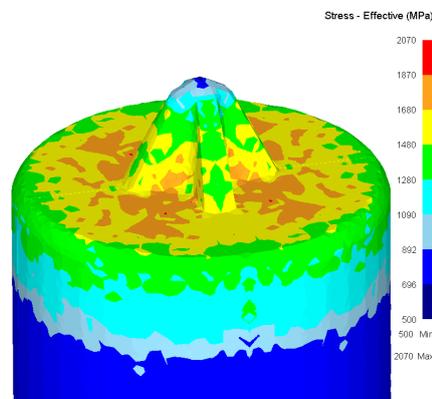


圖26 鍛件模擬分析之等效應力分佈狀態

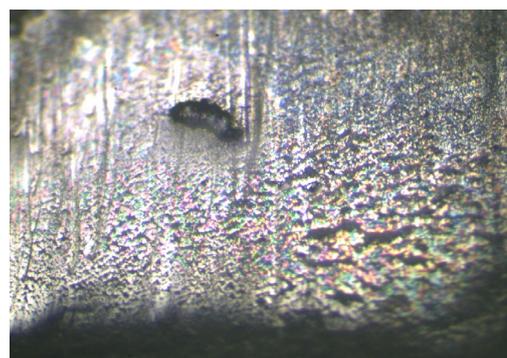


圖27 實際鍛件之肋部與底部表面狀況

5. 結論與建議

本研究經由三維剛塑性有限元素分析對十字沖頭冷擠鍛製程進行分析，得到以下結論。

使用有限元素模擬分析進行十字沖頭冷擠鍛之製程分析，清楚且正確的得到成形負荷、材料流動狀態、等效應變與鍛流線分佈等。

模擬分析發現，傳統之十字沖頭擠鍛製程，預製胚形狀造成擠鍛成形後，尖端肋部處出現嚴重應變不均的現象。

改善方案模擬分析，胚料預成形為平端狀者，經由冷鍛後可的鍛鍊效果佳，應變分佈狀態也較為均勻。

鍛件之鍛流線觀察與模擬分析發現，傳統製程之鍛件，因採車錐形的預成形，故擠鍛時僅於肩部產生徑向鍛粗，以驅使鍛流線於肩部有呈曲線的走勢，其餘部份並未受到鍛鍊作用，仍呈縱向走勢。

由田口方法進行最佳化分析，得出之最佳製程參數組合，其預測值與有限元素分析比較，其誤差僅為3%，故使用田口方法進行十字沖頭擠鍛具有良好的參考性。

金屬經冷間塑性成形後，鍛件常因局部應變硬化不均，導致內部缺陷，進而影響鍛件品質。因此，在十字沖頭的擠鍛製程上，除經由塑性成形製程與胚料設計改善之外，對於十字沖頭的使用狀況而言，其受力方式皆

由縱向受力，十字錐部受到螺釘沖打件的摩擦與壓力影響，將不利於縱向的鍛流線走勢，若能使其鍛流線呈肋部邊緣走勢，可望增強其鍛件強度；另外也可往熱處理方面進行研究，經由適當的熱處理、表面處理，以期提高鍛件內部或表面之強度。材料利用率分析以傳統製程而言，棒材到成品有約有20%的材料損失率，而以兩道次平端狀胚料進行擠鍛由棒材到成品僅有6.5%之材料損失率，故兩道次製程可較傳統製程減少13.5%之材料成本。

- [14] 許昭和、鄭朝友，應用田口法改善成形模具之應力，模具技術與論文發表會論文集，2007年
- [15] S. Kobayashi, S. Oh, and T. Altan, Metal forming and the finite-element method, Oxford University Press, 1989
- [16] C. H. Lee and T. Altan, Influence of flow stress and friction upon metal flow in upset forging of rings and cylinders, journal of engineering of Industry, Transaction of the American Society of Mechanical Engineers, 31, 1972

參考文獻

- [1] 李宜哲 “冷鍛模具壽命之分析” 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，1994
- [2] G. Maccarini, C. Giardini, and A. Bugini, “Extrusion operations: F.E.M. Approach and experimental results,” Journal of material processing technology, 24, 1990
- [3] K. P. Rao, S. M. Doraivelu,, and K. Sivaram, “Physical modeling studies using spike forging to verify analytical predictions,” Journal of materials processing technology, 28, 1991
- [4] G. Maccarini, C. Giardini, G. Pellegrini, and A. Bugini, “The influence of die geometry on cold extrusion forging operations: FEM and experimental results,” Journal of materials processing technology, 27, 1991
- [5] W. Hu, and M. S. J. Hashmi, “Study of metal flow in extrusion forging of rectangular billets,” Journal of materials processing technology, 43, 1994
- [6] C. Giardini, Ceretti, E. Ceretti and G. Maccarini, “Formability in extrusion forging: the influence of die geometry and friction conditions,” Journal of materials processing technology, 54, 1995
- [7] 張桓、莊道良、涂瑞庭、林長毅，以對照組分析方法研判因鍛流線分佈不佳造成之鍛件破損案例，鍛造，第10卷第2期，2001年
- [8] 王建中，提高汽車差速器殼螺栓冷鍛沖頭使用壽命的研究，南京工程學院學報(自然科學版)，第2卷第2期，2004年
- [9] 徐金富、桂尤國、張建中、葉以富，內六角沖頭的研製及應用，金屬熱處理，第30卷第4期，2005年
- [10] M. S. J. Hashmi, and F. B. Klemz, “Axisymmetric extrusion forging: effects of material property and product geometry,” International Journal of machine tool design and research, 26, 1986
- [11] L. Brayden, and J. Monaghan, “An analysis of closed-die extrusion/forging,” Journal of materials processing technology, 26, 1991
- [12] V. John, and M. John, “An upper-bound analysis of a forging-extrusion process,” Journal of materials processing technology, 55, 1995
- [13] S. C. Jain, A. N. Bramley, C. H. Lee, and S. Kobayashi, Theory and Experiment in Extrusion Forging, 11th M.T.D.R., Manchester (UK), 1970