

# 氣動釘槍關鍵零件之最佳化有限元素分析 Finite Element Analysis and Optimization of the Critical Components of Pneumatic Nailer

林建宇<sup>1</sup>, 陳文斌<sup>1</sup>

國立臺北科技大學 機械工程學系

## 摘要

台灣手工具業在世界舞台上一直佔有舉足輕重的地位，其中屬於動力手工具的氣動打釘機近年來更是大幅成長，至2003年已超越美國成為全世界最大輸出國，占全球供給市場的50%。為了提升國內釘槍產業競爭力，必須掌握產品創新及製造程序方面的技術能力，並且加強產品效能品質，使國內所開發之產品可與國外產品相互競爭。本研究主要針對氣動打釘機關鍵零組件：回彈膠，進行動態有限元素分析與最佳化分析。

為了減少進行有限元素分析時所需耗費之時間成本，本研究利用Abaqus 6.10.1建立包含撞針組件(活塞與撞針)與回彈膠之軸對稱有限元素模型，兩者元素型態皆為四邊形四節點元素。其中回彈膠之材料為丁腈橡膠 (nitrile rubber, NBR)，具非線性之材料特性；而活塞組件之材料為鋁合金；而撞針前段之材料為合金鋼，後段為低碳鋼。分析過程中給予撞針組件30m/s之初速度，並計算於撞擊過程中，回彈膠上最大蒙麥斯應力與槍托之反作用力。完成原始模型之動態有限元素分析後，利用最佳化分析軟體Isight4.5進行回彈膠幾何外型之最佳化分析，作為改良回彈膠設計參數之參考依據。

根據分析結果觀察回彈膠於撞擊過程中之應力分佈情形，發現其應力集中區域，會由回彈膠頂部轉換至與槍托接觸邊緣，最後再轉換至回彈膠底部，其最大蒙麥斯應力為0.922MPa，而槍托所承受之最大反作用力為1017.89N。而透過最佳化分析軟體Isight4.5進行最佳化分析，所獲得之最佳化模型，可減少12.15%之最大蒙麥斯應力(0.810MPa)。藉由對零組件進行之動態模擬分析，可評估相關組件可能發生破壞之區域，再透過最佳化分析程序提供廠商零件改良上的建議，並有助於國內釘槍產業的提升。

**關鍵字：**氣動打釘槍、回彈膠、有限元素分析、最佳化分析

## ABSTRACT

Taiwan hand tool industry has occupied the most important position on the world-wide market for years. Especially, the pneumatic nailer industry, belonging to the driven tool in the domain, has replaced the United States to become the first exporter in the globe since 2003 and occupied over 50% of the worldwide market share. Hand tool companies have to master the product innovation and the manufacturing technologies in order to promote the competition capability of Taiwan nailer industry. Furthermore, it is necessary to enhance product qualities in order to compete with other companies on the market. The objective of the current project is to perform mechanical evaluations on the critical components (bumper) of pneumatic nailer for the cooperating company.

The finite element program ABAQUS, version 6.10.1 (SIMULIA Inc., Providence, Rhode Island, USA) was used in the present study. Both components were meshed using Quadratic 4-node axisymmetric elements. The bumper was represented by a polyethylene ring (Nitrile Rubber, NBR) with a non-linear material property. A low carbon steel with a Young's modulus of 190 GPa and a Poisson ratio of 0.32 was assigned to the driver. The inferior surface of the bumper was rigidly fixed and the velocity of 30 m/s was applied to the driver by using the rigid surface. Furthermore, the maximum von Mises stress on the bumper and the reaction force on the bracket were evaluated in the present study.

The results showed that the max. von Mises stress concentration around the bumper area. An important observation is the even stress distribution beneath the contacting face of each component. The deformation pattern results in high bumper stresses (maximum von Mises stress of 0.922MPa) underneath the corners of the driver. By the dynamic simulations of the critical components of pneumatic nailer, the shooting life of pneumatic nailer and product efficiency can be investigated. Based on the analysis and testing results, mechanical design suggestions on the refinements of the components can be provided to the cooperating company. The pneumatic hand tool industry in Taiwan can also be promoted.

**Keywords:** pneumatic nailer, driver, bumper, finite element analysis, optimization analysis

## 一、緒論

氣動打釘機主要以高壓空氣為動力源，驅動扣件 (fasteners, 較廣泛的一般定義含釘材、螺絲、栓、銷子等) 進入實體，以固定介面的工具，用於物品的組立、分解、修理、檢查、調整等作業。相關附屬產品為各式釘材 (大區分為單腳釘或稱針 nail 及雙腳釘或稱釘 staple)，對象物主要為木材，其餘如：鋁板等軟金屬板、薄鋼鐵板、工程塑膠與各式建築或結構材料。藉由釘材的穿透力貫穿對象物，以達到固定、結合的目的。由於打釘機具有大量裝載、固持瞄準、準確釘著與一次釘牢等基本功能，配合各式釘材的排狀設計，取代傳統的攜釘、手持與榔頭釘著動作程序，對於手持安全性與工作效率大幅提昇。最早的運用主要為建築或裝潢等專業人士或從事工廠生產等大量釘著工作之用，直到目前為止仍佔有一定的比例。隨著生產技術的提昇與產業的成熟，成本及單價的降低，加上普遍的所得提高，漸漸為一般消費市場所接受，尤其在歐美等高工資、修繕需求頻繁、服務幅距過大的地區，加上自己動手 (DIY) 的風氣盛行，除了工業級與專業級持續往產品效率、耐用性與人體工學上的發展之外，日常使用釘範圍的平價機種逐漸成為日常消費產品。更由於現代結構運用的發達與材料的發展，新的運用需求不斷的推陳出新，新機種產品的市場仍有很大的發展空間。

國內產業發展初期以小型工廠或貿易商為主。單價很高，屬於賣方市場，主要供應內銷需要。由於未達經濟規模，產品開發多以模仿進口產品，並使用由若干鑄造廠商自行開模 (公共模具) 的鑄造主體從事生產，產品規格較少而缺乏差異性。自從民國 83 年左右業者成功打入美國市場後，藉著經濟規模的達到，紛紛壯大研發單位組織，

加上經驗技術的累積，配合國外大型通路的銷售，出口量年年大幅成長，已跨越美國成為全球最大地動打釘機最大輸出國。根據中華徵信所 2003 年調查資料，台灣氣動打釘機全球供給市場佔有率約 50%，其次為美國及日本。

鑑於消費市場、通路經營的高困難度與業界的規模，目前國內廠家對於，消費市場行銷經營短期間並無強烈企圖，僅止於萌芽階段，已有業者提出海外設立辦公室或發貨倉庫的打算。產業的關鍵技術主要在於後勤運籌與產品研發相關技術，包括設計開發流程專案管理的技術等。而產品設計上的重要技術包括氣動力學、應用力學、材料學、人因工程等相關應用科學，製程技術上主要是關鍵零組件，如：回彈膠 (bumper) 壽命、撞針 (driver) 材料選用及熱處理、(鋁) 鎂合金壓鑄等生產技術。打釘機產品依照使用者專業程度與壽命及效率要求可大分為四個等級，分別是 DIY、半專業、專業與工業級打釘機。DIY 級產品主要用途為一般居家修繕使用，使用者為一般消費者，其產品壽命與效率要求較低。產品附加功能較少，產品接近標準化，其消費者價格敏感度較高，售價也較低廉。半專業級打釘機主要用於小型房屋、家具建造使用，使用者有維修工人及一般消費者，產品壽命要求約 15 萬擊。專業級打釘機主要用途為大型社區房屋及家具建造，使用者為職業工人，產品壽命要求約 30 萬擊。而工業級釘槍主要用途為工廠之房屋建造與棧板製造，使用者為職業工人，其壽命要求為 100 萬擊以上。根據業界上櫃公司公開說明書之參考數據，DIY 級打釘機其平均出廠價約 0.72 千元，單位成本約 0.49 千元；半專業級產品其平均出廠價約 1.03 千元，單位成本約 0.71 千元；專業級產品其平均出廠價約 2.69 千元，單位成本約 1.61 千

元；工業級產品則尚無可靠參考資料。安全性是所有產品的共通最重要要求特性，其他產品特性要求依其上述類別有程度之分，DIY級與半專業級以價格考量優先，著重外觀與方便性；專業級與工業級著重性能、效率、可靠度與可用度。

現今台灣業界產品的技術高度正往工業級邁進，業者雖號稱已達到工業級水準，但是產品品質往往不盡理想，主要問題在於關鍵零組件-回彈膠與撞針的使用壽命無法達到工業級氣動打釘機效能需求，本計畫合作企業-力偕實業股份有限公司，其產品行銷地區分布全球，擁有相當完善的行銷策略及經銷據點，但是由於產品外銷後之工作環境溫度(-10°C~40°C)差異頗大，造成回彈膠及撞針使用壽命衰退，無法完全達到工業級氣動打釘機之產品壽命需求。

本研究主要目的是希望利用有限元素分析與最佳化分析在產品設計上的優勢，配合相關測試儀器，藉由改善回彈膠之幾何外形，可以在產品實際操作試驗前，協助廠商快速評估改良設計後之產品效益，減少企業於人力、材料與時間成本上的耗費，縮短研發時間與提高企業產能。

## 二、文獻回顧

### 2.1 顯性求解法

隱性演算法對於短時間、大變形、非線性的物理行為，尤其是在落錘撞擊試驗及撞擊貫穿方面，在分析上將會耗費大量電腦資源及時間；而顯性演算法(Explicit Method)在分析上有極佳準確性的運算方式來處理相關短時間撞擊的問題，Abaqus/Explicit可用於分析瞬態動力學問題，由於不需要迭代求解方程式，可節省大量的運算時間達到最經濟及快速的目標。

### 2.2 最佳化方法

最佳化方法橫跨不同領域，諸如數學、應用科學、經濟、統計學、甚至於醫學。傳統最佳化方法清楚的定義，乃經過不斷數值分析而可得到最適的結果。因此，最佳化方法論的發展需要基本的數學背景，包括：基本向量-矩陣運算、線性代數、微積分及實數分析法等(胡光復，2007)。

Goldberg(1989)則將目前分析最佳化問

題，分類為下列三種：數值(Numerical Method)、列舉法(Enumerative)及隨機搜尋法(Random Search)。

### 2.3 實驗設計法

D.O.E. (Design Of Experiment) 實驗設計法一般分為二階段式實驗法，第一階段實驗最主要目的是要找出顯著因子，進而有效的加以控制。第二階段實驗最主要目的是針對顯著因子找出其工作區間。最終實驗的數據是利用變異數 ANOVA 分析，統計運算求出各因子及相互作用的貢獻度，便可由因子貢獻度，了解何者為顯著因子，在製程上必須做好管制。對於兩種特性分析時，可將各別特性的 ANOVA 分析結果，利用 CROSS TABLE 進行多特性分析，其重點在於兩特性間相矛盾的顯著因子，如何做一個較為有利的選擇。

實驗設計的意義主要分為：1.狹義的實驗設計：利用某些技巧(如隨機性、重複性、區集性等)使實驗變數能充分發揮其對反應變數的影響，並能排除實驗變數以外的干擾變數，以純粹觀察實驗變數對反應變數的影響效果，而能提高實驗分析的精確度；2.廣義的實驗設計：泛指在進行實驗設計之前，對實驗如何進行所做的計畫。如擬定實驗假設、決定自變數與依變數、考慮如何控制外來干擾變數、如何減少實驗誤差、如何抽樣及選擇適當的統計方法，甚至利用實驗結果加以推論等均是。

實驗設計的類型主要分為：1.因子設計：係指對實驗因子(即實驗變數)作適當處理的設計，使其能充分顯示出實驗因子對反應變數的影響情形；2.區集設計：係指依據某一外在影響變數，將實驗單位區分為若干區集，然後再觀察實驗因子對反應變數的影響效果。其中拉丁方格設計係指二區集設計的一因子設計之實驗設計。其特色為一種雙向區集設計，包括行區集設計、列區集設計。拉丁方格的特色是若實驗因子有 K 個水準，則外在變數須分為 K 類，實驗單位須有  $K \times K$  個，並以隨機方式將實驗因子的水準分派到各個實驗單位，且同行或同列不得出現相同的處理水準(把實驗因子所造成的效果加以平衡，以看出實驗處理效果之差異)。

### 三、研究方法

本研究採用由廠商所提供之氣動捲釘槍進行相關實驗與分析，產品型號為CN565(圖1)，此釘槍零件細部分解如圖2所示，主要包含：槍體、活塞、撞針、回彈膠、捲釘夾、槍管、安全裝置...等。此氣動捲釘槍之作動模式主要分為三大步驟：1.高壓氣體由氣源入口進入，經槍把管道到達上氣室，此時壓縮空氣壓力將大於彈簧彈力；2.當扣板機開關開啟時，會排出槍體內空氣導致活動氣門開啟，進而使壓縮空氣進入氣壓缸並擊發撞針。同一時刻壓縮空氣進入捕風孔，再通過下氣室進入抓釘孔以抓取下一發釘子；3.放開板機開關後，由於活動氣門關閉阻隔上氣室壓縮空氣進入氣壓缸，而原本位於下氣室之壓縮空氣則經由回風口進入槍體，藉由壓縮氣體推動撞針使其回歸起始位置。

#### A.軸對稱動態有限元素分析 有限元素模型建立

##### (a) 回彈膠有限元素模型建立

根據廠商所提供之回彈膠工程圖(圖3a)，利用繪圖軟體SolidWorks 2005(SolidWorks Corporation, Boston, MA, U.S.A.)，繪製回彈膠3D立體模型(圖3b)，並將回彈膠3D立體模型轉存\*.sat檔，匯入有限元素分析軟體Abaqus6.10.1 (SIMULIA, Providence, RI, USA)中建立四邊形四節點之網格模型(圖3c)，其網格數目為1391，節點數目為1446。

##### (b) 活塞組有限元素模型建立

根據廠商所提供之回彈膠組(活塞與撞針)工程圖(圖4a)，利用繪圖軟體SolidWorks 2005(SolidWorks Corporation, Boston, MA, U.S.A.)，繪製活塞組3D立體模型(圖4b)，並將活塞組3D立體模型轉存\*.sat檔，匯入有限元素分析軟體Abaqus6.10.1 (SIMULIA, Providence, RI, USA)中建立四邊形四節點之網格模型(圖3c)，其網格數目為852，節點數目為1048。

#### 材料特性

##### (a) 回彈膠材料特性試驗

回彈膠在氣動打釘槍結構中主要扮演

緩衝撞針撞擊力的角色，其材料為高分子聚合物(acrylonitrile-butadiene rubber, NBR)，為了提高模擬分析上的準確性，本計畫根據美國材料與試驗協會之測試規範(ASTM-D395)進行回彈膠試片之壓縮試驗，此規範(Standard Test Methods for Rubber Property-Compression Set)所採用之橡膠材料試片為圓柱形試片：直徑28.60mm，厚度12.50mm(圖5a)，實驗過程中使用材料試驗機(MTS810)搭配自行開發之夾治具(圖5b)，給予試片下壓負載之速率為12.00mm/min，試驗終止條件為橡膠試片應變量達50%時，共進行6次試驗，所獲取之材料真實材料特性曲線如圖6所示。

##### (b) 活塞組材料特性設定

活塞組件包括活塞與撞針，在氣動打釘槍結構中，撞針為擊發釘材之主要零組件，由於氣動釘槍擊發速度快、頻率高，撞針結構的製程與加工方式便顯得相當重要。廠商所欲改良之撞針組件，在提高其結構耐疲勞能力的前提下，對撞針鋼材進行分段熱處理，以提高鋼材硬度，圖7為撞針分段熱處理之長度及相關洛氏硬度數值。根據對應之洛氏硬度，我們根據德國標準DIN50150常用範圍鋼材硬度對照表(表1)，得到撞針分段之彈性模數與波以松比。活塞為鋁合金，撞針前段為鑄碳鋼，而後段為合金鋼，相關材料參數設定如表2所示。

#### 邊界與負載條件設定

由於氣動打釘槍於實際擊發時，撞針撞擊回彈膠之過程是在動作狀態下產生，而動態模擬分析過程中，必須給予活塞組擊發之初始速度，而利用自行開發之速度量測裝置，測得撞針飛行速度為30.00m/s。故於有限元素分析模型中，給予活塞組件擊發速度為30.00m/s，而回彈膠托架底端則設定為完全固定(圖8)。

#### B.最佳化分析

由於在釘槍擊發過程中，回彈膠主要扮演著吸收衝擊力的角色，最大主應變也往往發生於回彈膠上，導致發生破壞的機率也較高，故本研究將針對回彈膠剖面輪廓進行最佳化設計。根據原始模型輪廓幾何參數(圖9、表3)，定義相關輪廓尺寸，其中包括：

(1)R1；(2) R2；(3) R3；(4) R4；(5) R5；(6) R6；(7)H；(8) W。藉由改變上述各項參數之變異對回彈膠最大蒙麥斯應力與槍托反作用力的影響，找出影響目標函數之顯著因子。

在第一階段之實驗設計中，選擇(1)至(6)之圓角尺寸為實驗因子。第二階段之實驗設計中選擇(7)與(8)之回彈膠高度與寬度為實驗因子。透過此兩階段之實驗設計程序，找出何項因子對於回彈膠之最大蒙麥斯應力與槍托反作用力之影響較大，並藉由最佳化分析結果，找出最佳之回彈膠剖面幾何外型。

## 四、結果

### A 軸對稱動態有限元素分析

觀察於衝擊過程中，回彈膠應力分布情形，發現其應力集中區域，會由回彈膠頂部轉換至與槍托接觸邊緣，最後再轉換至回彈膠底部(圖 10)；而在衝擊過程中，發現最大蒙麥斯應力位於回彈膠底部，其數值為 0.922MPa，此時槍托所承受之反作用力為 1017.89N(圖 11)。

### B 最佳化分析

#### 第一階段實驗設計

透過改變(1)至(6)之圓角尺寸，經過最佳化分析後之結果，發現建議之相關尺寸參數如表 4 所示，此分析模型所得之最大蒙麥斯應力為 0.879MPa，與原始模型之最大蒙麥斯應力差距僅 4.66%，槍托所承受之最大反作用力為 1012.73N，與原始模型之最大反作用力差距僅 0.51%。圖 12 顯示各圓角尺寸變異對最大蒙麥斯應力的影響趨勢，發現各圓角尺寸參數變異對最大蒙麥斯應力並無顯著影響。

#### 第二階段實驗設計

透過改變(7)與(8)之回彈膠高度與寬度，經過最佳化分析後之結果，發現建議之相關尺寸參數如表 5 所示，此分析模型降低 12.15%之最大蒙麥斯應力(0.81MPa)，槍托所承受之最大反作用力為 976.80N，與原始模型之最大反作用力差距為 4.03%。觀察回彈膠高度與寬度對最大蒙麥斯應力之影響，發現呈現相反的趨勢(圖 13)，其中回彈膠高度為較顯著之影響因子。由圖 14 之等

高線圖發現，回彈膠高度尺寸越大，其最大蒙麥斯應力越小；回彈膠寬度尺寸越小，其最大蒙麥斯應力越小。

## 五、討論

本研究完成軸對稱之撞針與回彈膠之動態有限元素分析，透過分析結果發現於撞擊過程中，最大應力分別發生於(1)回彈膠頂部；(2)與槍托接觸邊緣；(3)回彈膠底部。此應力集中之區域，與實際擊發時發生破壞的位置相當接近，故本研究以最大蒙麥斯應力與反作用力作為反應變數，由第一階段之最佳化分析結果，發現回彈膠圓角尺寸並非顯著因子，僅減低 4.66%之最大蒙麥斯應力；而在第二階段之最佳化分析結果中發現，回彈膠高度與寬度對於回彈膠之最大蒙麥斯應力影響較大，其中又以高度變化對於蒙麥斯應力之影響最為顯著，可減低 12.15%之最大蒙麥斯應力。整合各項尺寸參數變異對於槍托反作用力之影響，發現各項參數對於槍托反作用力並無顯著影響。

本研究僅建立包含活塞組件、回彈膠與槍托之軸對稱有限元素模型，分析中假設撞針與回彈膠間並無橫斷面滑動的情形，與真實情形並不相符；在材料特性設定上，並無考量材料之熱效應，可能導致分析結果與真實狀況之差異；橡膠材料發生破壞大多由於週期性負載而造成材料硬化，或是因溫度而改變其材料特性，加速表面劣化情形發生。

## 六、結論與未來展望

藉由 Abaqus6.10.1 於動態模擬分析之優勢，完成此高速撞擊模擬分析，有助觀察相關零組件在高速撞擊過程中之力學效應；搭配 Isight4.5 最佳化分析軟體，得到最佳化之回彈膠幾何外形，可有效減低回彈膠最大蒙麥斯應力，可有效提供設計者在產品參數變異上之參考依據，提高產業研發能力與產品效能。未來亦將考量橡膠材料之熱效應，並實際量測橡膠材料之 S-N 曲線，進行疲勞分析試驗，以提供更完善之參考數據。

## 七、誌謝

本研究承蒙國科會經費補助、國家高速電腦中心軟硬體配合與士盟科技於模擬分析上之大力協助，謹此誌謝。

### 八、參考文獻

- [1] 胡光復(2007)混合型基因演算法於鋪面落重撓度試驗動力回算分析之研究，淡江大學博士論文，台灣，淡水
- [2] Goldberg, D.E.(1989) Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning, Addison-Wesley Publishing Company

### 九、表格

表1鋼材硬度對照表

抗拉強度 RmN/mm2	維氏硬度 HV	布氏硬度 HB	洛氏硬度 HRC
1095	340	323	34.4
1125	350	333	35.5
1115	360	342	36.6
1190	370	352	37.7
1220	380	361	38.8
1255	390	371	39.8
1290	400	380	40.8
1320	410	390	41.8
1350	420	399	42.7
1385	430	409	43.6
1420	440	418	44.5
1455	450	428	45.3
2145	640	-608	57.3
2180	650	-618	57.8
	660		58.3
	670		58.8
	680		59.2
	690		59.7

表2活塞組之材料參數

	彈性模數	波以松比
鋁合金	69GPa	0.33
鑄碳鋼	190GPa	0.32
合金鋼	210GPa	0.28

表3 原始模型輪廓幾何參數

編號	名稱	尺寸(mm)
1	R1	R19.64
2	R2	R6.85
3	R3	R9.81
4	R4	R3.02
5	R5	R18.87
6	R6	R40.01
7	H	R29.00
8	W	R15.00

表4 第一階段最佳化模型輪廓之幾何參數

編號	名稱	尺寸(mm)
1	R1	R17.84
2	R2	R7.35
3	R3	R10.03
4	R4	R3.55
5	R5	R17.50
6	R6	R40.49
7	H	R29.00
8	W	R15.00

表5 第二階段最佳化模型輪廓之幾何參數

編號	名稱	尺寸(mm)
1	R1	R18.86
2	R2	R6.85
3	R3	R9.81
4	R4	R3.02
5	R5	R19.03
6	R6	R40.49
7	H	R29.73
8	W	R14.25

### 十、圖片



圖1 CN565氣動捲釘槍



圖2 CN565氣動捲釘槍相關零件分解圖

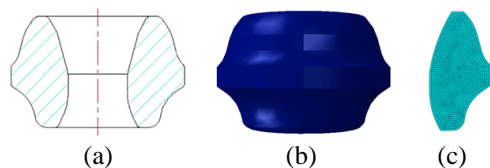


圖3(a)回彈膠工程圖；(b) 回彈膠3D立體模型；(c) 回彈膠網格模型



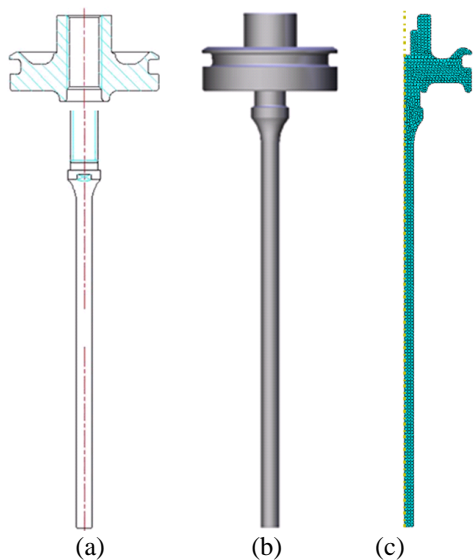


圖4(a)活塞組工程圖；(b) 活塞組立體模型；(c) 活塞組網格模型

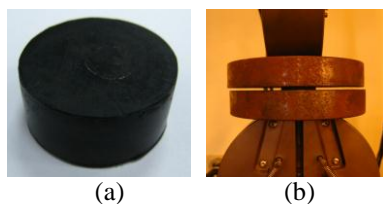


圖5(a)測試用之標準試片；(b)材料試驗機之裝置圖

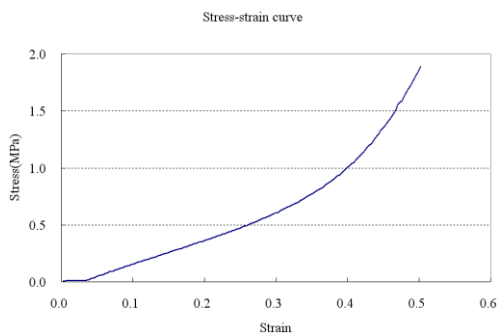


圖6回彈膠試片壓縮試驗之應力-應變曲線

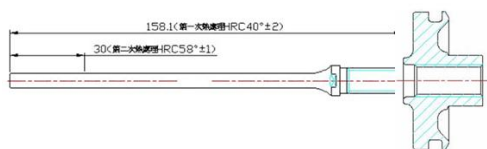


圖7 撞針分段熱處理之示意圖

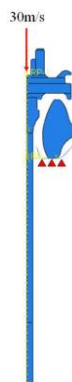


圖8 有限元素分析負載與邊界條件示意圖

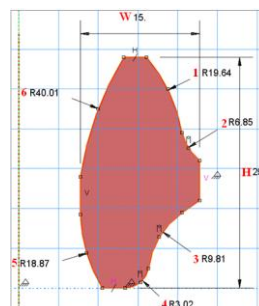


圖9 原始模型輪廓幾何參數

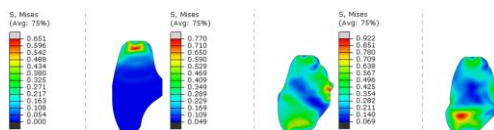


圖10 撞擊過程中，回彈膠蒙麥斯應力分布情形

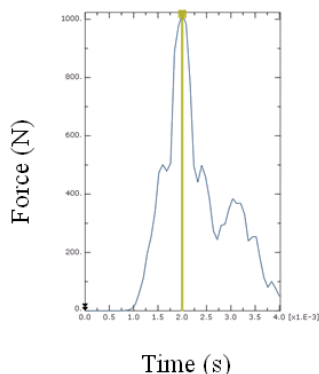


圖11 撞擊過程中，槍托反作用力變化情形

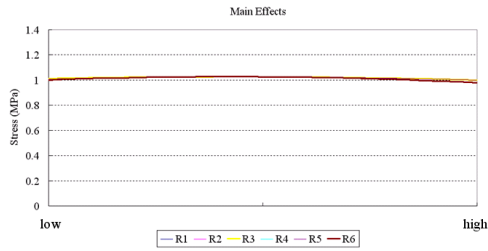


圖 12 回彈膠輪廓各圓角參數變異對最大蒙麥斯應力之影響

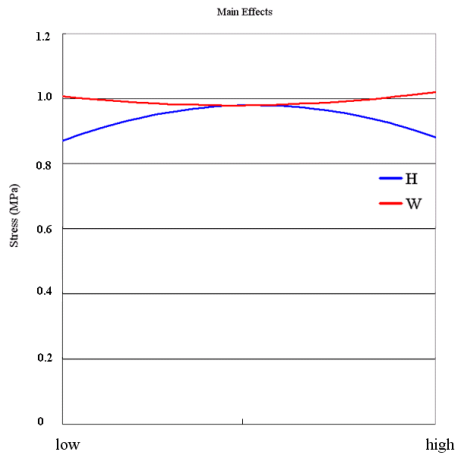


圖 13 回彈膠高度與寬度參數變異對最大蒙麥斯應力之影響

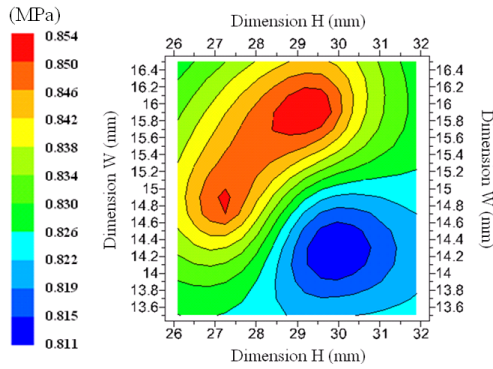


圖 14 回彈膠高度、寬度尺寸相對於最大蒙麥斯應力之等高線圖