

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

先進高強度鋼板於

伺服沖床之引伸成形研究

Research on Drawing of

Advanced High Strength Steel using Servo Press

研究生：黃呂翔

指導教授：洪景華教授

中華民國一百零一年六月

先進高強度鋼板於伺服沖床之引伸成形研究  
Research on Drawing of  
Advanced High Strength Steel using Servo Press

研究生：黃呂翔                      Student: Lu-Hsiang Huang  
指導教授：洪景華教授              Advisor: Dr. Ching-Hua Hung

國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文



A Thesis  
Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of  
Master  
in  
Mechanical Engineering

June 2012

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百零一年六月

# 先進高強度鋼板於 伺服沖床之引伸成形研究

研究生：黃呂翔

指導教授：洪景華教授

國立交通大學機械工程學系

## 摘要

本研究利用伺服沖床針對高強度鋼板做引伸成形性研究，首先設計一引伸成形模具安裝於伺服沖床機台上，經由雷射切割高強度鋼板取得引伸用試片，並改變相關加工參數如材料引伸比、加工速度、壓料間隙、加工曲線及摩擦條件以觀察高強度鋼板之引伸成形特性。試驗結果得知伺服沖床特有之脈波式加工曲線可改善加工時之潤滑情形並增加成形性。為分析驗證此一現象，透過有限元素分析軟體 ABAQUS 模擬引伸成形過程，為模擬伺服沖床之脈波式加工曲線改善潤滑情形的現象，本模擬中設定摩擦係數會隨沖頭之加工行程而改變，並與傳統沖床曲線之結果做比對。模擬結果顯示，脈波式運動曲線下之成品其成形性優於傳統沖床曲線，因此本研究證實伺服沖床對於高強度鋼板之引伸成形優於傳統沖床之加工方式。

關鍵字：先進高強度鋼板、引伸成形、伺服沖床

# **Research on Drawing of Advanced High Strength Steel using Servo Press**

Student: Lu-Hsiang Huang

Advisor: Dr. Ching-Hua Hung

**Department of Mechanical Engineering**

**National Chiao Tung University**

## **Abstract**

This research aimed to prove the formability of advanced high strength steel (AHSS) by using servo press is better than by using traditional press. At first, a drawing die was designed and installed on a servo press. The drawing specimens were prepared by laser cutting from AHSS sheets. Parameters such as drawing ratio, forming velocity, die gap, forming path, and friction conditions were tested to analyze the formability of advanced high strength steel. The experimental results showed that a particular pulse motion provided by servo press could relubricate the specimen and improve the formability of AHSS. The finite element analysis software ABAQUS was used to simulate the drawing process to analyze the relubricating mechanism. The simulation results showed that the pulse motion could lower the coefficient of friction between specimen and die, and also explained why the relubricating mechanism could improve the formability of AHSS. This research showed that the formability of AHSS by using the servo press with pulse motion is better than by using the traditional press.

Keyword: Advanced high strength steel, Drawing, Servo Press

# 誌謝

研究所兩年的時光說時遲那時快，想不到今天我也得要寫致謝了，這兩年讓我改變很多，不僅僅只有學業研究，對未來的方向也有了一定的目標。我敢說相比於兩年前大學剛畢業懵懵懂懂的我，現在的我的確自信不少！

這兩年來要感謝的人太多了，謝謝我的指導教授洪景華教授，老師給了我們很多建議與方向，兩年來學生受教了！也要感謝實驗室的學長姐、學弟妹，有問題之時能互相討論找到解決方法，實驗室就像另一個家一樣，大家沒事就喝（飲料）聊天，還好有大家的陪伴研究生生活才不至於太過枯燥。謝謝我的家人，爸媽雖然不太清楚我研究所到底在做什麼，但也是無條件支持我，孩兒一定銘記在心！謝謝陪伴我走過七年的女朋友，有你的一路加油打氣吶喊助威，總是讓我打起精神繼續打拼，接下來我要當兵，你要工作，就要進入人生的另一階段囉！一起加油吧！

一旦離開了校園，褪去了學生的身份，踏入社會後會有許多挑戰與責任需要我們一肩扛起，雖然會懷念當學生快活的日子，但我認為只要持續學習並保持對事情的熱情，以後的日子肯定更加精彩！

就這樣吧，再見，我所懷念的學生時代。

# 目錄

摘要.....	i
Abstract .....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
表目錄.....	vi
圖目錄.....	vii
1. 第一章 緒論.....	1
1.1. 簡介.....	1
1.2. 高強度鋼板.....	2
1.3. 伺服沖床.....	3
1.4. 引伸成形.....	4
1.5. 文獻回顧.....	5
1.6. 研究動機與目的.....	9
1.7. 研究方法與步驟.....	11
1.8. 論文架構.....	12
2. 第二章 材料性質與試驗.....	13
2.1. 試驗目的.....	13
2.2. 彈性係數與指數定律.....	13
2.3. 實驗方法.....	14
2.4. 實驗結果.....	16
3. 第三章 引伸成形實驗.....	17
3.1. 引伸實驗機台建置.....	18
3.1.1 引伸模具.....	18
3.1.2 量測設備.....	20
3.2. 引伸成形試片尺寸之規劃.....	21

3.2.1	第一階段實驗結果.....	23
3.2.2	第二階段實驗結果.....	26
3.2.3	第三階段實驗結果.....	28
3.2.4	實驗結果討論.....	35
4.	第四章 有限元素分析.....	44
4.1.	有限元素分析系統.....	44
4.2.	軟體介紹－Abaqus.....	47
4.3.	有限元素模型之基本假設.....	48
4.4.	模擬傳統沖床及伺服沖床運動曲線.....	49
4.4.1	引伸模擬模型建立.....	49
4.4.2	邊界及摩擦條件設定.....	51
4.4.3	模擬結果與討論.....	54
5.	第五章 結論與未來工作.....	56
5.1.	結論.....	56
5.1.1	引伸成形試驗.....	56
5.1.2	引伸成形模擬.....	57
5.2.	未來工作.....	58
	參考文獻.....	60
	附錄 A 安全氣囊氣體發生器下外殼引伸成形模擬.....	61
A.1	取得坯料尺寸及模具外型.....	61
A.2	網格劃分.....	65
A.3	材料及元素性質給定.....	65
A.4	邊界條件及分析設定.....	66
A.5	各道次模擬結果與討論.....	67
A.5.1	第一道次結果比較.....	68
A.5.2	第二道次結果比較.....	69
A.5.3	第三道次結果比較.....	70
A.5.4	模擬結果與討論.....	71

# 表目錄

表 1.1 高強度鋼板種類及應用[1].....	2
表 1.2 機械式沖床與伺服沖床優缺點比較.....	3
表 2.1 SPFC780Y 材料性質整理.....	16
表 3.1 引伸模具尺寸及材料表.....	19
表 3.2 滑塊速度對應沖頭速度表.....	24
表 3.3 第一階段引伸試驗結果.....	25
表 3.4 第二階段引伸試驗結果-壓料間隙 1.0MM.....	26
表 3.5 第二階段引伸試驗結果-壓料間隙 1.2MM.....	27
表 3.6 直徑 64MM 試片之加工參數結果比較表.....	30
表 3.7 不同潤滑條件之結果表.....	31
表 3.8 B、C、D 三點之厚度平均值及標準差.....	39
表 4.1 網格收斂性測試.....	50
表 4.2 無脈波運動曲線摩擦係數設定.....	52
表 4.3 脈波運動曲線摩擦係數設定.....	53
表 4.4 引伸成形模擬結果.....	55
表 A.1 JSH780R 材料性質整理.....	66



# 圖目錄

圖 1.1 伺服沖床可設定各種加工行程曲線 .....	3
圖 1.2 具壓料板之圓筒狀引伸模具示意圖[2] .....	4
圖 1.3 V 型折彎模具尺寸示意圖[3].....	5
圖 1.4 有限元素模擬模具間隙與應力分佈圖[3].....	5
圖 1.5 引伸模具示意圖[5].....	6
圖 1.6 有限元素模型及高強度鋼板 DP590GA 材料性質[5] .....	6
圖 1.7 引伸極限試驗模具配置圖[6].....	7
圖 1.8 引伸極限試驗材料破裂情形，材料由左至右為（SPFC340， DP600, DP800, DP1000） [6].....	7
圖 1.9 伺服沖床控制曲線[7].....	8
圖 1.10 重新潤滑之機制[7].....	8
圖 1.11 脈波式曲線對沖壓力之影響[7] .....	8
圖 1.12 應用高強度鋼板引伸成形之混合式氣體發生器[8].....	8
圖 1.13 協易機械工業股份有限公司提供之 SD1-160 伺服沖床.....	12
圖 2.1 MTS-810 拉伸試驗機 .....	14
圖 2.2 SPFC780Y 厚度 1MM 試片尺寸圖 .....	15
圖 2.3 拉伸試驗試片配置圖 .....	15
圖 2.4 SPFC780Y 真實應力-真實應變曲線圖 .....	16

圖 3.1 引伸模具 3D 示意圖 .....	18
圖 3.2 引伸模具組合圖 .....	19
圖 3.3 荷重元 .....	20
圖 3.4 電阻尺 .....	20
圖 3.5 第一階段各尺寸之試片 .....	22
圖 3.6 引伸成品破裂情形 (左：無破裂右：已破裂) .....	22
圖 3.7 滑塊速度對應行程-時間圖 .....	24
圖 3.8 第一階段試驗結果速度 6.5 (MM/S) .....	25
圖 3.9 無脈波曲線 VS.脈波式曲線圖 .....	28
圖 3.10 脈波式曲線行程之細部放大圖 .....	29
圖 3.11 潤滑方式示意圖 .....	29
圖 3.12 直徑 64MM，無脈波曲線，壓料間隙 1.2MM，無潤滑之成形結果。 .....	32
圖 3.13 直徑 64MM，無脈波曲線，壓料間隙 1.2MM，雙面潤滑之成形結果。 .....	32
圖 3.14 單面潤滑之沖壓力-行程圖 .....	33
圖 3.15 無潤滑之沖壓力-行程圖 .....	34
圖 3.16 雙面潤滑之沖壓力-行程圖 .....	35
圖 3.17 潤滑劑之封閉現象示意圖[10] .....	36
圖 3.18 試片厚度量測點示意圖 .....	38

圖 3.19 各條件之成品厚度分佈圖.....	38
圖 3.20 單面潤滑之厚度分佈 .....	40
圖 3.21 無潤滑之厚度分佈 .....	40
圖 3.22 雙面潤滑之厚度分佈 .....	41
圖 3.23 無脈波曲線之厚度分佈 .....	42
圖 3.24 脈波曲線之厚度分佈 .....	43
圖 4.1 有限元素軟體分析之流程圖.....	45
圖 4.2 網格收斂性測試趨勢圖 .....	50
圖 4.3 模擬模型配置圖.....	50
圖 4.4 模型網格劃分示意圖 .....	50
圖 4.5 脈波運動曲線示意圖 .....	51
圖 4.6 沖頭下降 6MM 時摩擦係數示意圖 .....	52
圖 4.7 材料最薄厚度 T 示意圖.....	54
圖 A.1 使用 CAD 軟體繪製之安全氣囊下外殼 3D 圖 .....	61
圖 A.2 圓形坯料尺寸 (MM) .....	62
圖 A.3 下外殼第一道次模具配置圖 .....	63
圖 A.4 下外殼第二道次模具配置圖 .....	63
圖 A.5 下外殼第三道次模具配置圖 .....	64
圖 A.6 下外殼第三、四道次底部比較.....	64
圖 A.7 網格分佈示意圖 .....	65

圖 A.8 材料性質曲線.....	66
圖 A.9 實驗結果量測點示意圖.....	67
圖 A.10 第一道次模擬結果及實驗結果.....	68
圖 A.11 第一道次模擬及實驗厚度分佈.....	68
圖 A.12 第二道次模擬結果及實驗結果.....	69
圖 A.13 第二道次模擬及實驗厚度分佈.....	69
圖 A.14 第三道次模擬結果及實驗結果.....	70
圖 A.15 第三道次模擬及實驗厚度分佈.....	70



# 第一章 緒論

## 1.1. 簡介

西元 1769 年，全世界第一台具實用性的汽車（蒸氣汽車）誕生後，汽車的發展成長極為迅速，如今汽車已成為人類生活中最重要的交通工具。就汽車製造業而言，為因應石油價格不斷提高及日益嚴格之安全法規，各大車廠為降低車體重量並增加燃油效率，近年來使用先進高強度鋼（Advanced high strength steel）作為車體材料的比例持續增加，為達成提高安全性、節能、降低排放等目標，發展高強度汽車用鋼之應用技術已成為趨勢。

高強度鋼板是一新研發的鋼種，其強度為傳統鋼板數倍之多，然而業界針對此種高強度鋼板多使用傳統機械沖床加工成形，卻發現成形性不如預期，包括材料破裂或是回彈等現象太大。而近年工具機界推出一新型伺服沖床，其特點包括可更改加工速度及行程曲線等，有別於傳統機械沖床，伺服沖床適用於各種類型之加工且具有增加產能及降低製造成本等特點，有鑑於目前業界對於利用伺服沖床針對高強度鋼板之成形特性仍不甚熟悉，因此本研究即利用此種新型伺服沖床針對高強度鋼板做圓筒狀引伸之成形性研究。

## 1.2. 高強度鋼板

高強度鋼板是藉由添加微量合金元素，如 Nb、Cu、V、Ti 等，並經由特殊的軋延方式及退火技術生產而來。其種類有主要包括雙相鋼 (DP)、相變誘導塑性鋼 (TRIP)、複相鋼 (CP)、麻田散體鋼 (M) 等，各種類鋼之應用整理於表 1.1。

本研究使用之材料為中鋼 SPFC780Y 級高強度鋼板，種類屬於雙相鋼 (DP)，雙相鋼之特點是在肥粒鐵 (Ferrite) 基地中含有 5% 以上的麻田散鐵 (Martensitic)。肥粒鐵可使材料易於加工，麻田散鐵則可使強度提高。雙相鋼強度約為 500 至 1200MPa，並具有低的降伏比、高硬化指數、高加工硬化指數、高烘烤硬化等性能。

表 1.1 高強度鋼板種類及應用[1]

優點	性能	應用
➤ 強度高 ➤ 重量減輕 ➤ 減少耗油	雙相鋼(DP)	用來製造高強度、高抗碰撞吸收、易成型、要求嚴格的零件。如：車輪輪轂、保險槓、懸掛系統、或內外板零件等。
	相變誘導塑性鋼 (TRIP)	除具高強度、高抗碰撞吸收外，亦有高延伸性及抗疲勞性能，主用在汽車結構件零件上，如底盤、或車門保險槓等。
	複相鋼(CP)	具高吸收性能及吸收擴孔性能，主用於車門。
	麻田散體鋼(M)	AHSS 鋼中強度級別最高，主用於低成型要求的車身零件，替換管狀零件。

### 1.3. 伺服沖床

本研究使用之沖床為協易機械工業股份有限公司提供之SD1-160單軸伺服沖床，最大速度為55SPM(Stroke per minute)，行程為200mm。相較於傳統連桿機械式沖床只有一種沖壓曲線的缺點，伺服沖床利用伺服馬達取代傳統儲存能量的飛輪，以伺服控制方法達成速度、行程曲線等加工參數的可調性，也就是能針對不同的加工情況，設定適合的行程曲線如圖1.1，表1.2為機械式沖床與伺服沖床的優缺點比較。

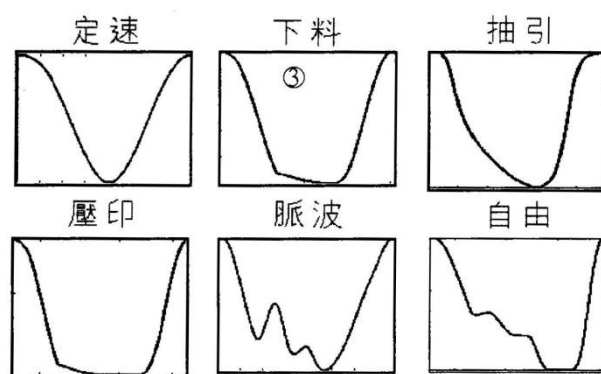


圖 1.1 伺服沖床可設定各種加工行程曲線

表 1.2 機械式沖床與伺服沖床優缺點比較

	機械式沖床	伺服沖床
優點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 具飛輪儲存能量</li> <li>2. 生產效率高，保養容易</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 可以任意設定行程曲線、加工速度</li> <li>2. 具資料庫可方便提取加工參數</li> <li>3. 省能源，待機時幾乎無電力消耗</li> <li>4. 延長沖床、模具壽命</li> <li>5. 提昇加工精度，減少噪音、振動</li> </ol>
缺點	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 行程長度、沖頭速度固定</li> <li>2. 加工精度不易掌握</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. 伺服馬達價格昂貴</li> <li>2. 無飛輪機構儲存能量，加工能量由伺服馬達提供</li> </ol>



## 1.4. 引伸成形

引伸成形 (Drawing) 也稱為抽引、抽製，指在不產生皺紋、薄化、裂痕等情況下，將金屬板材置於引伸模中，藉由沖頭將板材沖入沖模中形成有底無接縫之筒狀成品[2]。常見引伸成形有圓筒、角筒、錐筒等形式，最基本的引伸模式則為圓筒狀引伸，如圖 1.2 所示。而影響引伸加工的參數則有：引伸比、引伸道次、加工速度、沖頭 R 角、沖模 R 角、模具間隙、壓料板力等。引伸成形過程可大致分為四步驟：

1. 將裁切完成之板材置於引伸模內之定位板固定。
2. 壓料板下降對板材施予壓力，防止成形過程產生褶皺導致破裂。
3. 沖頭下降將板材沖入模穴成形。
4. 沖頭上升，壓料板上升，成品頂出，加工完成。

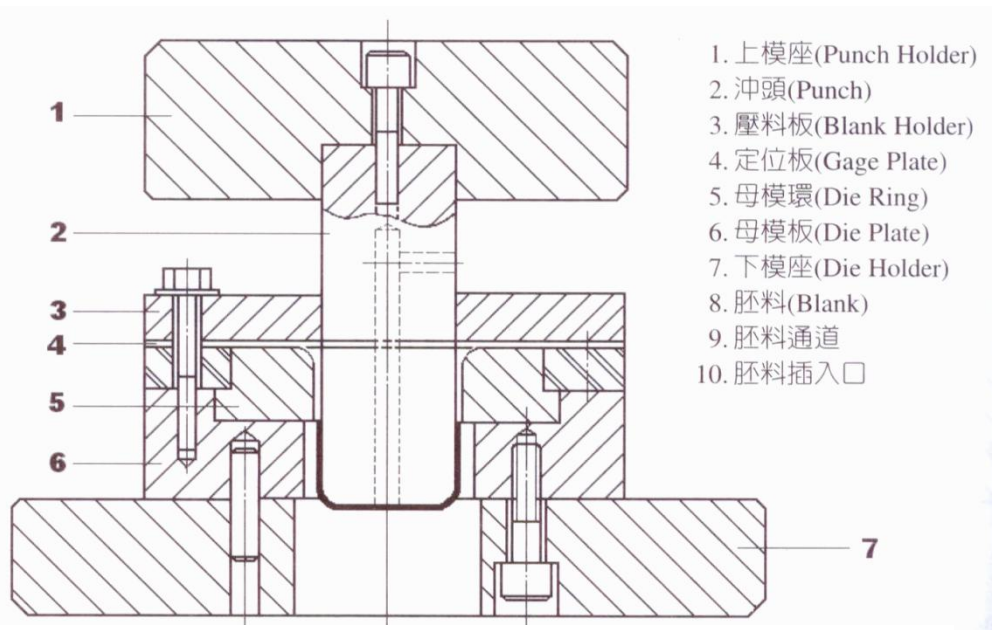


圖 1.2 具壓料板之圓筒狀引伸模具示意圖[2]



## 1.5. 文獻回顧

本節之重點主要為蒐集整理使用有限元素法模擬成形實驗，及針對高強度鋼板做成形實驗以探討模擬正確性之相關著作。

Mori[3]等人使用伺服沖床針對高強度鋼板做 V 型彎折實驗（圖 1.3），探討不同沖壓速度、持壓時間是否能改善回彈現象，並利用有限元素法模擬沖頭到達下死點後持續下壓材料的情況，也就是模具間隙對回彈現象的影響，圖 1.4 為模具間隙與應力分佈之關係圖。

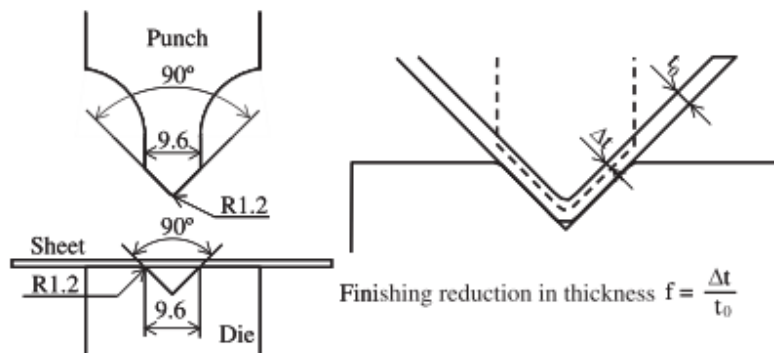


圖 1.3 V 型折彎模具尺寸示意圖[3]

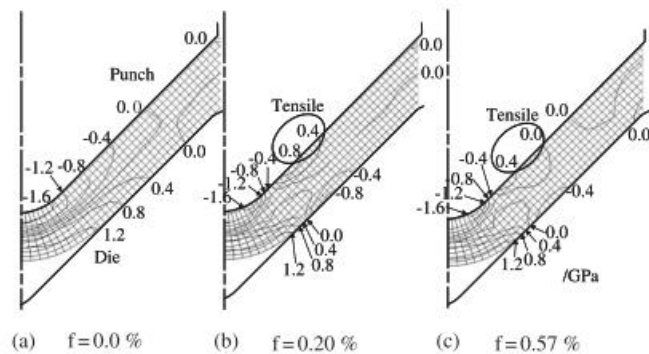


圖 1.4 有限元素模擬模具間隙與應力分佈圖[3]

Kim[4,5]等人針對高強度鋼板沖壓成形，探討模具材料、表面處理、潤滑劑選擇等參數對成形性影響，並利用有限元素法模擬與實驗相驗證。圖 1.5 為實驗中引伸模具配置圖，圖 1.6 為有限元素模型及高度鋼板 DP590GA 之材料性質。

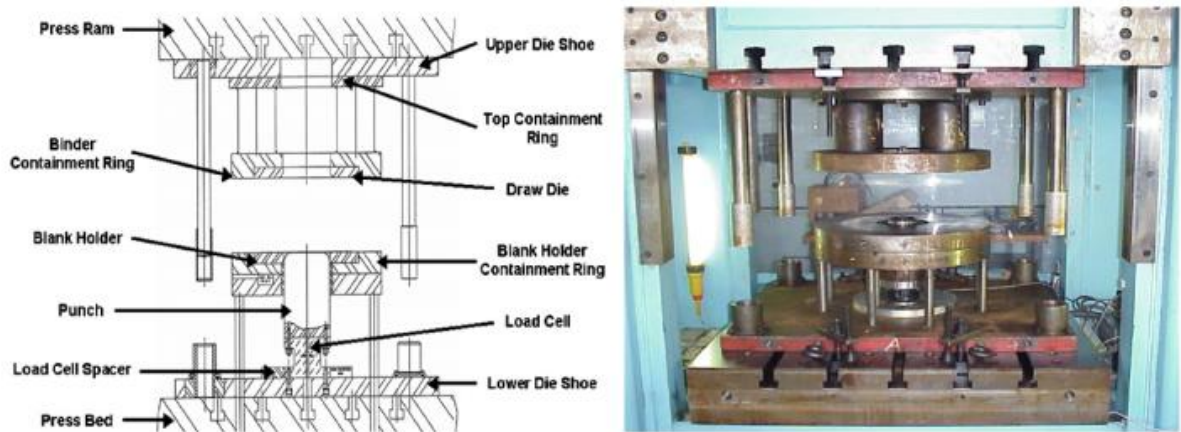


圖 1.5 引伸模具示意圖[5]

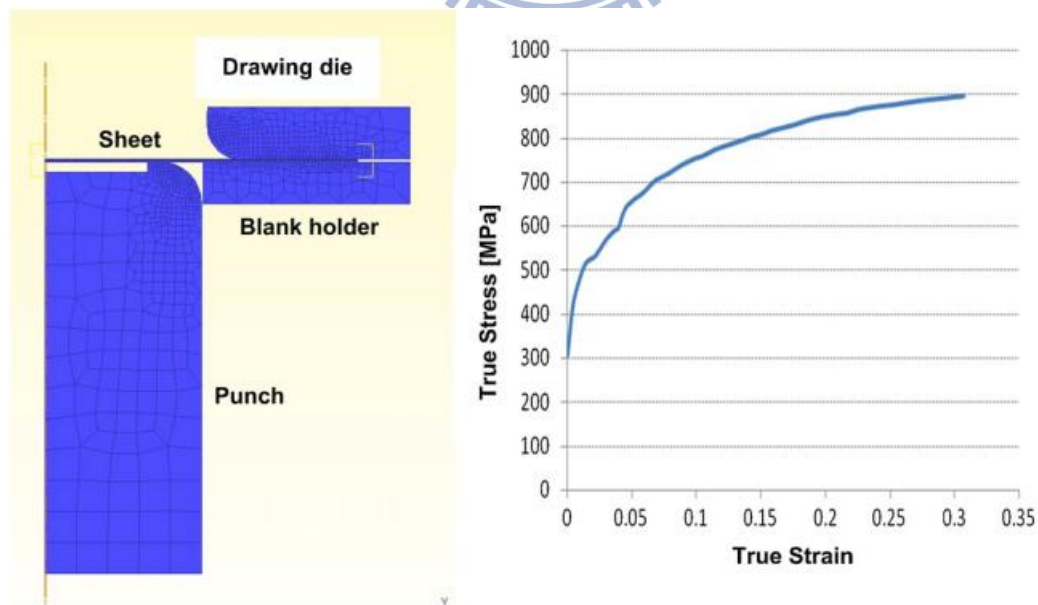


圖 1.6 有限元素模型及高強度鋼板 DP590GA 材料性質[5]

Wang[6]等人針對高強度鋼板的極限引伸比 (Limit drawing ratio) 做圓筒狀引伸試驗，並利用有限元素法預測材料破壞情形，圖 1.7 為引伸極限試驗模具配置圖，圖 1.8 為引伸極限試驗材料破裂情形。



圖 1.7 引伸極限試驗模具配置圖[6]



圖 1.8 引伸極限試驗材料破裂情形，材料由左至右為 (SPFC340, DP600, DP800, DP1000) [6]

Maeno 等人[7]利用控制伺服沖床脈波式運動曲線如圖 1.9，發現此種製程可使潤滑劑均勻分佈於模具與材料接觸面，其機制如圖 1.10 所示，當沖頭停止下降並上升一小段距離時，模具將產生彈性恢復而與工件間產生一縫隙，潤滑劑因此被吸回縫隙以達成重新潤滑的效果。工件因重新潤滑，再加工時可發現沖壓力顯著減少，如圖 1.11 所示，同時製程時間亦未有太大之增加。

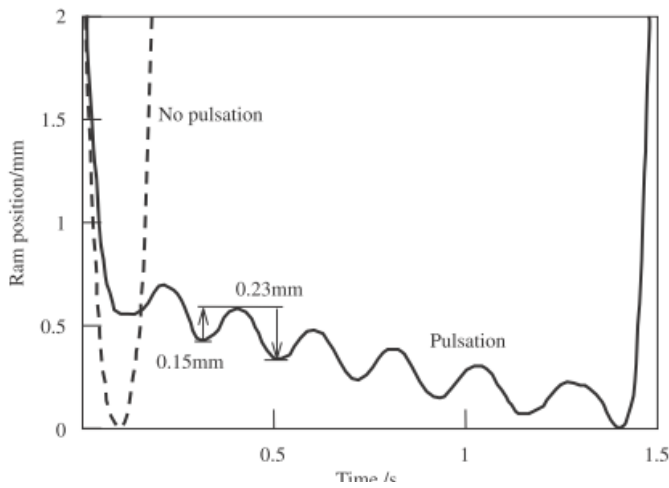


圖 1.9 伺服沖床控制曲線[7]

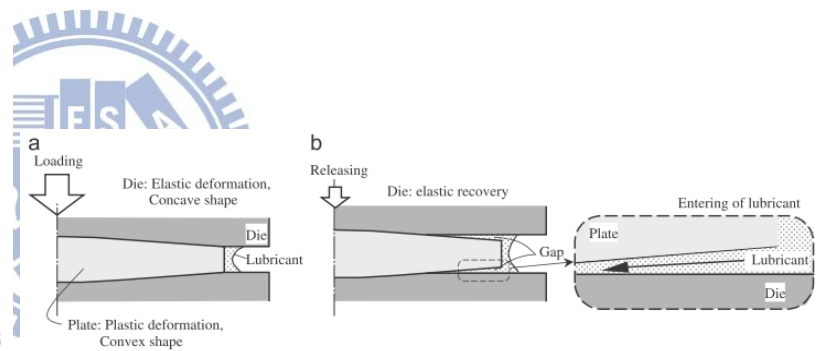


圖 1.10 重新潤滑之機制[7]

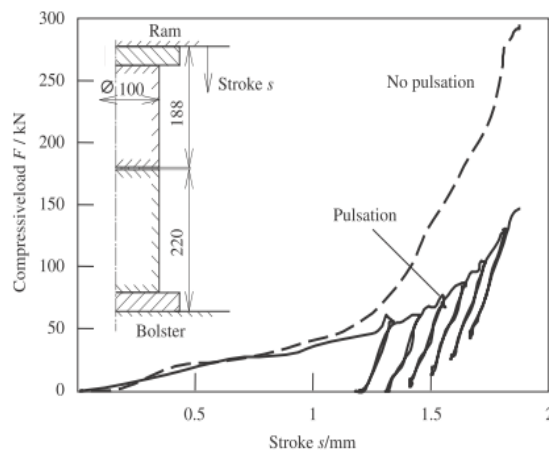


圖 1.11 脈波式曲線對沖壓力之影響[7]

本實驗室與元翎精密工業股份有限公司[8]曾進行計劃合作，計畫內容為針對元翎公司所生產之駕駛座安全氣囊氣體發生器(圖 1.12)，作氣體發生器壓力容器外殼之引伸成形模擬研究(附錄 A)。傳統氣體發生器可分為壓縮氣體型及火藥型兩種，而元翎公司開發生產為一新型混合式氣體發生器，充氣方式為高壓氣體與少量化學藥劑反應所生成，可將火藥型與壓縮氣體型兩者優點相互融合。

業界對不同用途的安全氣囊氣體發生器有不同的強度規範，此種氣體發生器因安全因素所需之耐壓強度非常高，因此元翎公司選用高強度鋼板作為氣體發生器之壓力容器外殼。此外殼製造方式為藉由傳統沖床對高強度鋼板作圓筒狀引伸成形，然而高強度鋼板在傳統沖壓加工方式下成形性不佳。針對此問題，本研究即結合高強度鋼板及伺服沖床，針對圓筒狀之外形做引伸成形性之研究。



圖 1.12 應用高強度鋼板引伸成形之混合式氣體發生器[8]



## 1.6. 研究動機與目的

高強度鋼板因其高強度特性導致引伸成品成形性不佳，成品尺寸與初始設計不符，且在引伸成形時會產生破裂等現象。而傳統引伸加工多依靠試誤法（Trial and error）與經驗法來生產，不僅浪費時間物力，亦無法參數化保留加工製程等經驗。此外，應用伺服沖床針對高強度鋼板成形的相關研究文獻亦較少。因此，本研究結合高強度鋼板及伺服沖床做圓筒狀引伸成形研究，將設計一引伸模具，並藉由伺服沖床做引伸試驗，利用伺服沖床可以更改加工速度及加工曲線的特性，與傳統沖床沖壓成品比較，以觀察伺服沖床對高強度鋼板之引伸成形影響。最後利用有限元素分析軟體 Abaqus 模擬引伸成形，以驗證伺服沖床及傳統沖床在加工上之差異性。

## 1.7. 研究方法與步驟

引伸成形試驗將分為兩階段，第一階段為實際製作一引伸模具，並將模具裝設於協易機械工業股份有限公司提供之 SD1-160 伺服沖床（圖 1.13）對高強度鋼板進行引伸成形實驗。首先規劃不同尺寸之高強度鋼板試片以改變引伸比參數，做引伸成形後觀察材料破壞情形以找出材料破壞之極限引伸比。接著針對此極限引伸比之試片，更改加工參數如摩擦條件、機台加工速度、加工曲線等，並觀察材料成形結果。

第二階段將模擬實際成品之成形過程，根據第一階段設計之模具外型，於 Abaqus 內建立沖頭、沖模、壓料板等外型模組，並設定其它條件如材料性質、邊界條件、摩擦係數、加工曲線等加工參數，最後將模擬結果與實驗成品比對，以驗證伺服沖床相較傳統沖床能有較佳加工性之機制。



圖 1.13 協易機械工業股份有限公司提供之 SD1-160 伺服沖床

## 1.8. 論文架構

本論文共分為五章，本章先就本研究進行背景介紹後，將分為：

（第二章）材料性質與試驗：取得高強度鋼板之材料性質。

（第三章）引伸實驗結果：實驗設備建置，引伸實驗結果整理。

（第四章）有限元素分析：建立模型、模擬結果、與實驗相互驗證。

（第五章）結論與未來工作。



## 第二章 材料性質與試驗

### 2.1. 試驗目的

本試驗藉由取得台大陳復國教授的幫助，取得厚度1mm之SPFC 780Y鋼板作為引伸試驗之試片。首先將板材製作成標準試片做單軸拉伸試驗，以取得彈性係數、真實應力-真實應變曲線等材料性質，並視材料為均質（Homogeneous）之材料，後續可將材料數據輸入至模擬軟體中以取得精確模擬結果。

### 2.2. 彈性係數與指數定律

在模擬軟體中需要材料之真實應力-真實應變數據，然而藉由單軸拉伸試驗所得之曲線為工程應力-工程應變，因此只要透過式 2.1、2.2 之轉換即可得到所需數據，但此公式僅適用於材料未發生頸縮前之均勻變形，當頸縮發生之後已不再是單軸拉伸，因此頸縮後之數據將不予考慮。

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (2.2)$$

其中 $\sigma_T$ ：真實應力（MPa）、 $\varepsilon_T$ ：真實應變

$\sigma$ ：工程應力（MPa）、 $\varepsilon$ ：工程應變

根據真實應力-真實應變曲線，計算其彈性區域之材料彈性係數E。求得彈性係數之後，將材料之真實應力-真實應變曲線扣除前段彈性區，從開始塑性變形到材料頸縮發生前的真實應力-應變曲線，可以式2.3與其趨近，此式可有效表示材料之機械性質[9]。

$$\sigma_T = K (\varepsilon_T)^n \quad (2.3)$$

其中， $n$ ：應變硬化指數、 $K$ ：常數

### 2.3. 實驗方法

本研究之拉伸試驗係採用本系之 MTS-810 萬能拉伸試驗機（圖 2.1），並使用延伸計夾持於試片之均勻變形區域，以量測軸向應變值。實驗所使用之延伸計為 MTS 公司製造，型號為 632.26F-30。



圖 2.1 MTS-810 拉伸試驗機

拉伸試驗試片之尺寸係依照 ASTM-E8M 之規範所決定，拉伸試片尺寸如圖 2.2 所示。另外，考慮材料之異向性，規劃了三種方向之拉伸試片，與滾軋方向之夾角分別為  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ，其配置如圖 2.3 所示。本實驗在常溫下進行，並設定拉伸速率為  $0.02\text{mm/s}$ ，將試片拉伸至斷裂，紀錄荷重元（Load cell）所量測之荷重值及應變規之應變值，藉此取得材料的機械性質。

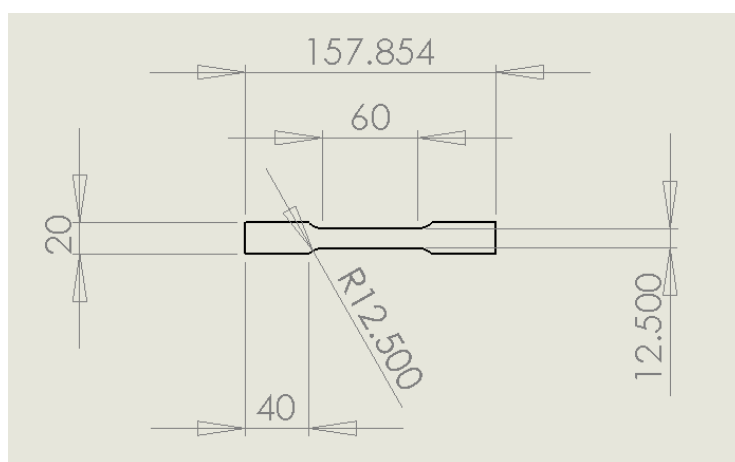


圖 2.2 SPFC780Y 厚度 1mm 試片尺寸圖

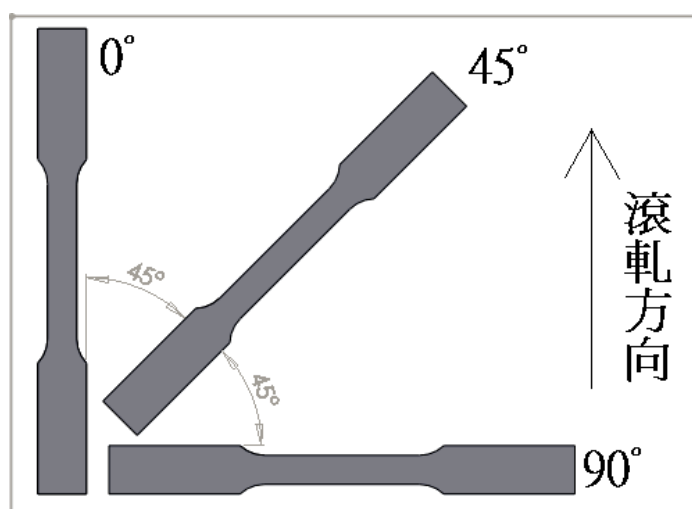


圖 2.3 拉伸試驗試片配置圖

## 2.4. 實驗結果

厚度 1mm 之 SPFC780Y 拉伸試驗結果如圖 2.4 所示，各方向之材料強度差異不大，整理材料之三方向性質如表 2.1 所示，本材料性質將作為第四章自行設計之引伸試驗之模擬材料設定。

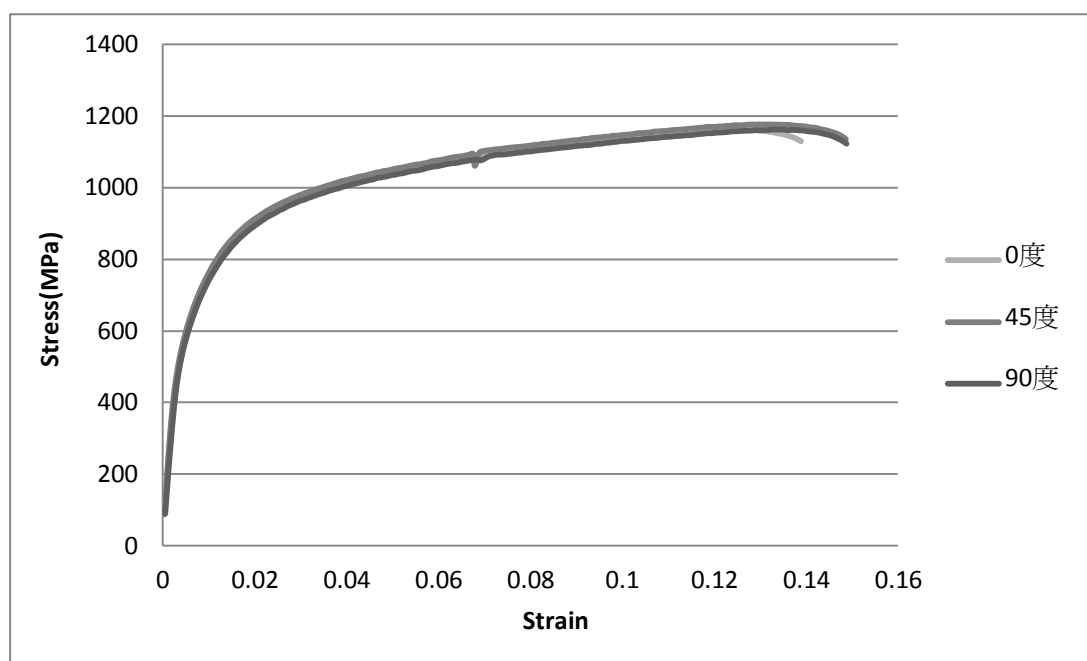


圖 2.4 SPFC780Y 真實應力-真實應變曲線圖

表 2.1 SPFC780Y 材料性質整理

SPFC780Y	E (GPa)	$\nu$	YS (MPa)	TS (MPa)
0°	207	0.3	429	1023
45°	207	0.3	402	1031
90°	207	0.3	418	997

### 第三章 引伸成形實驗

一般傳統沖床並無改變滑塊運動曲線之功能，其加工曲線為簡單之簡諧運動曲線，無法針對不同加工情形改變滑塊曲線，因此針對高強度鋼板之沖壓成形遭遇許多困難。本章將使用本系引進之新型伺服沖床針對高強度鋼板做引伸成形試驗，以探討加工曲線對高強度鋼板之成形性影響。

首先設計一引伸模具裝設於伺服衝床機台上，並裝置荷重元及電阻尺以讀取機台力量及滑塊位移。為驗證傳統沖床與伺服沖床之差別，引伸成形試驗將分三階段進行，第一階段設定加工曲線為一般傳統沖床之曲線，並控制各項參數包括加工速度以及規劃 7 種引伸試片尺寸，目的為找出在傳統沖床加工曲線下高強度鋼板之引伸極限發生的區間。大於材料引伸極限之試片，試片會有破裂的現象產生。第二階段依然使用傳統沖床曲線，在上階段之引伸極限發生的區間內進一步細分試片尺寸以找出更精確之引伸極限發生條件，並更改加工速度及壓料間隙以觀察成形影響。在找出材料之引伸極限後，第三階段針對傳統曲線下會發生破裂的引伸試片，嘗試更改加工曲線，如給予滑塊一脈波式運動之曲線以探討伺服沖床之加工特性，並更改加工參數如潤滑條件以研究傳統沖床及伺服沖床之加工差異性。

### 3.1. 引伸實驗機台建置

#### 3.1.1 引伸模具

本階段將設計一引伸模具裝於伺服沖床上，以作為高強度鋼板引伸試驗之用，首先利用繪圖軟體 SolidWorks 繪製模具外型並送至加工廠加工。主要零件包含沖頭、母模、壓料板，將選用 SKD11 模具鋼作為材料，並經由熱處理使材料表面硬度達至洛氏硬度 48-50 度，其餘結構件則選用 S45C 做為材料，而控制壓料間隙之壓料環則採用 SUS304 作為材料。引伸模具 3D 外型如圖 3.1 所示，其尺寸及材料如表 3.1 所示，加工完成之實際模具如圖 3.2 所示。

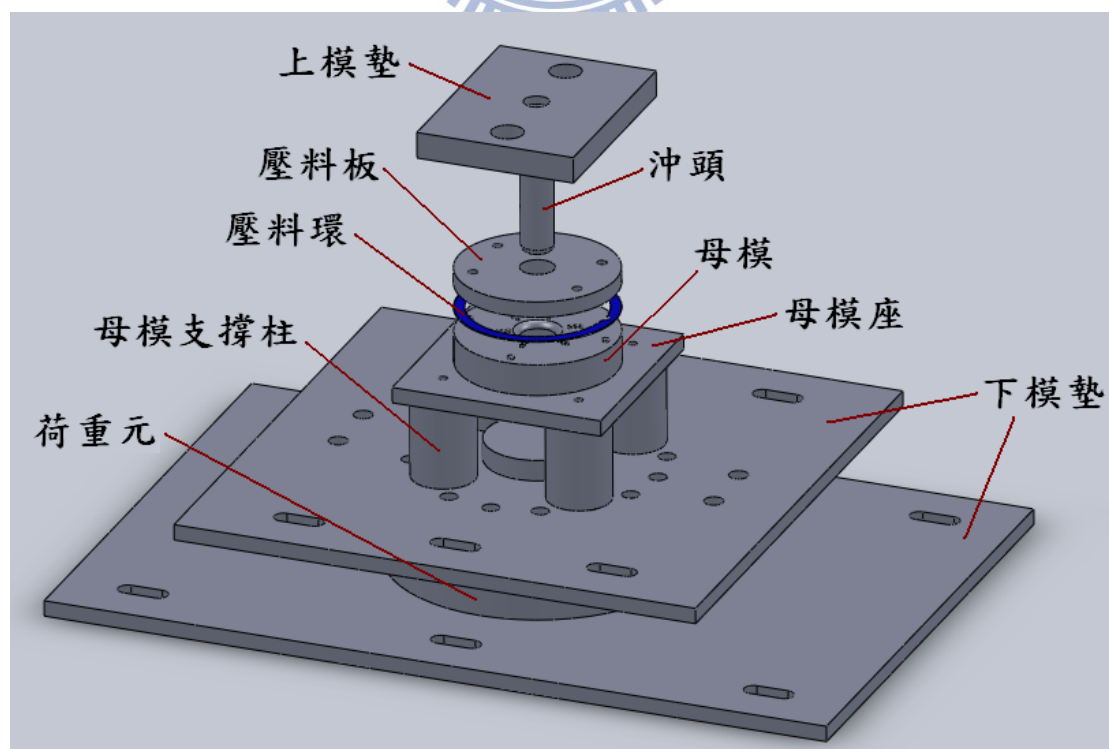


圖 3.1 引伸模具 3D 示意圖

表 3.1 引伸模具尺寸及材料表

		尺寸 (mm)	材料
沖頭	R 角	6	SKD11
	直徑	30	
母模	R 角	6	SKD11
	內徑	32.6	
壓料板內徑		32	SKD11
壓料環厚度		1.0 & 1.2	SUS304
結構件	母模座		S45C
	母模支撐柱		S45C
	上模墊		S45C
	下模墊		S45C



圖 3.2 引伸模具組合圖



### 3.1.2 量測設備

本階段將建置伺服沖床之量測設備，透過與巨克富科技有限公司之合作，主要量測參數為加工時機台產生之力量及機台滑塊之位移。機台力量將安裝 150 噸級荷重元於沖床之下模座（JIHSENSE LM-150T）如圖 3.3 所示，藉此讀取引伸成形時之機台負荷。位移將使用電阻尺（Novotechnik TLM）如圖 3.4 所示，安裝於伺服沖床機台側壁，並將電阻尺之可動件固定於沖床之滑塊上，以量測滑塊移動時之位移數據。電阻尺及荷重元之訊號將藉由巨克富科技有限公司開發之量測系統 eStrain（型號：4B4V）輸入至電腦中並轉換為量測數據以進行資料處理。



圖 3.3 荷重元

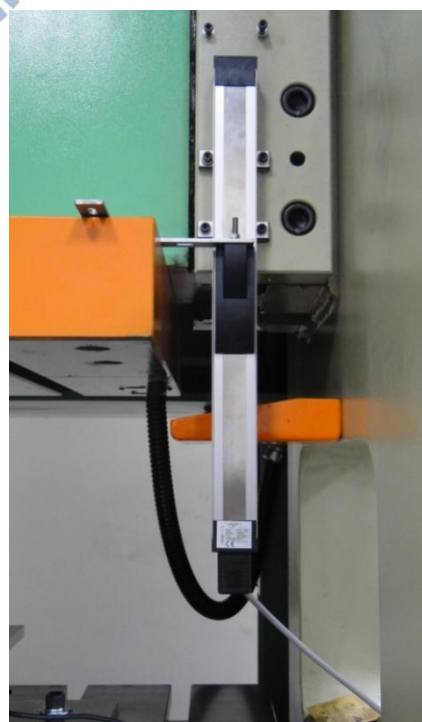


圖 3.4 電阻尺



### 3.2. 引伸成形試片尺寸之規劃

將板材 SPFC780Y 經由雷射切削加工成不同直徑之圓形試片，如圖 3.5 所示。引伸試驗將分為三階段。第一階段規劃試片以每 5mm 做一間隔，分別為直徑 50、55、60、65、70、75、80mm 之試片，在針對各尺寸之材料做引伸試驗後，藉由試驗結果判斷材料有無產生如圖 3.6 之破裂情形，以快速找出材料之引伸極限落於那一區間。第二階段將參照第一階段所得之材料區間，進一步細分材料直徑為每 1mm 做間隔，例如引伸極限落在 60mm-65mm 之區間內，則劃分試片直徑為 61、62、63、64mm 之大小，並持續做引伸試驗以找出更精確之材料臨界狀態。第三階段則根據第二階段之結果，選定一組位於材料引伸極限、且成形後發生破裂現象之試片尺寸，並設定伺服沖床為脈波式運動曲線，更改相關加工參數如壓料間隙、加工速度及潤滑狀態等，以觀察其對材料之成形性影響。

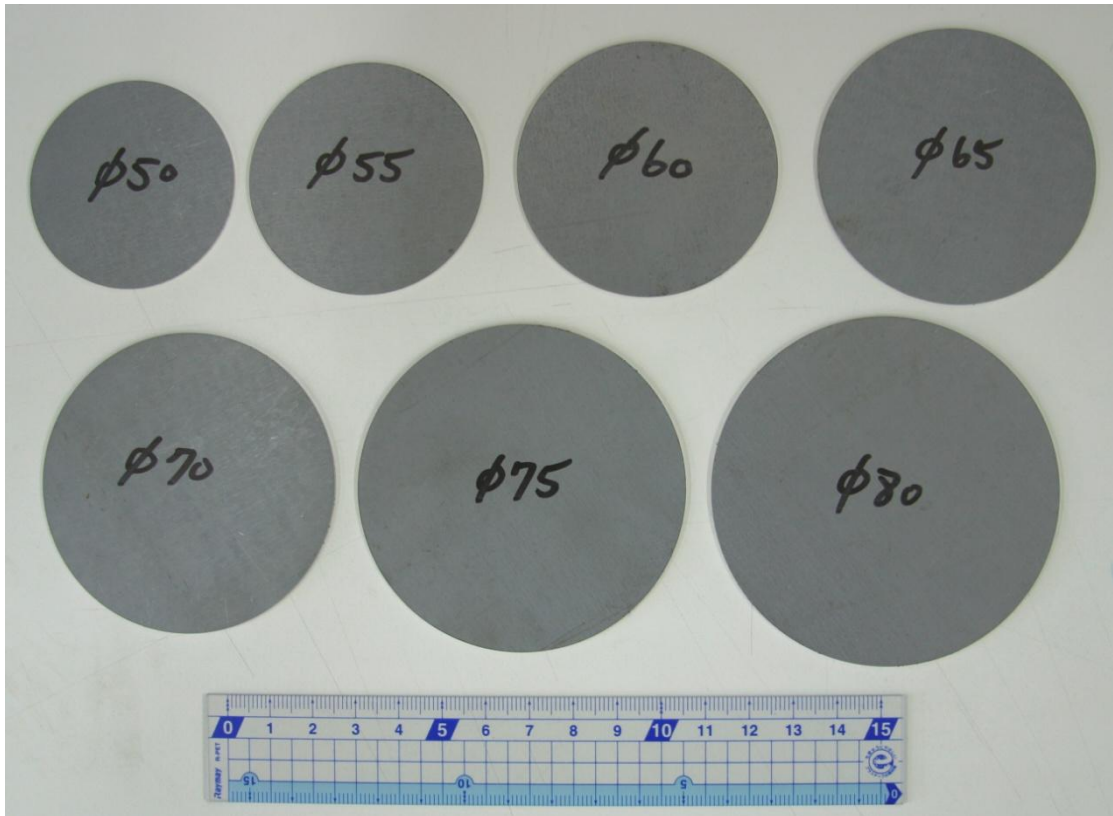


圖 3.5 第一階段各尺寸之試片



圖 3.6 引伸成品破裂情形（左：無破裂右：已破裂）

### 3.2.1 第一階段實驗結果

本階段將找出材料 SPCF780Y 之引伸極限對應之試片直徑。實驗參數方面設定機台滑塊轉速 為 1、5、10、20RPM，以比較加工速度對引伸成形之影響。圖 3.7 所示為各速度對應行程曲線圖，因本實驗之加工區間位於行程 5cm 至 15cm 之間，因此後續將取此區間內之平均速度作為沖頭加工速度，沖頭速度之轉換如表 3.2 所示。

材料之潤滑將針對以下三對產生相對移動之接觸對塗佈潤滑劑：

1. 壓料板與試片接觸
2. 沖頭與試片接觸
3. 母模與試片接觸



引伸成形使用之潤滑劑將選用國光牌通用機油 SAE-30，並均勻塗佈於以上三對接觸對以達成潤滑效果；本階段試驗將使用厚度為 1mm 之壓料環，置放於壓料板及母模間並用螺絲緊鎖壓料板和母模，以固定壓料間隙為 1mm。

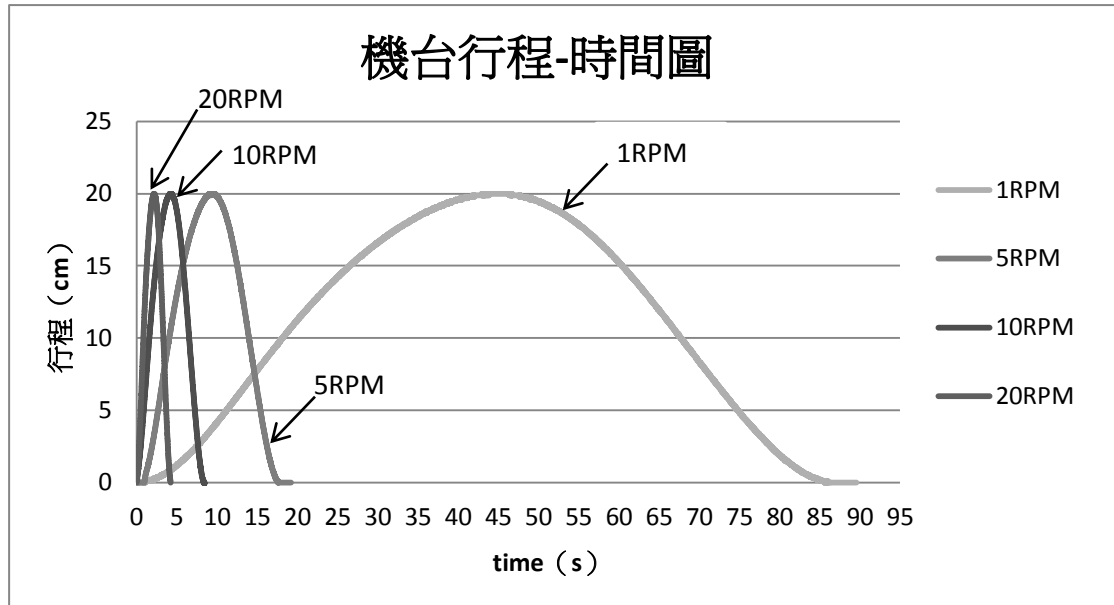


圖 3.7 滑塊速度對應行程-時間圖

表 3.2 滑塊速度對應沖頭速度表

滑塊速度 (RPM)	沖頭速度 (mm/s)
1	6.5
5	32.8
10	65.5
20	131.1

本階段之引伸結果如表 3.3 所示，可觀察出直徑為 50、55、60mm 之試片在各加工速度下均無破裂產生，當材料直徑為 65 及 70mm 時，材料發生破裂，如圖 3.8 所示。此為速度 6.5 (mm/s) 之各尺寸成形情形。由此結果觀察出本材料之最大引伸極限對應之試片直徑約發生在 60mm 至 65mm 之區間內，因此第二階段將板材切割為 61、62、63、64mm 之試片做引伸試驗以找出更精確之引伸極限。

表 3.3 第一階段引伸試驗結果

壓料間隙 1.0mm				
速度(mm/s) \ $\phi$ (mm)	6.5	32.8	65.5	131.1
50	O	O	O	O
55	O	O	O	O
60	O	O	O	O
65	X	X	X	X
70	X	X	X	X

(O) 表示材料未破裂 (X) 表示材料破裂

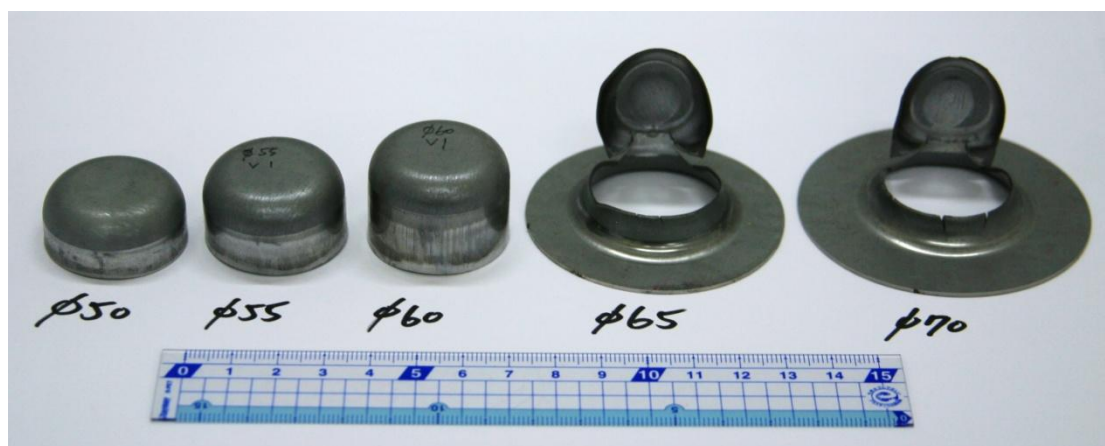


圖 3.8 第一階段試驗結果 速度 6.5 (mm/s)

### 3.2.2 第二階段實驗結果

本階段規劃兩種壓料間隙作為可更改之加工參數，分別為厚度 1.0mm 及 1.2mm 之壓料環，藉此觀察壓料板對試片產生之壓料力對引伸成形之影響。壓料間隙 1.0mm 之試驗結果如表 3.4 所示，61mm 及 62mm 之試片在各速度下皆無破裂，但是觀察直徑 63mm 之試片，可發現隨著加工速度增加至 32.8 (mm/s) 及 65.5 (mm/s) 時，試片未破壞之次數多於已破壞之次數。

表 3.4 第二階段引伸試驗結果-壓料間隙 1.0mm

壓料間隙 t=1.0mm				
速度 (mm/s) φ (mm)	6.5	32.8	65.5	131.1
64	X	X	X	X
63	XX	XX	OXOO	XO O
62	O	O	O	O
61	O	O	O	O

※表中 (OX) 表示試驗第一次無破裂，第二次破裂，以此類推

壓料間隙為 1.2mm 之試驗結果如表 3.5 所示，然而因為試片厚度為 1mm，因此在此條件下壓料板並未接觸材料，觀察試驗結果得出 61、62、63mm 之試片皆無破裂產生，相比於壓料間隙 1mm 之情況，直徑 63mm 之試片成形情況明顯改善且皆未出現破裂情形；而直徑 64mm 之試片在壓料間隙為 1.2mm 之條件下，相比於上一階段成形情況亦有改善，由此發現壓料間隙對於加工狀態有明顯影響。

表 3.5 第二階段引伸試驗結果-壓料間隙 1.2mm

壓料間隙 t=1.2mm				
速度 (mm/s)	6.5	32.8	65.5	131.1
$\phi$ (mm)				
64	X O O O	O O O O	XXOX	O X O O
63	O	O	O	O
62	O	O	O	O
61	O	O	O	O



### 3.2.3 第三階段實驗結果

本階段將更改試驗參數中之沖壓曲線，利用伺服沖床能任意改變加工曲線的特性觀察對引伸成形之影響，脈波運動的設定參考上一階段實驗中試片發生破壞當時之沖頭位置，嘗試在試片破壞前給予一脈波運動。因此設定一組脈波式沖壓曲線，如圖 3.9 所示，脈波運動之細部放大圖如圖 3.10 所示，本伺服沖床之自由曲線設定段數最多為 7 段，因此共有 3 次之沖頭回復。根據文獻[7]，脈波式運動曲線可改善加工情形，主因於當沖頭停止下降並上升時，潤滑劑會因真空吸力填補至沖頭上升造成的空隙中，以達成重新潤滑之效果並增加成形性，因此本階段將以摩擦條件當做另一加工參數，以研究潤滑劑之有無對脈波式曲線之影響。

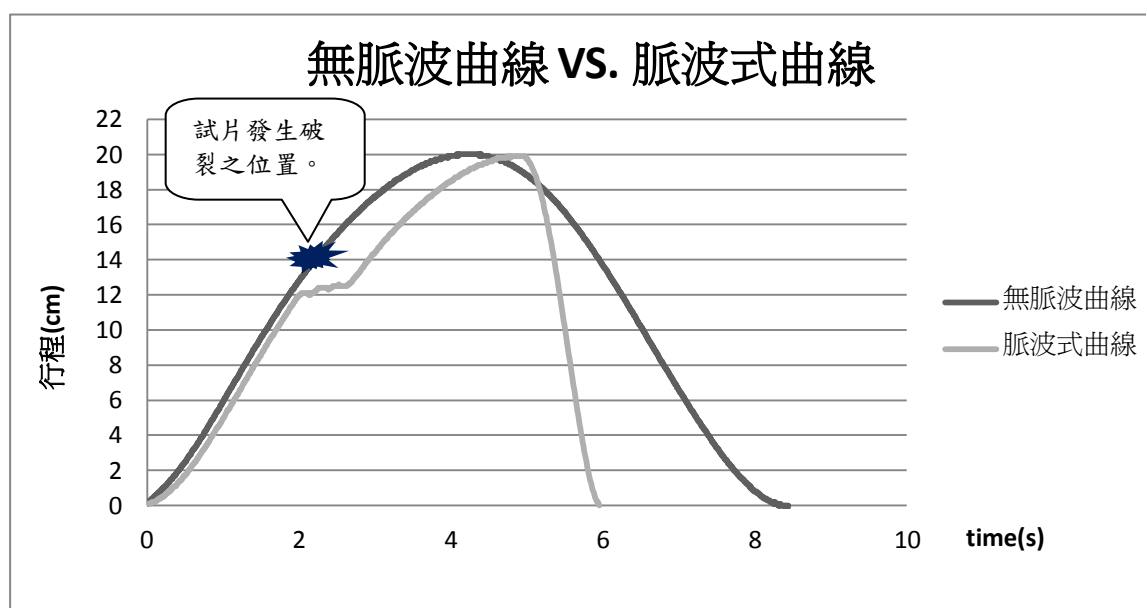


圖 3.9 無脈波曲線 VS.脈波式曲線圖



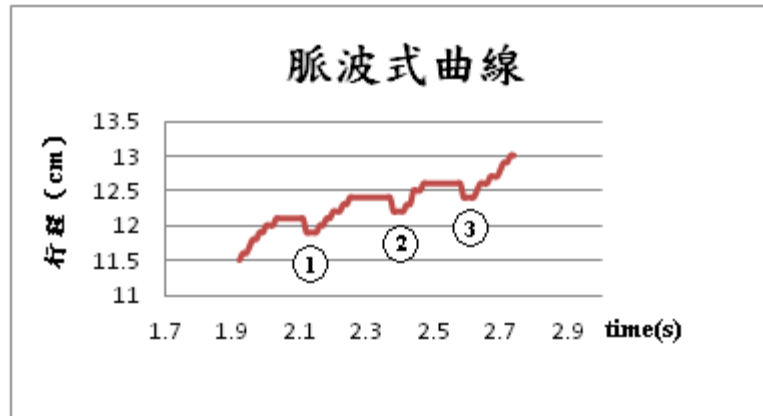


圖 3.10 脈波式曲線行程之細部放大圖

為探討潤滑劑之影響，將設定三組潤滑方式分別為：

1. 雙面潤滑：試片上下兩面皆塗佈潤滑劑。
2. 單面潤滑：試片與沖頭及壓料板側之接觸面均無塗佈潤滑劑，與母模接觸面則塗佈潤滑劑。
3. 無潤滑：試片兩面皆無塗佈潤滑劑。

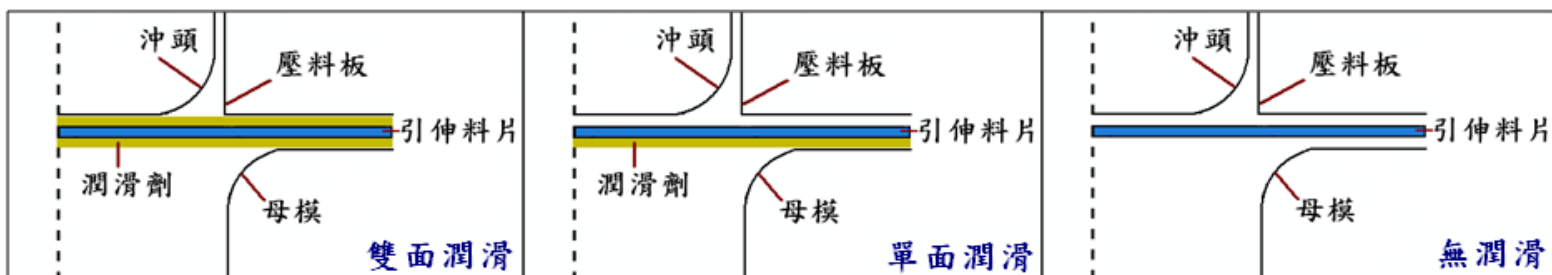


圖 3.11 潤滑方式示意圖

觀察表 3.6，直徑 64mm 試片在雙面潤滑情況下，不同壓料間隙之試驗結果，當壓料間隙為 1mm 時可發現即使利用脈波曲線做引伸加工，試片仍會發生破壞；但當壓料間隙為 1.2mm 時，試片有未破裂之情形產生，且在脈波曲線情況下試片亦無破裂。因此本階段將挑選速度 65.5 (mm/s) 之條件作為無脈波曲線並與脈波曲線做實驗對照，並在壓料間隙為 1.2mm 之情況下，更改三種潤滑條件以驗證文獻[7]所提出之重新潤滑理論。

表 3.6 直徑 64mm 試片之加工參數結果比較表

$\phi$ 64mm-壓料間隙 1.0&1.2mm-雙面潤滑					
操作條件 壓料間隙 t	速度 (mm/s)				脈波曲線
	6.5	32.8	65.5	131.1	
1.0mm	X	X	X	X	X
1.2mm	XOOO	Oooo	XXOX	OXOO	Oooo

更改潤滑條件之結果如表 3.7 所示，在無脈波之曲線下，單面潤滑四次試驗材料皆無發生破裂；無潤滑之結果如圖 3.12 所示，四次試驗中有一次材料發生破裂；而雙面潤滑之成形結果如圖 3.13 所示，四次試驗中有三次材料發生破裂。使用脈波曲線的結果顯示，無論在何種潤滑情況下，材料皆無破裂，此結果證明了伺服沖床脈波式運動曲線相較於傳統沖床運動曲線，具有改善加工成形性的特點。

表 3.7 不同潤滑條件之結果表

$\phi 64\text{mm}$ - 壓料間隙 1.2mm						
操作條件 實驗次數	單面潤滑		無潤滑		雙面潤滑	
	無脈波	脈波	無脈波	脈波	無脈波	脈波
1st	O	O	O	O	X	O
2nd	O	O	X	O	X	O
3rd	O	O	O	O	O	O
4th	O	O	O	O	X	O

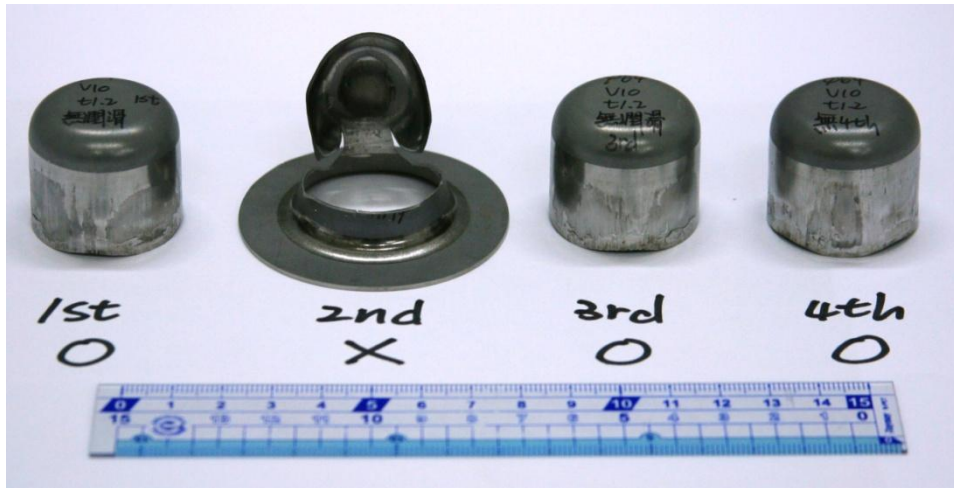


圖 3.12 直徑 64mm，無脈波曲線  
壓料間隙 1.2mm，無潤滑之成形結果。



圖 3.13 直徑 64mm，無脈波曲線  
壓料間隙 1.2mm，雙面潤滑之成形結果。

進一步比較各種潤滑情形下之沖壓力與行程的關係，圖 3.14 為單面潤滑之沖壓力歷程圖，在單面潤滑條件下，不論有無脈波運動，材料皆無發生破裂，由圖可發現無脈波及脈波曲線之最大沖壓力約為 8 噸，而脈波曲線之沖壓力歷程因沖頭回復而有三次下降之情況，因材料無發生破裂，因此兩種曲線之沖壓力歷程在最大沖壓力之後，隨行程增加而緩緩下降。

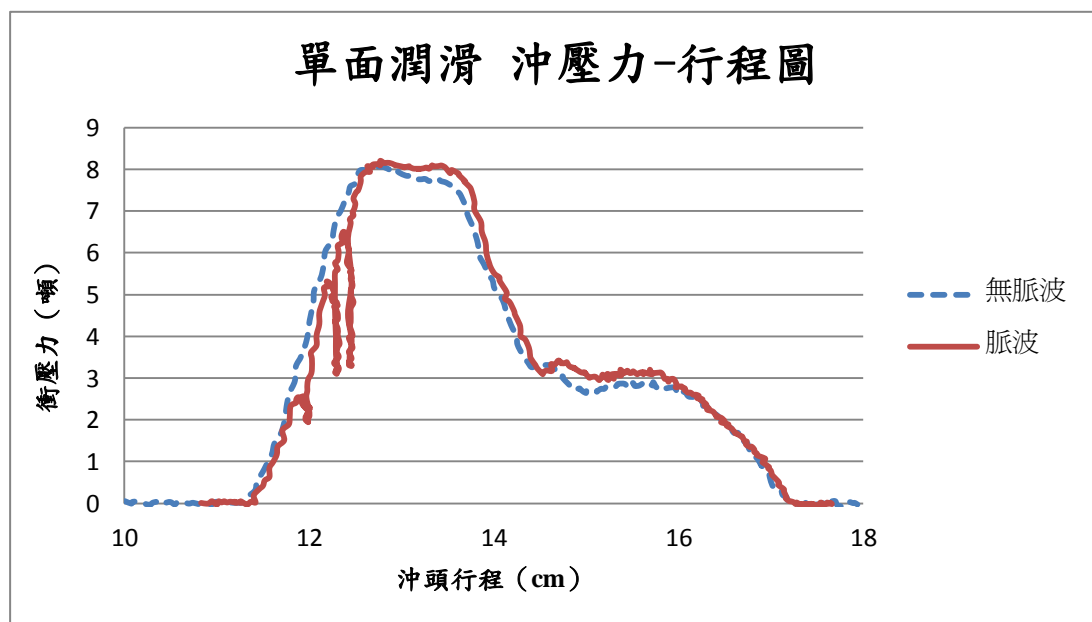


圖 3.14 單面潤滑之沖壓力-行程圖

無潤滑之沖壓力歷程圖如圖 3.15 所示，取四組實驗中之第二組實驗之數據做比較，無脈波曲線材料於虛線線段最高點發生破裂，破裂後之沖壓力會迅速下降；而脈波運動試片無發生破裂，其沖壓力隨行程緩慢下降，兩曲線之最大沖壓力約為 8 噸。

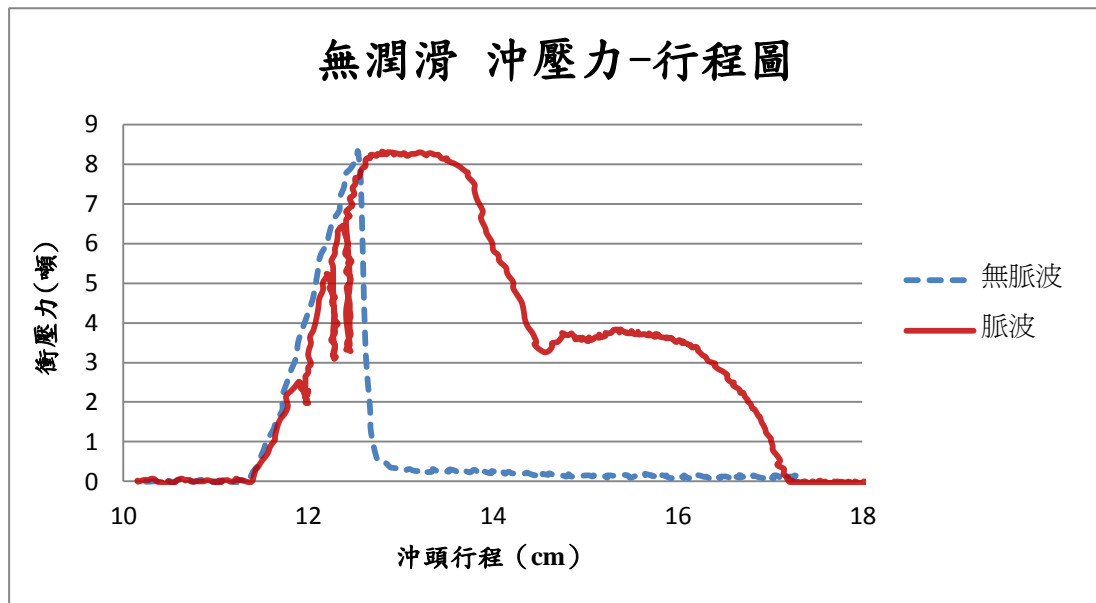


圖 3.15 無潤滑之沖壓力-行程圖

雙面潤滑之沖壓力歷程圖如圖 3.16 所示，取四組實驗中之第四組實驗之數據做比較，無脈波曲線之材料於虛線線段最高點發生破裂，破裂當時之沖壓力約為 7 噸，破裂後之沖壓力迅速下降；而脈波運動試片無發生破裂，最大沖壓力約為 8 噸。

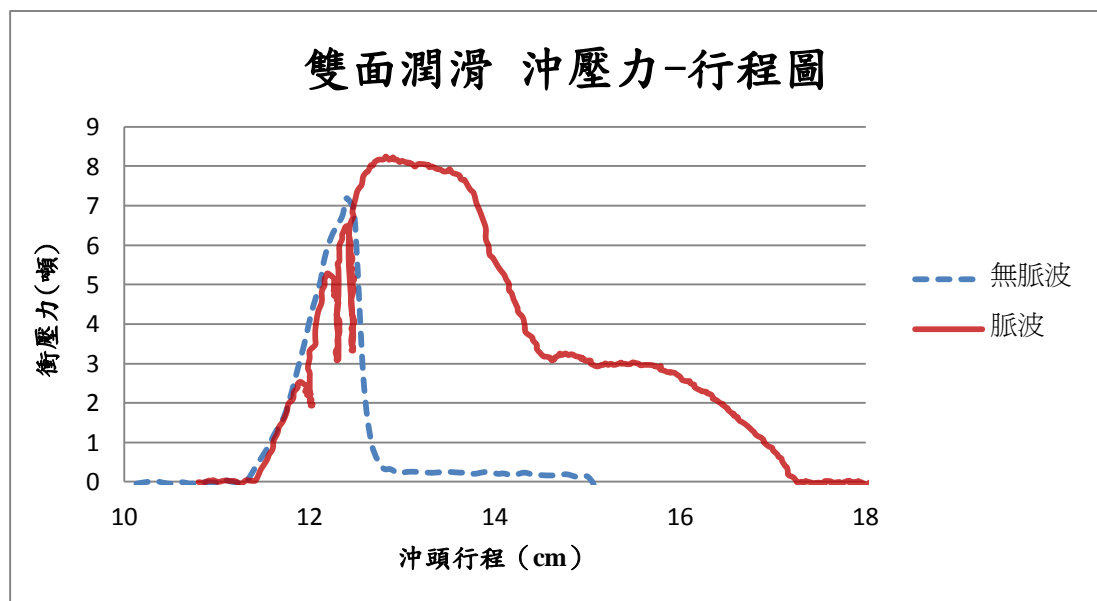


圖 3.16 雙面潤滑之沖壓力-行程圖



### 3.2.4 實驗結果討論

根據本試驗之結果顯示，第一階段觀察出材料之引伸極限約發生在 60mm 至 65mm 區間內，因此第二階段進一步細分試片直徑為 61mm-64mm，並使用兩組壓料間隙作試驗，結果發現壓料間隙為 1.2mm 時材料不易發生破裂，成形性較壓料間隙為 1.0mm 者佳，其次發現沖壓速度增加時，成形性亦有變佳之傾向。推測其原因為加工速度增加時，改善了試片與母模 R 角間之潤滑現象所造成。如圖 3.14 所示，當沖頭下降使試片產生引伸變形時，潤滑劑將被封閉於試片與母模間及試片與壓料板間。隨著加工進行，此封閉區內之壓力增高，此時潤滑劑將被強制送入母模 R 角與試片間，將會造成一強制潤滑之狀態。根據文獻[10]，當潤滑劑黏度越高或是加工速度越快時，強制潤滑的效果越明顯，而強制潤滑可降低引伸成形的力量並提昇材料引伸極限。

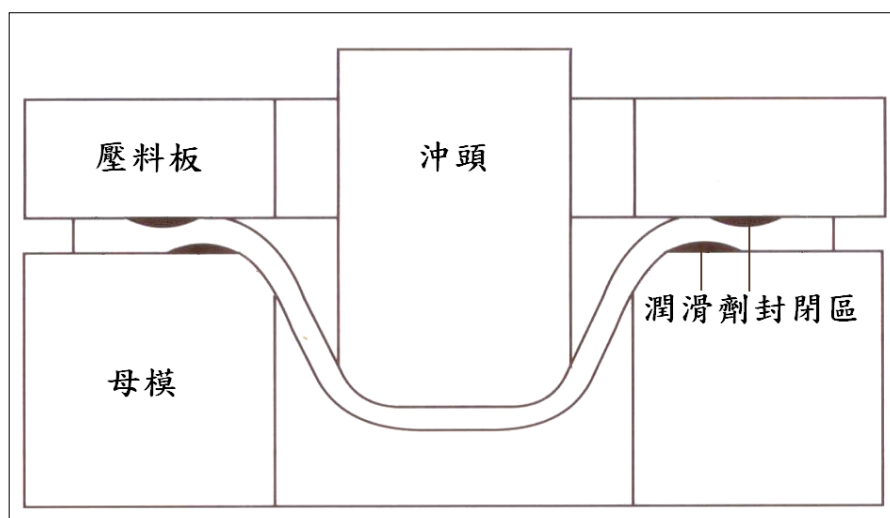


圖 3.17 潤滑劑之封閉現象示意圖[10]

此現象可解釋第二階段壓料間隙為 1.0mm 時，直徑 63mm 之引伸成形結果，當速度為 6.5 (mm/s) 及 32.8 (mm/s) 時試片皆發生破壞，當速度增加至 65.5 (mm/s) 及 131.1 (mm/s) 時，試片未破壞之次數多於破壞次數，顯示成形性因加工速度增加而有所改善。

第三階段討論不同潤滑模式以及加工曲線之關係，根據文獻[10]指出，提高沖頭側與試片間之摩擦力，可降低引伸成形時材料於沖頭 R 角部位之減薄率，進而提高材料發生破壞所需之力量以降低破斷發生之機率，因此可得知引伸成形的潤滑條件為單面潤滑效果優於雙面潤滑。此現象可解釋本階段試驗在無脈波曲線下之單面潤滑成形性優於雙面潤滑之結果。而脈波式運動曲線則不論於何種潤滑條件下，皆可改善加工成形性，使材料順利成形且無發生破裂，推斷其原因為脈波式運動造成潤滑劑重新潤滑並改善了引伸成形性，此現象與文獻[7]提及的重新潤滑理論可相互驗證。

進一步觀察第三階段各種潤滑情況及有無脈波曲線下之材料厚度分佈，於每一條件下取一組無發生破裂之試片，共六組試片，經由線切割將試片由中央切開，以量測試片各位置之厚度分佈情形。厚度量測點示意圖如圖 3.18 所示，由試片中央向外側經過 R 角至試片側壁共 7 點。

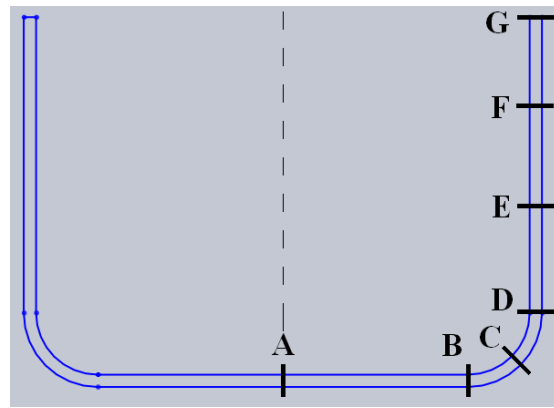


圖 3.18 試片厚度量測點示意圖

試片之各點厚度分佈如圖 3.19 所示，各條件下之 A、B、C、D、E 點厚度皆小於原板材厚度（1mm），顯示此區域之材料再加工後有變薄之傾向；而 F 及 G 兩點之厚度則大於 1mm，顯示材料側壁上端有變厚之傾向。為進一步觀察材料之成形情況，將針對 B、C、D 三點做詳細分析，經由量測材料之厚度並取平均值以及標準差，做各條件下之比較探討。

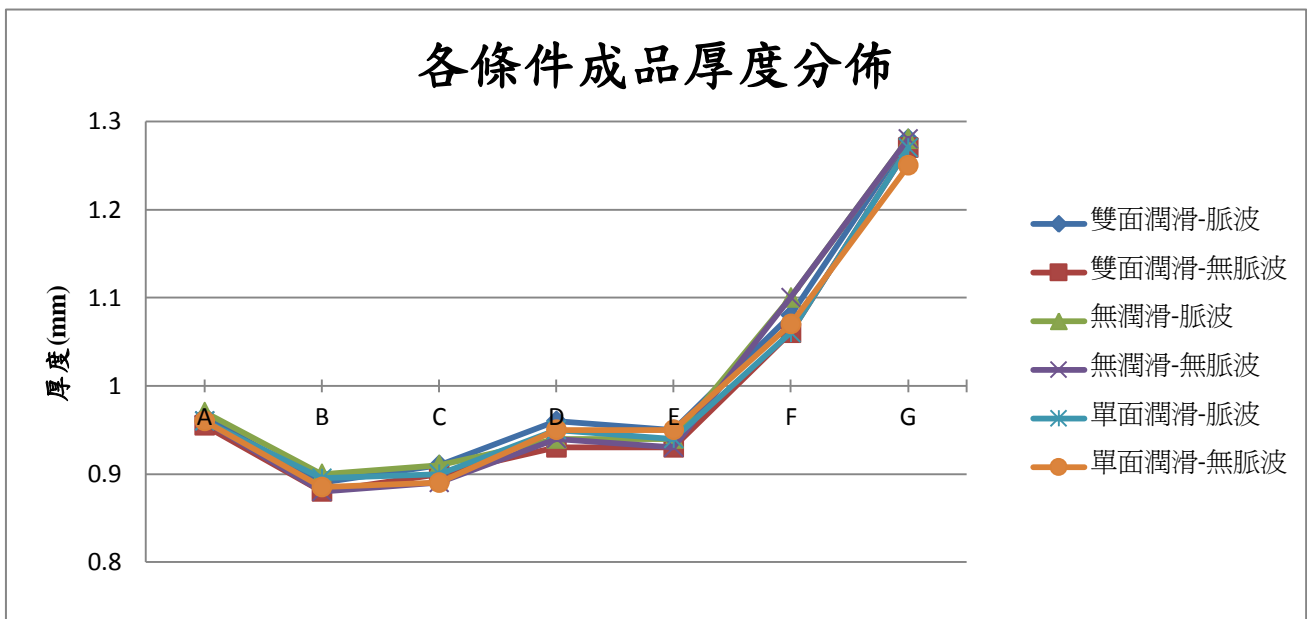


圖 3.19 各條件之成品厚度分佈圖

量測各條件試片之 B、C、D 三點厚度，量測方式為試片圓周方向每 45 度角量測一次，共量測 8 次，取其平均值並計算標準差，量測結果如表 3.8 所示，後續將分別比較各種條件下之厚度分佈情形。

表 3.8 B、C、D 三點之厚度平均值及標準差

B 點	單面潤滑		無潤滑		雙面潤滑	
	無脈波	脈波	無脈波	脈波	無脈波	脈波
平均值(mm)	0.880500	0.890625	0.877125	0.892500	0.883125	0.878750
標準差(mm)	0.005182	0.002134	0.004970	0.003780	0.009234	0.006409
C 點	單面潤滑		無潤滑		雙面潤滑	
	無脈波	脈波	無脈波	脈波	無脈波	脈波
平均值(mm)	0.895500	0.899750	0.886500	0.899375	0.896250	0.881250
標準差(mm)	0.012750	0.002188	0.009885	0.010836	0.018468	0.014577
D 點	單面潤滑		無潤滑		雙面潤滑	
	無脈波	脈波	無脈波	脈波	無脈波	脈波
平均值(mm)	0.936000	0.929125	0.931375	0.926250	0.935625	0.932500
標準差(mm)	0.008071	0.010670	0.009456	0.010938	0.009797	0.016903

圖 3.20 為單面潤滑之厚度分佈情形，可觀察出在厚度最薄處之 B 點，脈波曲線之厚度大於無脈波曲線，且脈波曲線之標準差小於無脈波曲線，顯示單面潤滑的情形下，脈波曲線之成形性較佳。

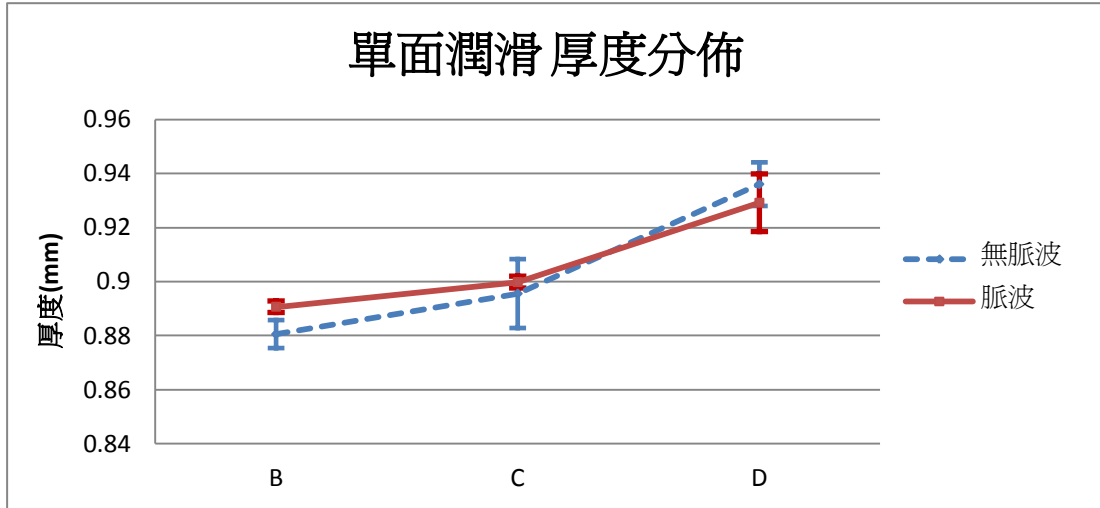


圖 3.20 單面潤滑之厚度分佈

圖 3.21 為無潤滑之厚度分佈情形，在最薄厚度 B 點處，脈波曲線之厚度大於無脈波曲線，而標準差相差不大，顯示在無潤滑的條件下，脈波曲線之成形性亦優於無脈波曲線。

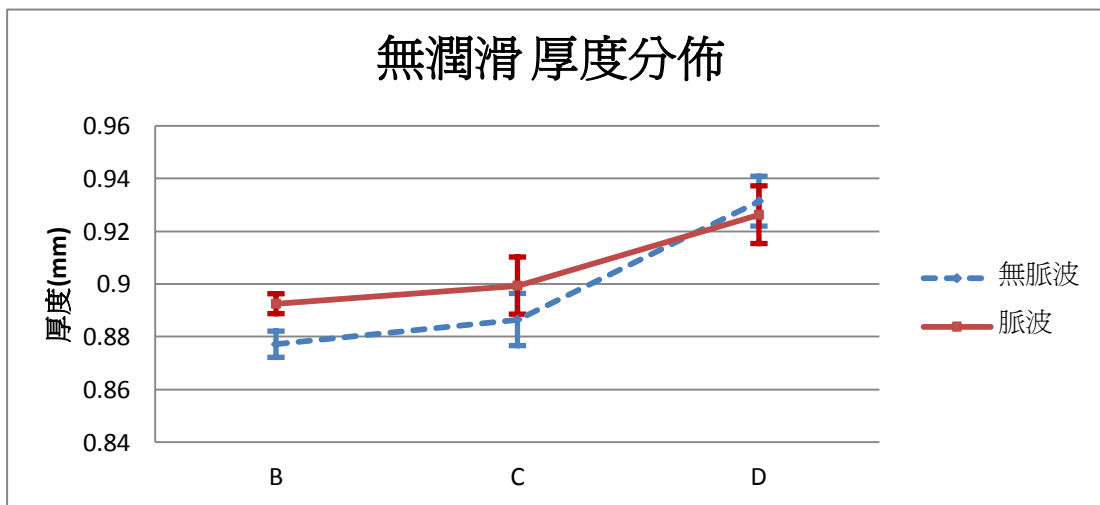


圖 3.21 無潤滑之厚度分佈

圖 3.22 為雙面潤滑之厚度分佈情形，在 B 點處因各曲線之平均厚度皆位於另一曲線之標準差內，顯示最薄厚度並無明顯差異，而 C、D 兩點也同此情形。又雙面潤滑且無脈波曲線下之試片，四片中只有一片無發生破裂情形，其餘三片皆發生破裂，因此推測無脈波之試片為較特殊之例外。

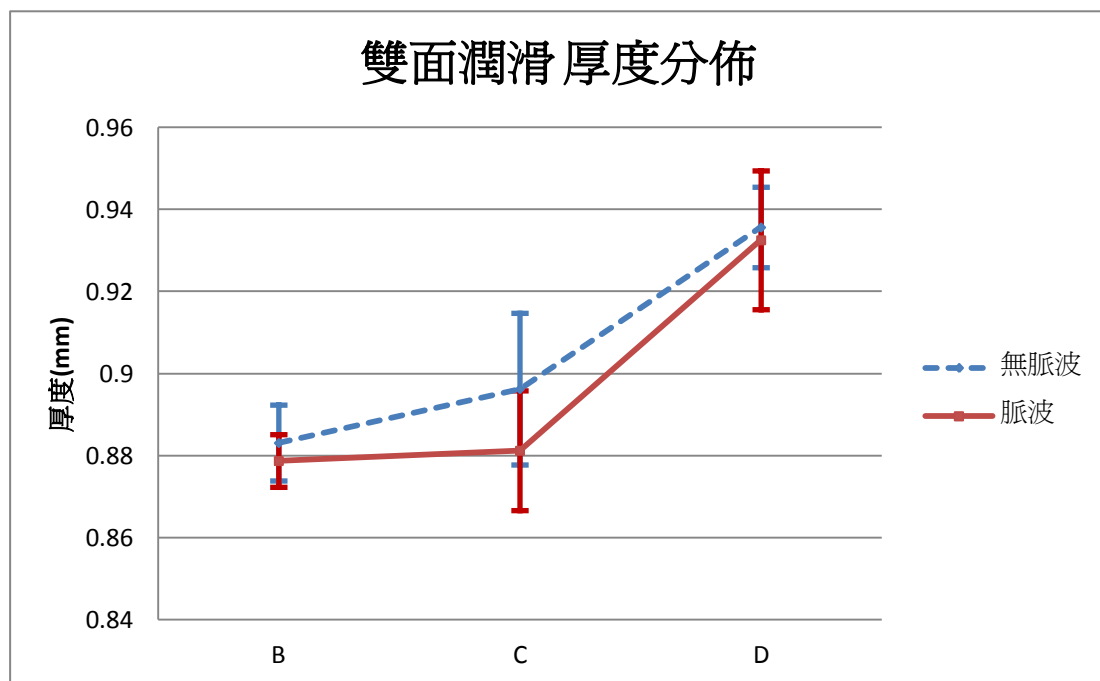


圖 3.22 雙面潤滑之厚度分佈

圖 3.23 為無脈波曲線之厚度分佈情形，比較各種潤滑情形之成形情況，可發現各試片之平均厚度皆位於其餘兩曲線之標準差內，各點厚度分佈差異並不明顯。

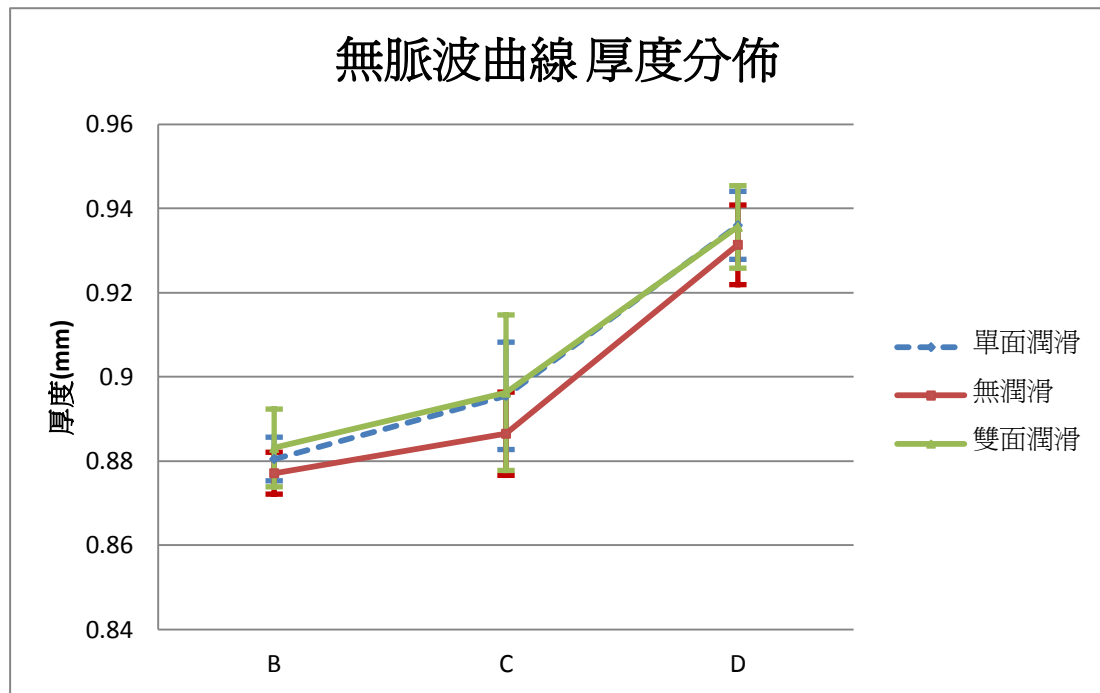


圖 3.23 無脈波曲線之厚度分佈



圖 3.24 為脈波曲線之厚度分佈情形，可看出 B 點處單面潤滑及無潤滑之厚度皆大於雙面潤滑，且標準差亦小於雙面潤滑之標準差，顯示在脈波曲線下，單面潤滑及無潤滑之成形性優於雙面潤滑。

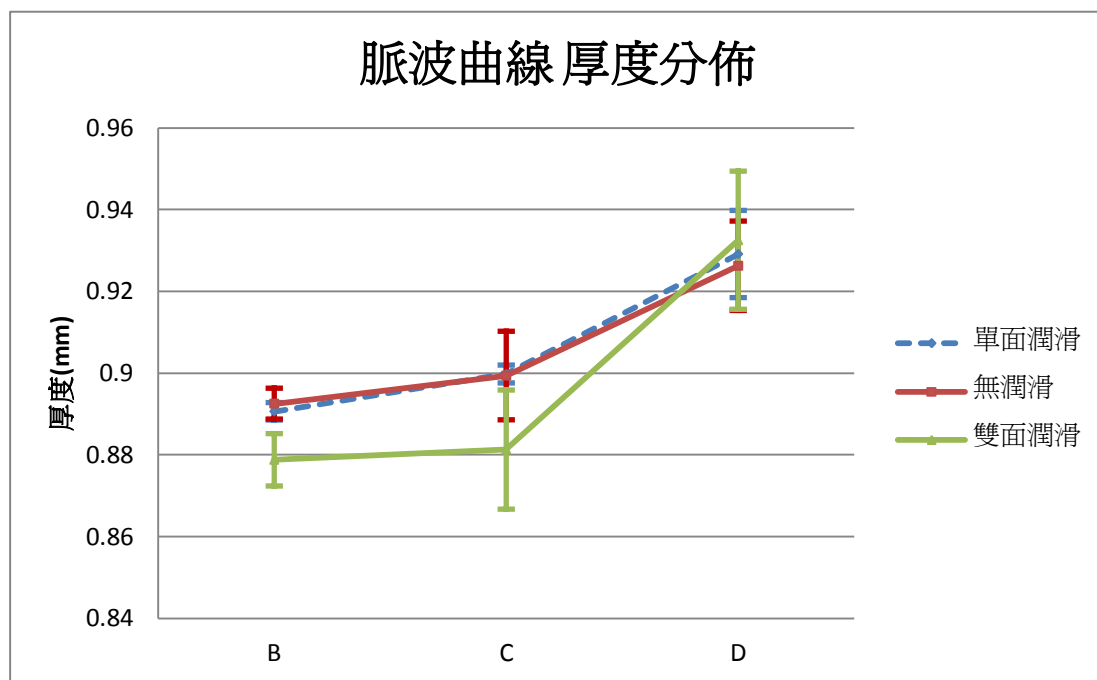


圖 3.24 脈波曲線之厚度分佈

下一章節將利用模擬軟體 Abaqus 模擬不同潤滑條件之引伸成形，以驗證伺服沖床脈波式運動造成潤滑劑重新潤滑並改善成形性之現象。

## 第四章 有限元素分析

由於科技的快速發展，產品設計趨於複雜、精密、高成本的同時，生產的技術必須隨之提升，若以傳統的試誤法（Trial and error）製作產品，不僅浪費時間更浪費金錢，並不符合經濟效益，加上某些產品的生產時程相當緊促，因此在研發上不容許採用試誤法來設計分析。

有限元素法（Finite element method）在工業界的應用已超過一百年的歷史。發展上從矩陣結構分析（Matrix structural analysis）的方法開始，首先將之應用於梁（Beam）及桁架（Truss）為主的鋼體結構上，而後將其理論應用至各個物理領域，例如熱傳、流固耦合等。目前利用有限元素分析（Finite element analysis）來進行產品模擬分析研究之技術已相當純熟，且有非常多的學者投入相關的研究發展。因為運用有限元素分析可以達成實際實驗難以實現之複雜問題，因此本章將針對高強度鋼板引伸成形進行有限元分析，並與實際成品相比對。

### 4.1. 有限元素分析系統

完整的有限元素分析系統包含三個部分：前處理器（Preprocessor）、計算求解（Calculation and solution process）、後處理器（Postprocessor）。此三部份分別說明如下，而有限元素分析大略

的設定流程如圖 4.1。

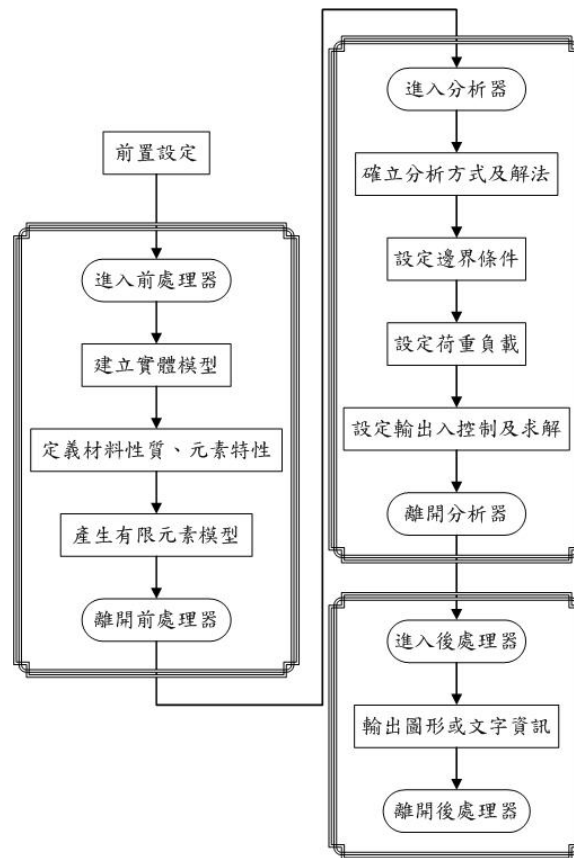


圖 4.1 有限元素軟體分析之流程圖

### (1) 前處理器：

簡單的幾何模型，可以很容易地用人工的方法建立，如圓球、長方體等規律的幾何形狀。然而，大部份的工程問題，幾乎不存在這種規律而簡單的結構或外型，對於複雜的工程問題，幾何模型的建立必須有一套好用的有限元素分析前處理器軟體。一個功能齊全的前處理器，應該包含了以下的幾點功能：

(a) 幾何模型的建立。

(b) 資料管理概念 (Data management concept)：將幾何模型參數

化並存在資料庫中，不同模組間可任意呼叫並修改參數。

(c) 幾何模型轉換 (Geometry translation): 可與 IGES 等標準案交換格式相互轉換。

(d) 建立網格 (Mesh)。

(e) 與其他有限元素分析軟體介面的整合：與其他有限元素軟體產生的檔案互相轉換。

## (2) 計算求解：

針對所有節點和元素計算應力、應變、位移、負載，能量和壓力等，處理一般線性或非線性問題。

有限元素法應用於分析塑性變形時，主要是按照模具及板件的幾何形狀切割成由節點 (Node) 構成的元素 (Element)，在求解器中求取每一個元素之勁度矩陣 (Stiffness matrix)，後續在結合所有元素之勁度矩陣後，得到全域勁度矩陣。在計算過程中，藉由不同的材料應力-應變模式，得到本構方程式 (Constitutive equations)，並配合應力平衡關係式及邊界條件，計算出整體應力、應變分佈及外力等數據。

## (3) 後處理器：

後處理器可將運算所得之結果如位移、應力、應變、應變率等，由圖表方式顯示並可依照需求輸出圖檔及數據，以作為分析結果的呈現。

## 4.2. 軟體介紹－Abaqus

考慮引伸成形過程中，板件將產生大變形，導致模擬過程不易收斂，進而造成錯誤的結果與分析時間的耗費，因此本研究將採用有限元素軟體 Abaqus 進行有限元素分析。

美國 Abaqus 公司於 1978 年推出的 Abaqus 有限元素分析軟體，在全球工業界中，已被公認是一套解題能力最強、分析結果最可靠的軟體。Abaqus 是一套功能強大的工程模擬軟體，具有整合式與自動化的前後處理器與解析功能，提供非常直覺的介面，最符合設計人員、設計工程師及分析工程師的需求。其支援多項元素分析類型與材料性質，可進行線性與非線性的問題分析，並且在模擬中，Abaqus 能夠自動調整時間增量（Time increment）與收斂公差，讓模擬結果更為精準。其被廣泛地使用在線性及非線性分析上；解題範圍廣泛而深入，是作為研究或是實際工業應用的最佳選擇。在靜態應力分析的部份，不考慮慣性效應的應力分析，其中非線性領域更是 Abaqus 最擅長的問題，包括：

- (1) 材料非線性問題：包括塑性變形、黏塑性材料及非線彈性材料等。
- (2) 幾何非線性問題：包括物體受力產生受大位移、大應變、過挫曲及潰壞等問題。

(3) 邊界非線性問題：以有間隙的物體受力變形後接觸問題為代表。

前後處理的部分，Abaqus/CAE 提供簡易介面，讓使用者能利用幾何進行模型建立、材料性質定義、邊界條件設定、建立網格等，從建構模型、解題到觀看分析結果，淺顯易懂，一氣呵成。

### 4.3. 有限元素模型之基本假設

本研究採用Abaqus有限元素程式進行分析，將建立在以下幾個基本假設之上進行設定：

- (1) 假設引伸用板材為一均質 (Homogeneous) 且具等向性性質 (Isotropic) 之彈塑性 (Elasto-plastic) 材料。
- (2) 不考慮沖頭、沖模之變形，將其定義為剛體 (Rigid body)。
- (3) 僅針對加工區域進行成形模擬。
- (4) 材料加工時不考慮應變率之影響。
- (5) 材料加工時不考慮溫度之影響。

## 4.4. 模擬傳統沖床及伺服沖床運動曲線

根據第三章第三階段之實驗結果，伺服沖床之運動曲線相比於傳統沖床可增加材料之引伸成形性。因此本節將模擬傳統沖床無脈波曲線及伺服沖床脈波曲線在不同潤滑條件下之差別，將使用 Abaqus/Standard 作軸對稱形式的模擬，並在後處理當中觀察材料之最薄厚度作為評斷成形性之參考，因引伸成形材料會發生破裂大多起因於材料局部發生劇烈減薄現象，導致沖壓力大於材料自身強度進而產生破壞，因此觀察成形後材料之最薄厚度，可判斷成形性之優劣程度。

### 4.4.1 引伸模擬模型建立

本模擬將使用軸對稱模型，利用 Abaqus 前處理器建立零件包括沖頭、母模、壓料版及引伸料片（直徑 64mm），此處之壓料間隙將設定為 1.2mm 以作為控制壓料條件之參數。引伸料片之材料性質將輸入第二章對 SPCF780Y 所作之拉伸試驗數值，並設定其餘部件為剛體。經收斂測試後（表 4.1 及圖 4.2），網格劃分選擇將料片切割為厚度方向 4 層，長度方向 128 層，模擬模型配置圖如圖 4.3 所示，並使用軸對稱減積分元素 CAX4R 作為網格元素，如圖 4.4 所示。



表 4.1 網格收斂性測試

厚度方向網格數量	網格尺寸大小 (mm)	運算時間(s)	最小厚度 $t$ (mm)
2	0.50	56	0.90
3	0.33	81	0.89
4	0.25	121	0.89
5	0.20	179	0.89

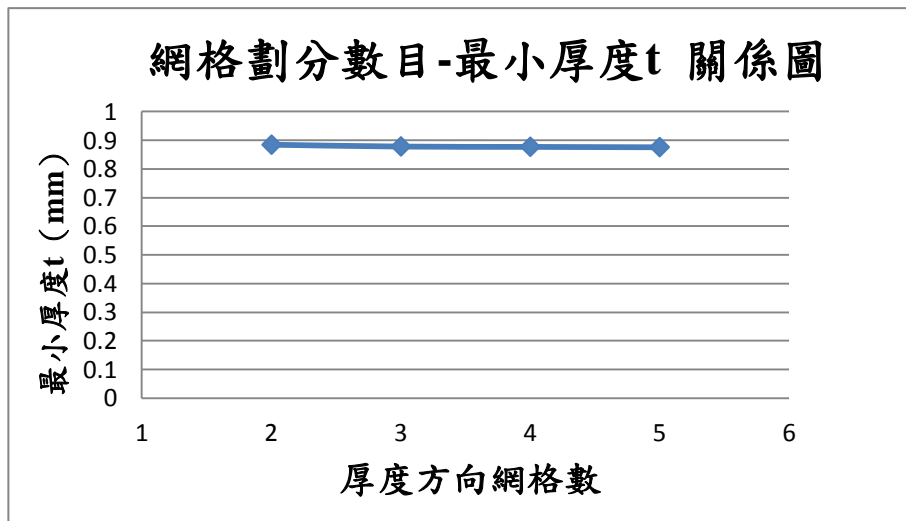


圖 4.2 網格收斂性測試趨勢圖

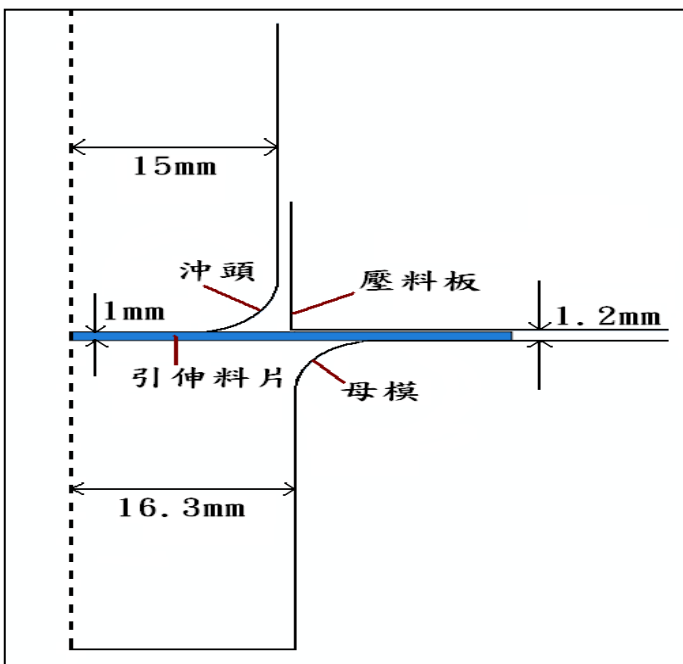


圖 4.3 模擬模型配置圖

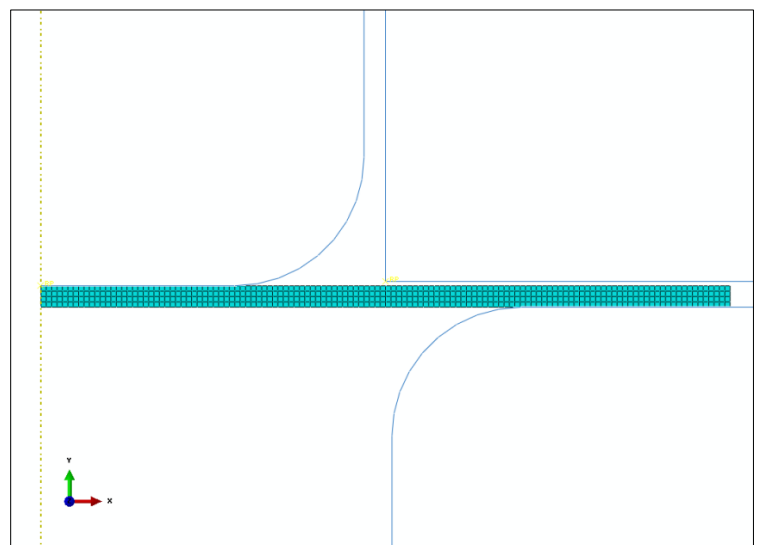


圖 4.4 模型網格劃分示意圖

#### 4.4.2 邊界及摩擦條件設定

為模擬傳統沖床及伺服沖床之運動曲線，給定沖頭行程如圖 4.5 所示，為簡化模型，本階段僅模擬沖頭接觸材料至材料完全流入母模模穴之成形區間，行程為 0mm 至 36mm。而如同實際伺服沖床之設定，脈波式運動曲線包含三次沖頭回復之路徑，而對應之 65.5 (mm/s) 曲線則為直接給定沖頭行程 36mm。

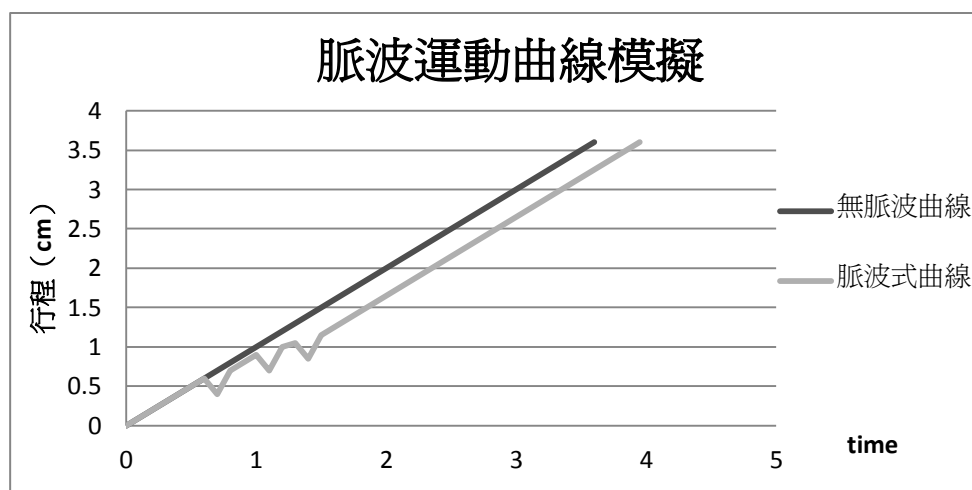


圖 4.5 脈波運動曲線示意圖

摩擦條件設定為本階段之重點，根據文獻[8]，沖頭上升之動作能造成重新潤滑的效果，因此本模擬假設當沖頭下降時，引伸料片與沖頭 R 角及母模 R 角間之潤滑劑會因接觸而被擠出，造成摩擦係數增加，而沖頭上升時，潤滑劑重新填補母模及沖頭 R 角，使摩擦係數下降，因此本模擬將參考文獻[6]，設定庫倫摩擦係數介於 0.1 至 0.3

之間，並以摩擦係數 0.1 代表充分潤滑之情況；0.3 表示潤滑劑被完全擠出之無潤滑情況。將設定 65.5 (mm/s) 運動曲線之摩擦係數  $\mu$  如表 4.2 所示，在雙面潤滑之情況下，試片與沖頭及母模間之摩擦係數隨著沖頭每下降 1mm，摩擦係數增加 0.04，以模擬潤滑劑被擠出之情況，直到沖頭下降至 6mm 時，摩擦係數增加至 0.3 如圖 4.6 所示，往後之行程因假設潤滑劑完全被擠出，設定為無潤滑之情況，此時摩擦係數等於 0.3。而單面潤滑及無潤滑之情況則設定無塗佈潤滑劑之面在整個行程中之摩擦係數為 0.3。

表 4.2 無脈波運動曲線摩擦係數設定

65.5 (mm/s) 曲線摩擦係數設定						
沖頭行程 (mm)	雙面潤滑		單面潤滑		無潤滑	
	沖頭 $\mu$	母模 $\mu$	沖頭 $\mu$	母模 $\mu$	沖頭 $\mu$	母模 $\mu$
1	0.10	0.10	0.30	0.10	0.30	0.30
2	0.14	0.14		0.14		
3	0.18	0.18		0.18		
4	0.22	0.22		0.22		
5	0.26	0.26		0.26		
6	0.30	0.30		0.30		
6 至 36	0.30	0.30	0.30			

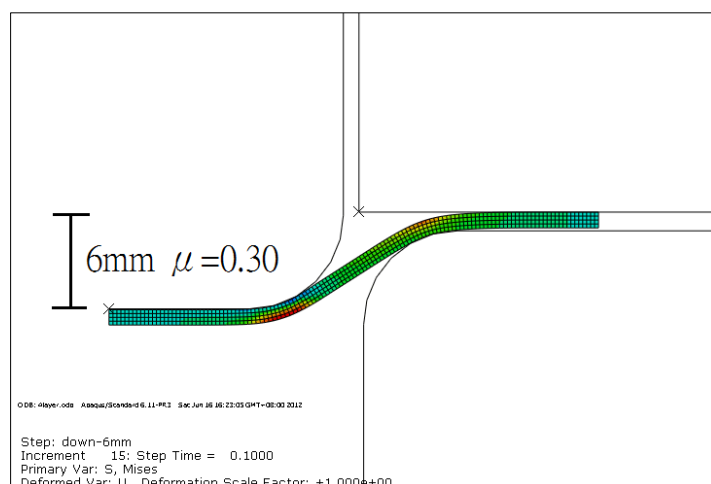


圖 4.6 沖頭下降 6mm 時摩擦係數示意圖

而脈波式運動曲線之摩擦係數將設定如表 4.3 所示，針對沖頭上升之階段，摩擦係數將回復至 0.1，並隨著沖頭繼續下降，以沖頭每下降 1mm，摩擦係數增加 0.04 之方式，直到等於 0.3 為止。

表 4.3 脈波運動曲線摩擦係數設定

脈波運動曲線摩擦係數設定						
沖頭行程 (mm)	雙面潤滑		單面潤滑		無潤滑	
	沖頭 $\mu$	母模 $\mu$	沖頭 $\mu$	母模 $\mu$	沖頭 $\mu$	母模 $\mu$
1	0.10	0.10	0.3	0.10	0.3	0.3
2	0.14	0.14		0.14		
3	0.18	0.18		0.18		
4	0.22	0.22		0.22		
5	0.26	0.26		0.26		
6	0.30	0.30		0.30		
沖頭上升 6 至 4	0.10	0.10		0.10		
沖頭下降 4 至 7	0.10	0.10		0.10		
8	0.14	0.14		0.14		
9	0.18	0.18		0.18		
沖頭上升 9 至 7	0.10	0.10		0.10		
沖頭下降 7 至 10	0.10	0.10		0.10		
10.5	0.12	0.12		0.12		
沖頭上升 10.5 至 8.5	0.10	0.10		0.10		
沖頭下降 8.5 至 11.5	0.10	0.10		0.10		
12.5	0.14	0.14		0.14		
13.5	0.18	0.18		0.18		
14.5	0.22	0.22		0.22		
15.5	0.26	0.26		0.26		
16.5	0.30	0.30		0.30		
16.5 至 36	0.30	0.30	0.30			

### 4.4.3 模擬結果與討論

本模擬將找出各模擬結果之最薄厚度  $t$ ，如圖 4.7 所示，以作為材料成形性之判斷標準，試片原厚度為 1mm，因此材料引伸成形後之最薄厚度越接近 1mm 者其成形性越佳。

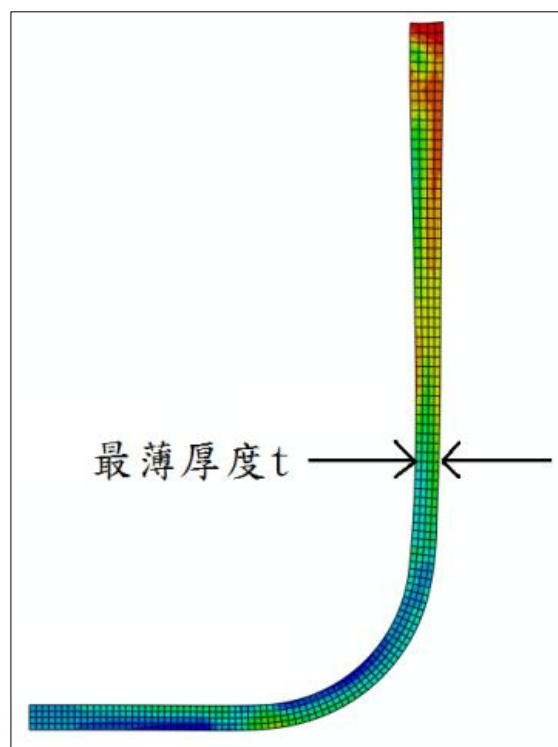


圖 4.7 材料最薄厚度  $t$  示意圖

模擬結果如表 4.4 所示，計算六組模型最薄厚度  $t$ ，可發現在無脈波曲線下，不論何種潤滑情形，其厚度  $t$  相差不大；但在脈波曲線下，最薄厚度  $t$  則為單面潤滑 > 雙面潤滑 > 無潤滑，且無潤滑的情況下兩種曲線結果差不多。結果顯示只要在塗有潤滑劑的情況，不論單面或雙面潤滑，在脈波式運動曲線條件下其最薄厚度  $t$  皆大於無脈波曲線，顯示其成形性變佳。

因此本模擬可驗證，伺服沖床之脈波運動影響加工成形性的因素為潤滑劑因沖頭上升造成之重新潤滑效果，並且解釋了實際引伸實驗時，脈波曲線增加材料成形性之機制。



表 4.4 引伸成形模擬結果

引伸試片最薄厚度 $t$ (mm) 原試片厚度=1mm		
	65.5 (mm/s)	脈波曲線
單面潤滑	0.89	0.92
雙面潤滑	0.89	0.91
無潤滑	0.89	0.89

## 第五章 結論與未來工作

### 5.1. 結論

本研究實際建置一引伸模具於伺服沖床機台上，並完成對高強度鋼板引伸成形之實驗及有限元素分析模擬，藉由實驗及模擬可得知伺服沖床相較於傳統沖床，可增加高強度鋼板之引伸成形性。

#### 5.1.1 引伸成形試驗

為驗證伺服沖床具有優於一般傳統沖床之加工能力，本階段選用厚度為 1mm 之高強度鋼板 SPFC780Y 作為引伸用板材，並設計一引伸模具包含沖頭、壓料板、母模等零件組裝於伺服沖床機台上，機台並配置荷重元及電阻尺以讀取力量及位移值。為求得此試片之引伸極限，第一階段規劃較大尺寸範圍之試片（50mm 至 80mm）且每 5mm 取一區間，分別做引伸試驗後得知材料之引伸極限對應之試片直徑位於 60mm 至 65mm 之區間內。第二階段再細分為 61mm、62mm、63mm、64mm 之試片，並更改壓料間隙為 1.0mm 及 1.2mm，以找出更精確之引伸極限發生條件。結果顯示當加工速度增加時其成形性變佳，且壓料間隙為 1.2mm 時之成形性優於 1.0mm，本階段亦找出 SPFC780Y 之 LDR 約等於 2.06。第三階段則選定一組直徑 64mm 之試片，並更



改加工條件包括潤滑條件及加工曲線，藉此驗證脈波式運動曲線對於成形性之影響。相比於傳統沖床無脈波曲線之成品會產生破裂情形，在伺服沖床脈波曲線下材料皆無產生破裂，因此本階段證實伺服沖床之脈波曲線確實可改善成形性。

### 5.1.2 引伸成形模擬

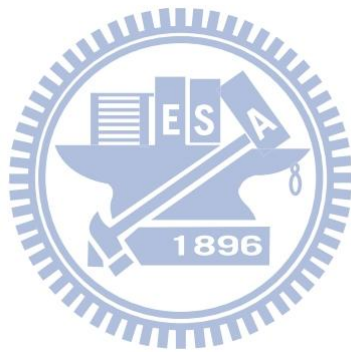
為探討伺服沖床脈波曲線改善成形性之原因，更改模擬中摩擦條件之設定為摩擦係數隨沖頭行程改變，且在脈波曲線中沖頭上升階段，摩擦係數會隨之降低，最後以材料模擬成形後之最薄厚度作為判斷成形性之依據。模擬結果顯示脈波曲線在雙面潤滑及單面潤滑之條件下，其最薄厚度相比於無脈波曲線皆有改善，因此本模擬證明了脈波式曲線的確因重新潤滑的效果，改善了高強度鋼板之引伸成形性。

## 5.2. 未來工作

本研究主要利用伺服沖床針對高強度鋼板做引伸成形，伺服沖床有別於傳統沖床，其優點為適用多種型態之加工，並可任意調整加工曲線以符合設計需要；而隨著環保意識升高與油價上漲，未來使用高強度鋼板取代一般鋼板做為汽車結構件之比例將會越來越高。然而高強度鋼板在成形方面仍有許多問題尚待解決，其最大的問題在於成形後金屬回彈現象大於一般鋼板，因此相對應之模具設計亦須更精確之設計，若能搭配伺服沖床之特性，利用如本研究之脈波運動曲線針對高強度鋼板回彈現象做探討，在未來的確是可深入研究之課題。以下將列出 5 點未來可發展方向：

1. 可使用不同種類之潤滑方式以探討摩擦條件對成形性之影響，例如更換不同種類之潤滑劑或是於模具表面鍍上特殊抗磨耗表層，例如鐵氟龍或是氮化鈦薄膜。
2. 設計一新型壓料板裝置以精確控制壓料力量，並研究壓料力量對引伸成形之影響，並可找到最適合引伸加工之壓料方式，例如使用程式控制可隨沖頭行程改變壓料力量之壓料裝置。
3. 設計一摩擦係數量測系統，量測在不同潤滑情況下，模具與板材間之摩擦係數，以做更精確之成形模擬。

4. 針對較複雜之成品外形設計模具，如方筒、異形筒等形狀，並利用伺服沖床加工特性做成形性研究。而本研究以材料有無發生破裂作為判斷成形性之依據，未來則可依材料發生破裂時之成形深度作為判斷成形性之量化指標。
  
5. 研究指出熱間加工可改善高強度鋼板之成形性並減少回彈現象產生，因此可設計一具升溫功能及冷卻系統之模具，研究高強度鋼板在高溫環境下之成形性。



## 參考文獻

- [1] 機械與金屬，汽車超高強度鋼薄板選用和加工，金屬中心ITIS計畫整理，2004年六月號
- [2] 林龍震老師工作室，『沖壓模具設計基礎』，金禾資訊，二版，2006
- [3] K. Mori, K. Akita and Y. Abe, “Springbackbehaviour in bending of ultra-high-strength steel sheets using CNC servo press”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 47 (2007) 321–325
- [4] H. Kim, S. Han, Q. Yan and T. Altan, “Evaluation of tool materials, coatings and lubricants in forming galvanized advanced high strength steels (AHSS)”, CIRP Annals - Manufacturing Technology 57 (2008) 299–304
- [5] H. Kim, T. Altan and Q. Yan, “Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels(AHSS) using deep drawing and ironing tests”, Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) 4122–4133
- [6] W. Wang, C. He, Z. Zhao and X. Wei, “The limit drawing ratio and formability prediction of advanced high strength dual-phase steels”, Materials and Design 32 (2011) 3320–3327
- [7] T. Maeno, K. Osakada and K. Mori, “Reduction of friction in compression of plates by load pulsation”, International Journal of Machine Tools & Manufacture 51 (2011) 612–617
- [8] 元翎精密工業股份有限公司，<http://www.twmosa.com>
- [9] 林樹均、葉均蔚、劉增豐、李勝隆，『材料工程實驗與原理』，初版，全華，1990
- [10] 片岡征二原著、黃錦鐘編譯，『沖壓加工的磨潤學』，全華，2003
- [11] 愛發股份有限公司，『ABAQUS 實務入門引導』，全華，2005

## 附錄 A

### 安全氣囊氣體發生器下外殼引伸成形模擬

本階段將模擬安全氣囊氣體發生器下外殼之各道次成形，目的為驗證利用 Abaqus 所建立之模型其模擬結果與成品之準確性，以作為日後模擬引伸成形設計之參考。

#### A.1 取得坯料尺寸及模具外型

本部份將以安全氣囊氣體發生器之下外殼作為載具，下外殼具有四道次之引伸加工，在只有最後一道次之原始設計圖情況下(圖 A.1)，下外殼之第一、第二、第三道次皆需進行逆向工程以求得尺寸形狀，並藉由 CAD 軟體繪製其外型，進一步取得其模具原始形狀，取得模具形狀後便可藉由 Abaqus 模擬各道次之成形。

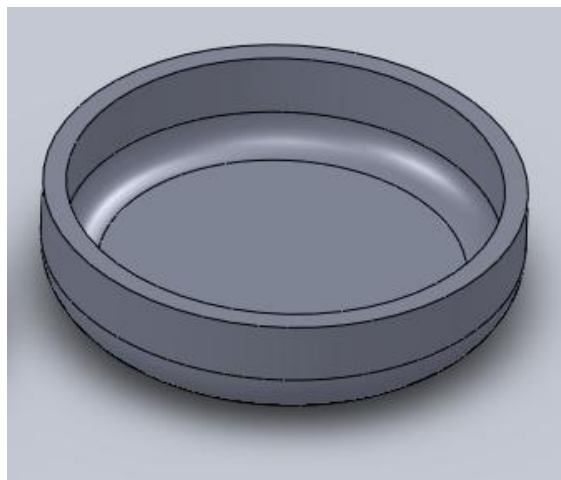


圖 A.1 使用 CAD 軟體繪製之安全氣囊下外殼 3D 圖

而坯料尺寸則藉由體積換算法推得原始尺寸，即假設材料體積不變，引伸加工前之體積等於加工後之體積，又圓筒引伸成形之坯料為圓形具厚度之板材，則經由式 A.1 即可推導出坯料尺寸。

$$V = \pi r^2 h \quad (\text{A.1})$$

其中  $V$ ：加工後之體積、 $r$ ：坯料半徑、 $h$ ：坯料厚度

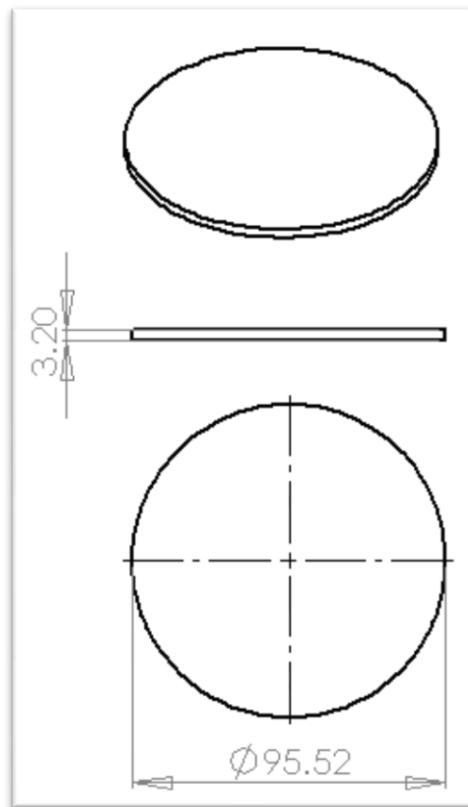


圖 A.2 圓形坯料尺寸 (mm)

因實際模具構造相當複雜，本研究之模具外型尺寸將予以簡化以節省模擬計算時間，因此外殼具典型軸對稱結構，因此在 Abaqus 內將使用軸對稱的方式建置模型。以下將用圖示 (圖 A.3、A.4、A.5) 標示各道次之模型配置，尺寸單位皆為 (mm)：

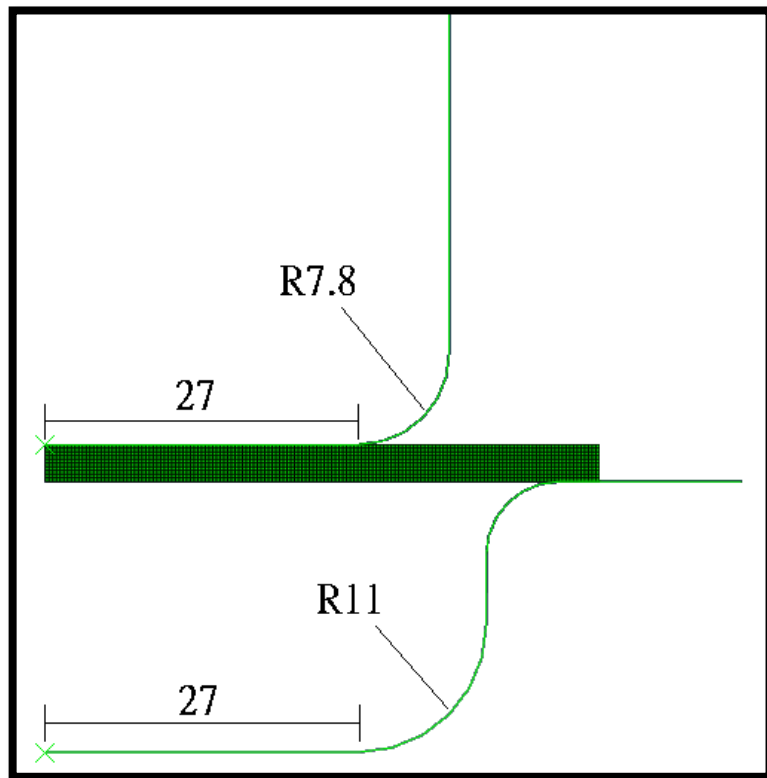


圖 A.3 下外殼第一道次模具配置圖

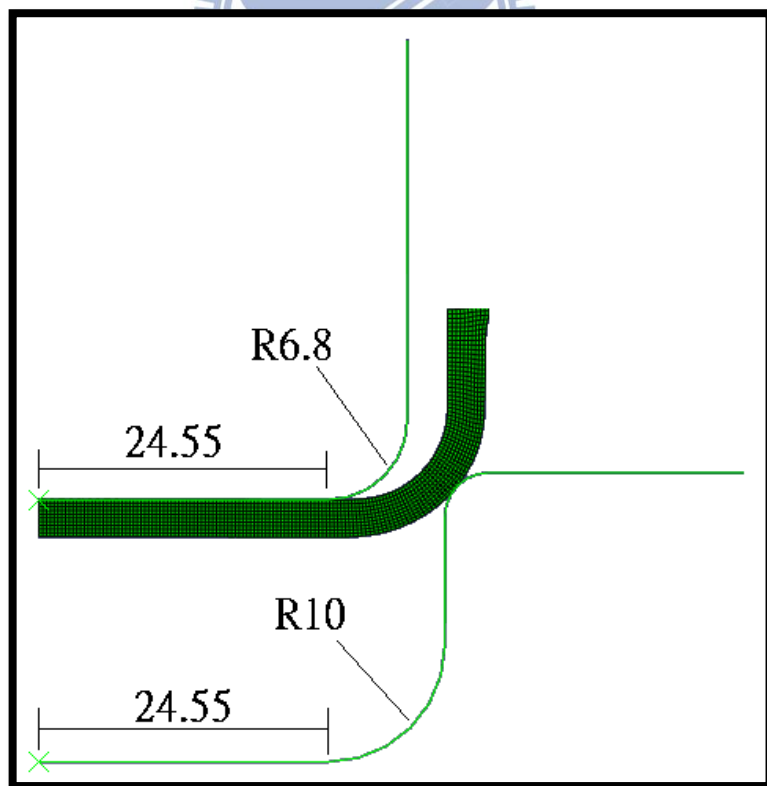


圖 A.4 下外殼第二道次模具配置圖



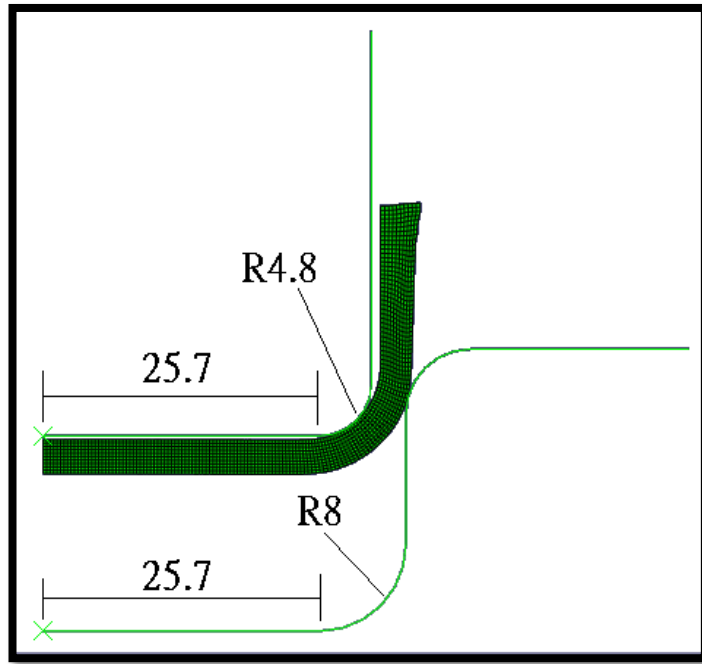


圖 A.5 下外殼第三道次模具配置圖

下外殼之第三及第四道次外型尺寸一樣，其差異為第三道次底部呈弧形狀，推測為第四道次底部經過壓平加工，因此本模擬階段將不模擬第四道次之加工以簡化模擬過程。



圖 A.6 下外殼第三、四道次底部比較

## A.2 網格劃分

本模擬使用軸對稱模型，定義沖頭及沖模為剛體，並設定板材 JSH780R 為均質材料，使用軸對稱減積分元素 CAX4R，將板材切割為厚度方向 10 層，長度方向 150 層，如圖 A.7 所示。

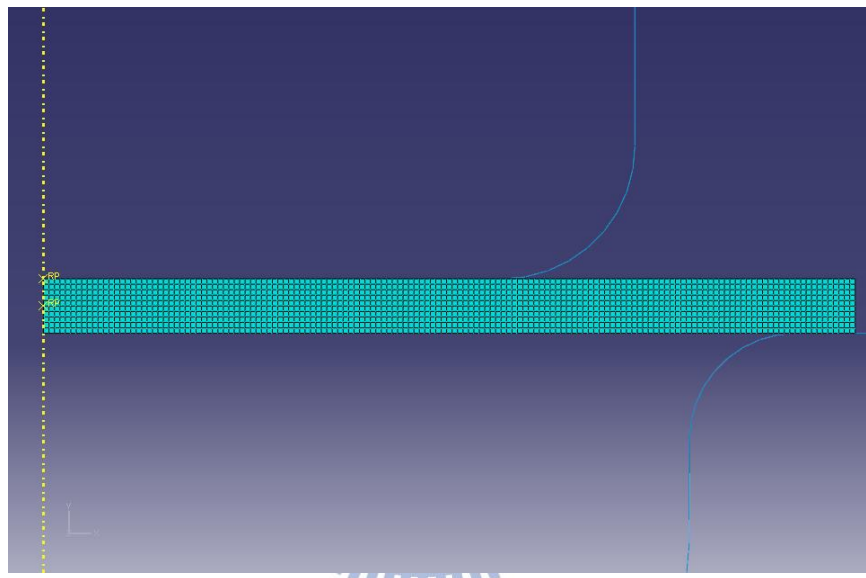


圖 A.7 網格分佈示意圖

## A.3 材料及元素性質給定

元翎公司使用高強度鋼板 JSH780R 作為氣體發生器之外殼材料，JSH780R 之材料性質將藉由拉伸試驗取得，材料性質整理如表 A.1，並將真實應力-應變曲線轉換成一指數定律（Power law）如圖 A.8 所示，將此轉換曲線輸入至模擬軟體以作為材料性質。

表 A.1 JSH780R 材料性質整理

JSH780R	E (GPa)	$\nu$	YS(MPa)	TS (MPa)
0°	207	0.3	850	1050
45°	207	0.3	800	956
90°	207	0.3	740	859

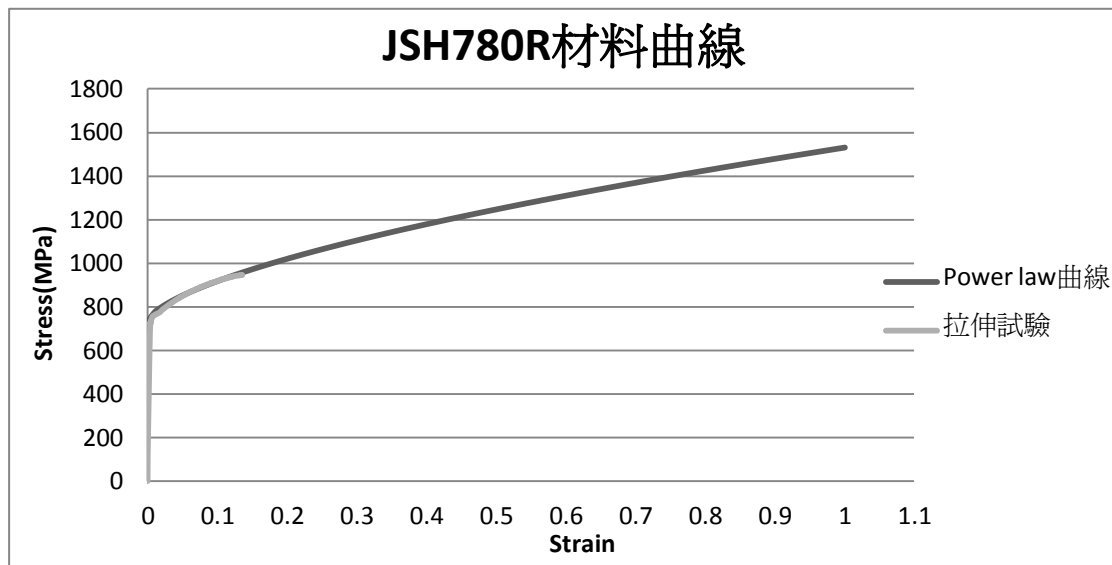


圖 A.8 材料性質曲線

#### A.4 邊界條件及分析設定

因本模擬使用軸對稱模型，Abaqus 將自動設定沖頭及沖模僅可做 Y 方向運動，而坯料方面則不額外限制任何拘束。本研究採用 Abaqus/Explicit 作為求解器，而沖壓成形每道次之模擬皆需根據前一道次之結果而定，亦即上一步驟之成形資料，如應力分布情形、網格變形程度、有效塑性應變等資料皆需傳送至下一道次以作為初始狀況之設定，如此傳送成形資料至最後一道次，以模擬實際沖壓成形情況。

Abaqus 內建有 Predefined Field 之功能，即可傳送成形資料於各模組間，以完成類似引伸成形需多道次加工之模擬情形，接觸對方面則參考文獻[5]，設定沖頭及沖模與坯料間之庫倫摩擦係數為 0.10。

## A.5 各道次模擬結果與討論

模擬結果將觀察各道次沖壓成形後之厚度分佈，並與實驗結果量測之厚度做比較，量測方式為將軸對稱模型由中心向外取 7 個點做量測，如圖 A.9 之示意圖，藉此比較模擬結果與實驗差異。

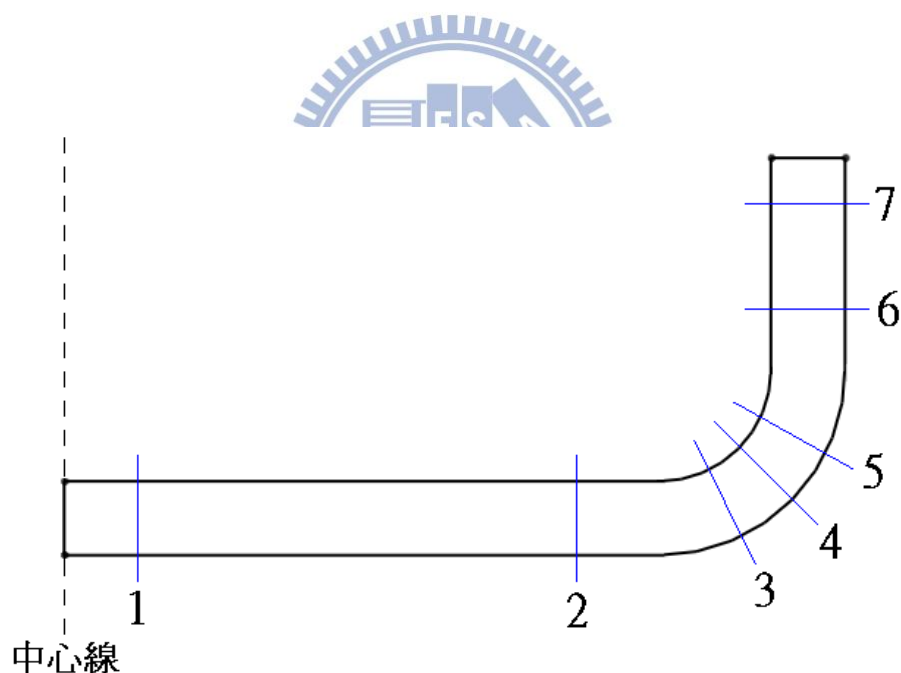


圖 A.9 實驗結果量測點示意圖

### A.5.1 第一道次結果比較

第一道次主要將平板坯料沖壓成半徑較大且深度較淺之外殼，如圖 A.10 為模擬及實驗之結果，圖 A.11 為量測之厚度分佈圖，可看出模擬與實驗之各點平均誤差為 1%，最大誤差發生在第 4 點，約為 2.15 %。

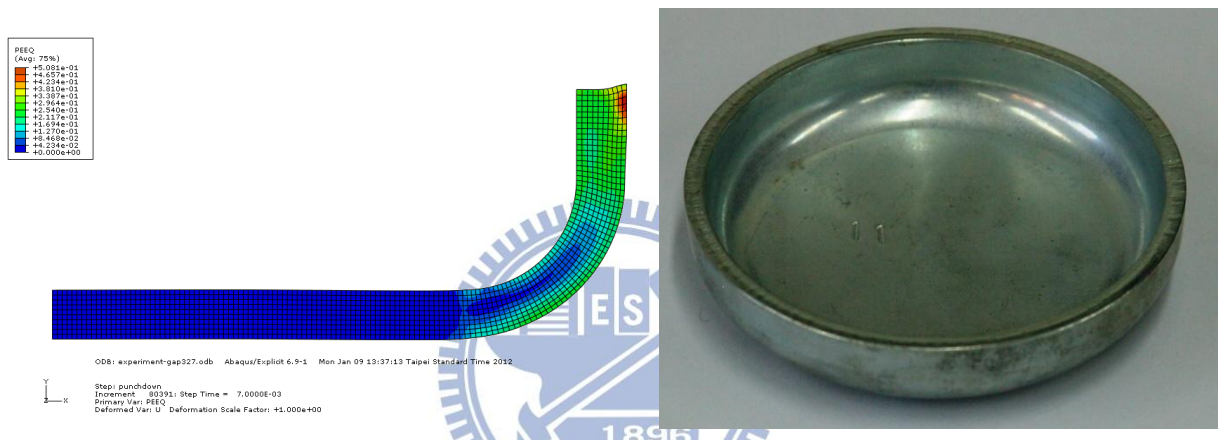


圖 A.10 第一道次模擬結果及實驗結果

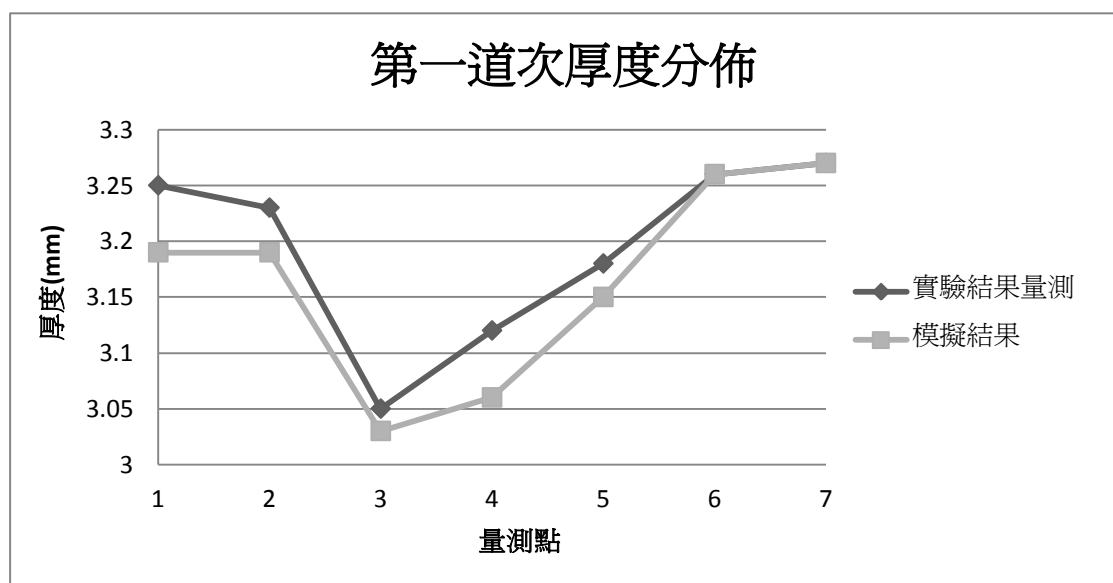


圖 A.11 第一道次模擬及實驗厚度分佈

## A.5.2 第二道次結果比較

第二道次則將第一道次之成品再次沖壓，形成半徑較小深度較深之外殼，圖 A.12 為模擬及實驗之結果，圖 A.13 為量測之厚度分佈圖，模擬與實驗之平均誤差為 1%，最大誤差發生在第 3 點，為 2.46%。

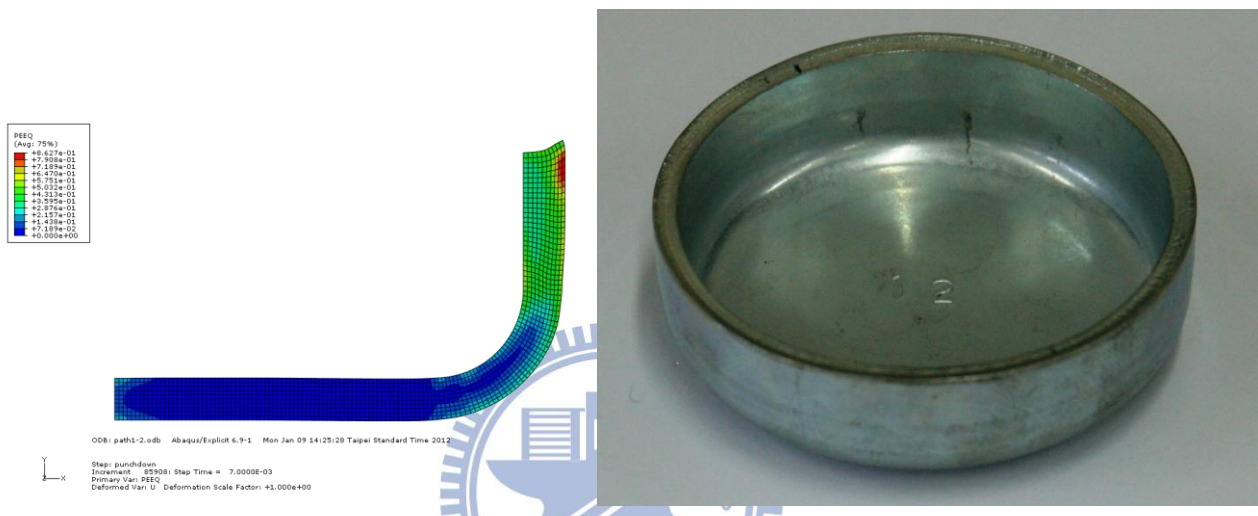


圖 A.12 第二道次模擬結果及實驗結果

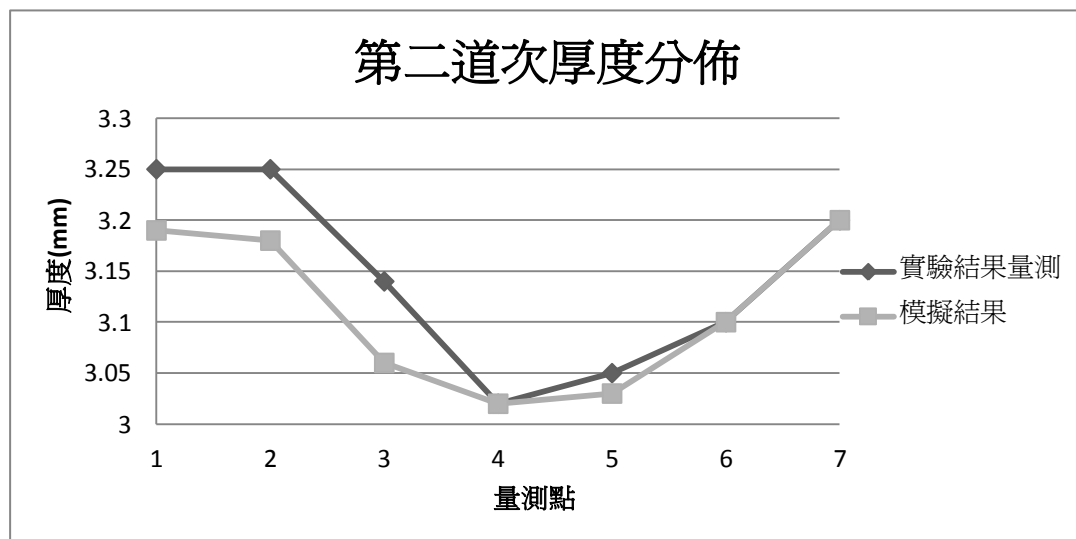


圖 A.13 第二道次模擬及實驗厚度分佈

### A.5.3 第三道次結果比較

第三道次將第二道次成品再次沖壓，形成外型接近設計尺寸之外殼，圖 A.14 為模擬及實驗之結果，圖 A.15 為量測之厚度分佈圖，模擬與實驗之平均誤差為 1.1%，最大誤差發生在第 1 及第 2 點，為 2.15%。

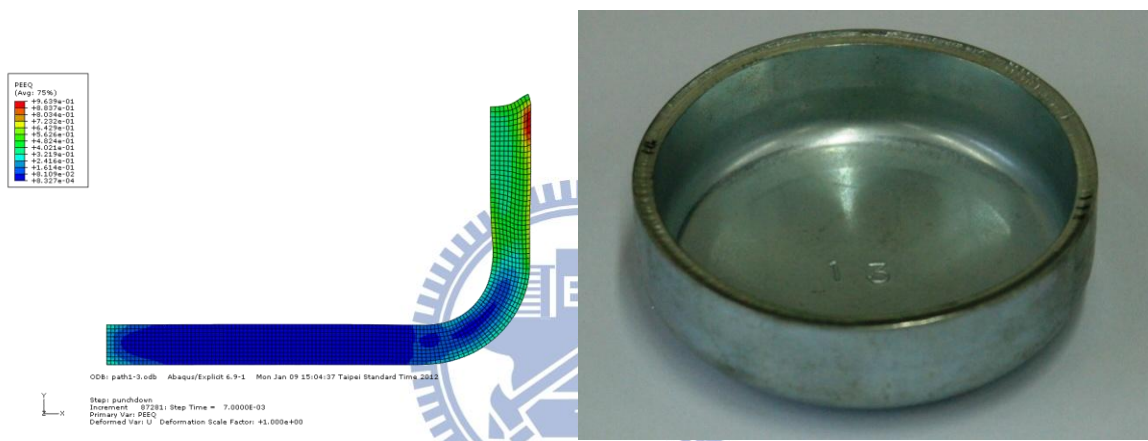


圖 A.14 第三道次模擬結果及實驗結果

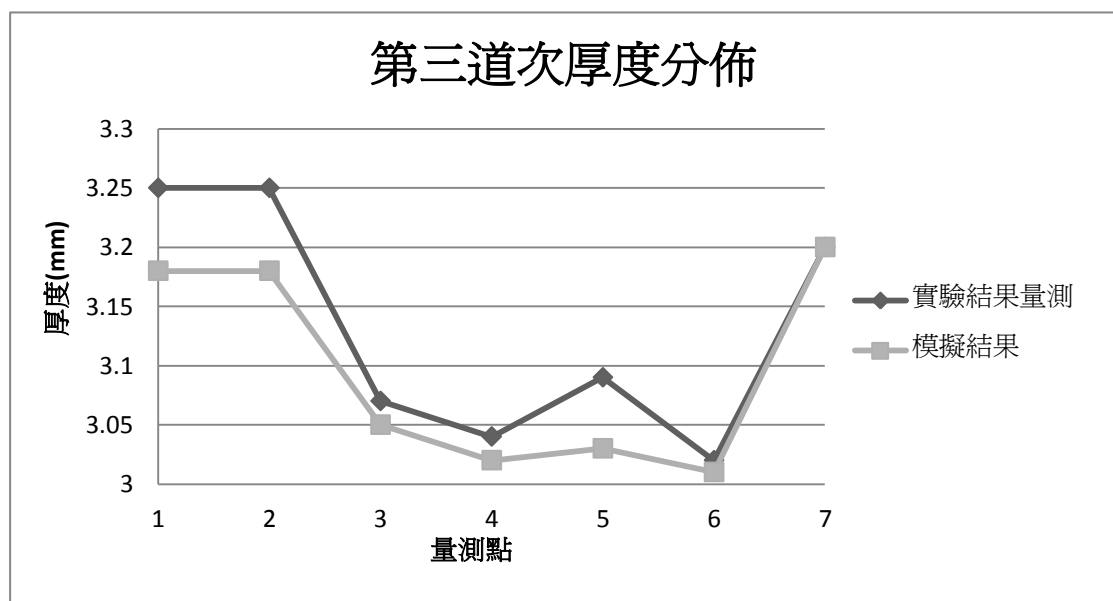


圖 A.15 第三道次模擬及實驗厚度分佈



#### A.5.4 模擬結果與討論

本模擬首先透過單軸拉伸試驗以取得 JSH780R 材料性質，並輸入至 Abaqus 中，根據所取得之安全氣囊壓力容器外殼，利用逆向工程推導第一、第二、第三道次之模具配置，並由 Abaqus 中 Predefined Field 功能模擬多道次引伸成形，比較各道次模擬結果與成品之厚度分佈，平均誤差在 1.1%，而最大誤差在 2.46%，證明本模擬模型可準確模擬各道次引伸成形。

