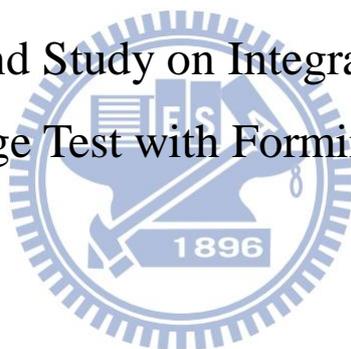


國立交通大學  
機械工程學系  
碩士論文

金屬薄板液壓膨脹實驗結合成形極限之  
設備研發與研究

Development and Study on Integrated Apparatus of  
Metal Sheet Bulge Test with Forming Limit Diagram



研究生：陳彥佑

指導教授：洪景華 教授

中華民國 一百零一年 六月

金屬薄板液壓膨脹實驗結合成形極限之設備研發與研究  
Development and Study on Integrated Apparatus of Metal Sheet Bulge  
Test with Forming Limit Diagram

研究生：陳彥佑

Student：Yan-Yo Chen

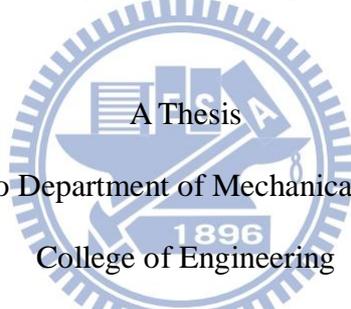
指導教授：洪景華

Advisor：Ching-Hua Hung

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



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

# 金屬薄板液壓膨脹實驗結合成形極限之 設備研發與研究

研究生：陳彥佑

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

## 摘要

為了能夠更便利、更準確並更完整地得金屬薄板的材料性質，如薄板之應力-應變曲線(stress-strain curve)和成形極限圖(forming limit diagram)，本研究設計製作一整合的薄板材料實驗設備。首先建立液壓膨脹實驗(bulge test)設備，取得薄板之應力-應變曲線，並與單軸拉伸實驗做比較，驗證薄板液壓膨脹實驗之可行性。再以液壓膨脹實驗設備為基礎，發展一金屬薄板液壓成形極限實驗。使用液壓膨脹實驗的圓形模具，規劃不同的試片幾何，提出一使用橡膠做為液壓傳遞壓力的概念，用以取得完整的成形極限圖，並與傳統的衝壓成形極限實驗比較，驗證薄板液壓成形極限實驗之可行性。最後整合成一薄板材料實驗之設備，以單一設備並更便利地取得應力-應變關係曲線與成形極限圖。

關鍵字：液壓膨脹實驗、應力-應變曲線、成形極限圖

# **Development and Study on Integrated Apparatus of Metal Sheet Bulge Test with Forming Limit Diagram**

Student : Yan-Yo Chen

Adviser : Dr. Ching-Hua Hung

**Department of Mechanical Engineering**

**National Chiao Tung University**

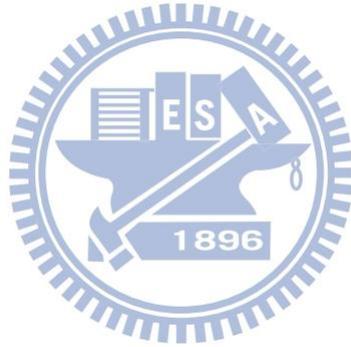
## **Abstract**

To obtain sheet metal's material properties such as stress-strain curve and forming limit diagram. A more convenient and accurate apparatus of material test for sheet metal has been designed and manufactured. Firstly, a device of hydraulic bulge test was constructed to obtain the stress-strain curve and compared with that from uniaxial tension test to verify the feasibility of hydraulic bulge test. Secondly, hydraulic forming limit test was conducted based on a modified bulge test apparatus with a circular die. A new concept that using a PU layer to uniformly transfer the hydraulic pressure to the sheet metal was proposed so both the left side and part of the right side of forming limit diagram(FLD) can be obtained. And the limit strain of the right side of FLD under equal biaxial tension was also obtained after the bulge test. The complete forming limit diagram was then compared with that from traditional drawing test to verify the feasibility of hydraulic forming limit test. Finally, an integrated testing apparatus for sheet metal with capabilities to obtain both stress-strain curve and FLD has been completed and verified.

Keywords : hydraulic bulge test, stress-strain curve, forming limit diagram.(FLD)

## 誌謝

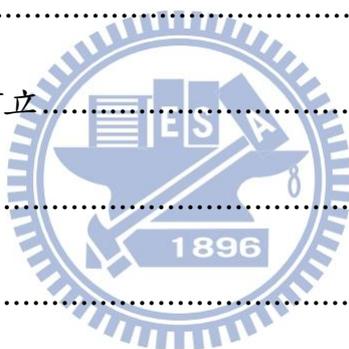
首先感謝洪景華老師在兩年來的細心指導，雖然有時會不小心讓老師出現脫下眼鏡並皺眉的表情，最後還是順利完成了論文。感謝實驗事的學長們在有問題時都能給予試時的解答，還有很多歡樂的聚餐與出遊。感謝一同努力的同學們，我們畢業拉!感謝學弟妹幫忙實驗事的瑣事，讓我們可以專心做研究。最後感謝我的家人，讓我能無憂無慮地念完兩年的碩士生活，最後的最後，感謝所有幫助過我的每一個人。



# 目錄

摘要.....	I
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>II</b>
誌謝.....	III
目錄.....	IV
表目錄.....	VIII
圖目錄.....	IX
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 簡介.....	1
1.2 文獻回顧.....	3
1.3 研究動機與目的 .....	7
1.4 研究方法.....	9
1.5 論文架構.....	10
<b>第二章材料實驗之理論分析.....</b>	<b>11</b>
2.1 單軸拉伸實驗之理論分析 .....	11
2.2 液壓膨脹實驗之理論分析.....	13
2.2.1 薄殼理論(membrane theory).....	14

2.2.2 曲率半徑之分析.....	17
2.2.3 圓頂厚度之分析.....	17
2.3 成形極限實驗之理論分析.....	18
2.3.1 成形極限圖.....	18
2.3.2 網格分析法.....	20
2.3.3 應變圖.....	20
<b>第三章 實驗規劃.....</b>	<b>22</b>
3.1 液壓膨脹實驗.....	22
3.1.1 實驗設備之建立.....	22
3.1.2 實驗規劃.....	37
3.1.3 實驗流程.....	38
3.2 單軸拉伸實驗.....	39
3.3 成形極限實驗.....	42
3.3.1 液壓成形極限實驗.....	44
3.3.2 衝壓成形極限實驗.....	47
<b>第四章 實驗結果與討論.....</b>	<b>49</b>
4.1 液壓膨脹實驗.....	49
4.1.1 曲率半徑之分析與量測驗證.....	49



4.1.2 圓頂厚度公式之分析與量測驗證.....	50
4.1.3 應力-應變曲線 .....	51
4.1.4 應變硬化係數.....	52
4.1.5 模具尺寸之影響.....	53
4.2 單軸拉伸實驗 .....	55
4.2.1 金屬薄板之方向性.....	56
4.2.2 應變硬化係數.....	56
4.3 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之結果比較 .....	57
4.4 液壓成形極限實驗 .....	59
4.4.1 模具幾何之影響.....	59
4.4.2 液壓成形極限實驗之結果.....	61
4.5 衝壓成形極限實驗 .....	63
4.6 液壓成形極限實驗與衝壓成形極限實驗之結果比較.....	66
<b>第五章 結論與未來工作.....</b>	<b>67</b>
5.1 結論.....	67
5.2 未來工作.....	68
<b>參考文獻.....</b>	<b>70</b>
<b>附錄 A 夾具系統之設計規格圖 .....</b>	<b>73</b>

附錄 B 模具組之設計規格圖 .....	77
附錄 C 不銹鋼薄板 316L 之完整材料性質 .....	80
C.1 液壓膨脹實驗 .....	80
C.2 金屬薄板之方向性.....	81
C.3 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之比較.....	82



## 表目錄

表 2.1 液壓膨脹實驗之相關參數.....	14
表 2.2 曲率半徑之分析.....	17
表 2.3 圓頂厚度之分析.....	18
表 3.1 系統間各元件規格.....	25
表 4.1 不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質(液壓膨脹實驗).....	52
表 4.2 不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質(單軸拉伸實驗).....	57
表 4.3 不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質(液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗).....	58

## 圖目錄

圖 1.1 深衝成形[1].....	2
圖 1.2 張出成形[1].....	2
圖 1.3 伸緣成形[1].....	2
圖 1.4 彎曲成形[1].....	2
圖 1.5 KEELER-GOODWIN 之成形極限圖概念 .....	6
圖 1.6 理論之成形極限圖(HILL 理論和 SWIFT 理論)[14].....	6
圖 1.7 MARCINIAK-KUCKZINSKY( $\Psi_0=0$ ) 和 HUTCHINSON-NEALE( $\Psi_0\neq 0$ ) .....	6
的缺陷模型[15].....	6
圖 1.8 NAKAZIMA 的成形極限實驗和試片設計[12].....	7
圖 1.9 IFU 設計的成形極限實驗和試片設計[13] .....	7
圖 1.10 研究方法之流程圖 .....	10
圖 2.1 一般拉伸試片[1].....	11
圖 2.2 荷重-伸長曲線圖[1].....	11
圖 2.3 液壓膨脹示意圖.....	13
圖 2.4 薄球殼上的應力與應變狀態[1].....	15

圖 2.5 決定應力-應變關係曲線之流程.....	16
圖 2.6 成形極限圖 .....	19
圖 2.7 薄板的元素(A)薄板變形前，網格為圓形，初始厚度為 $T_0$ (B) 薄板變形後，網格為橢圓形，厚度為 $T [1]$ .....	20
圖 2.8 不同變形狀態下的應變圖 [1].....	21
圖 3.1 系統間的作用示意圖.....	23
圖 3.2A 量測與控制系統.....	24
圖 3.2B 液壓系統與夾具系統 .....	24
圖 3.3 夾具系統實際成品與電阻尺和壓力感測器.....	26
圖 3.4 油路設計示意圖.....	27
圖 3.5 油壓動力單元 .....	28
圖 3.6 電磁比例閥的控制系統示意圖 .....	28
圖 3.7 比例洩壓閥 .....	29
圖 3.8 比例洩壓閥特性曲線.....	29
圖 3.9 電磁比例洩壓閥實際使用狀況 .....	29
圖 3.10 壓器感測器實體圖與使用接線圖 .....	31
圖 3.11 電阻尺實際圖與原理電路圖 .....	31

圖 3.12 電阻尺校準後之特性曲線.....	32
圖 3.13 可程控電源供應器.....	32
圖 3.14 AD 資料擷取卡.....	33
圖 3.15 前端控制板面所示.....	35
圖 3.16 功能圖塊.....	36
圖 3.17 拉伸試驗試片尺寸圖(MM).....	40
圖 3.18 SUS304 拉伸試驗試片配置圖.....	40
圖 3.19 MTS-810 萬能試驗機.....	41
圖 3.20 成形極限實驗之試片規劃.....	42
圖 3.21 網格設計.....	43
圖 3.22 金屬電印機.....	44
圖 3.23 橡膠結合液壓成形實驗之概念圖.....	45
圖 3.24 直接液壓成形極限實驗之概念圖.....	45
圖 3.25 圓形模具.....	46
圖 3.26 液壓成形極限圖之完整概念.....	46
圖 3.27 萬能深引伸試驗機.....	47

圖 3.28 模具組件與沖頭.....	48
圖 4.1 連續實驗之試片.....	49
圖 4.2 階段實驗之試片.....	49
圖 4.3 曲率半徑之分析與量測驗證.....	50
圖 4.4 圓頂厚度公式之分析與量測驗證.....	51
圖 4.5 液壓膨脹實驗之應力-應變曲線(SUS304).....	52
圖 4.6 液壓膨脹之擬合結果(SUS304).....	53
圖 4.7 不銹鋼 304 厚度 0.051MM 薄板，不同之圓形模具尺寸(D <sub>C</sub> )[22] .....	54
圖 4.8 CUZN36 厚度 0.25 薄板，不同之圓形模具尺寸(D)[23].....	54
圖 4.9 液壓膨脹實驗的模具尺寸之影響(SUS304).....	55
圖 4.10 拉伸後之拉伸試片.....	55
圖 4.11 單實軸拉伸實驗之結果(SUS304).....	56
圖 4.12 單軸拉伸實驗之擬合結果(SUS304).....	57
圖 4.13 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之比較圖(SUS304).....	58
圖 4.14 橢圓形模具.....	60
圖 4.15 模具幾何與極限應變狀況之影響(SUS304).....	60

圖 4.16 液壓成形後的試片 .....	61
圖 4.17 薄板液壓成形極限圖(SUS304) .....	62
圖 4.18 液壓成形極限圖與橢圓形模具成形之結果比較 .....	63
圖 4.19 衝壓成形後的試片 .....	64
圖 4.20 薄板衝壓成形極限圖(SUS304) .....	65
圖 4.21 液壓成形極限實驗與衝壓成形極限實驗之比較圖(SUS304).	66
圖 5.1 CUZN36 薄板，不同厚度尺寸( $T_0$ )[23] .....	69
圖 A.1 支架部件：電阻尺支架組件 .....	73
圖 A.2 支架部件：電路板支架組件與試片座支架組件 .....	74
圖 A.3 總底座部件 .....	75
圖 A.4 試片座部件 .....	76
圖 B.1 圓形模具 .....	77
圖 B.2 橢圓形模具 .....	78
圖 B.3 小徑之圓形模具 .....	79
圖 C.1 液壓膨脹實驗後之試片(SUS316L) .....	80
圖 C.2 液壓膨脹實驗之結果(SUS316L) .....	80

圖 C.3 單軸拉伸後之試片(SUS316L)..... 81

圖 C.4 單軸拉伸實驗之結果(SUS316L)..... 82

圖 C.5 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之比較..... 83



# 第一章 緒論

## 1.1 簡介

金屬薄板在工業製造上，已被廣泛地應用在不同的領域，如包裝、汽車和電子消費性產品外殼等，在製造這些產品的過程中，材料花費為主要的生產成本，為了降低生產成本，減少材料的使用是最直接的方法，但是減少材料後，產品的機械強度必定會產生變化。因此為了使產品達到所需的機械強度，並且能降低材料成本，首先就必須要瞭解材料性質的資訊，才能決定其適用的範圍與使用狀況，並且找到最適合之材料。

因此在研究發展新材料或設計開發新產品的過程中，材料的特性與機械性質都是一件不可或缺的資訊。只有瞭解材料性質的資訊，才能決定其應用範圍與使用狀況，是否符合需求標準。最簡單且常使用來獲得材料機械性質的是拉伸實驗，可用以取得材料的應力-應變關係曲線，瞭解材料破裂前得彈性與塑性性質。拉伸實驗可依金屬薄板所受應力的形態分為單軸拉伸實驗與雙軸拉伸實驗，雙軸拉伸實驗除了使用十字形試片進行的拉伸實驗外，還有本研究之液壓膨脹實驗也是雙軸應力狀態下的拉伸實驗。

金屬薄板在實際成形的過程中，主要可以分為四種形式：深衝成形(deep drawing)、張出成形(stretching)、伸緣成形(stretch flange)、彎曲成形(bending)，而針對薄板的複雜成形狀態也可考慮以上四種形式的組合。以上成形形式如圖 1.1 至圖 1.4 所示。

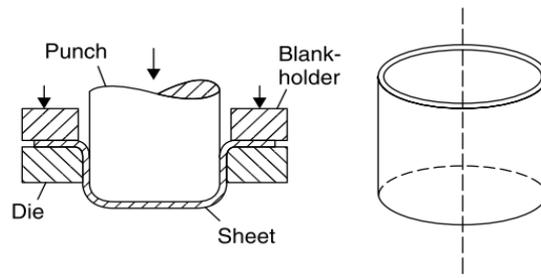


圖 1.1 深衝成形[1]

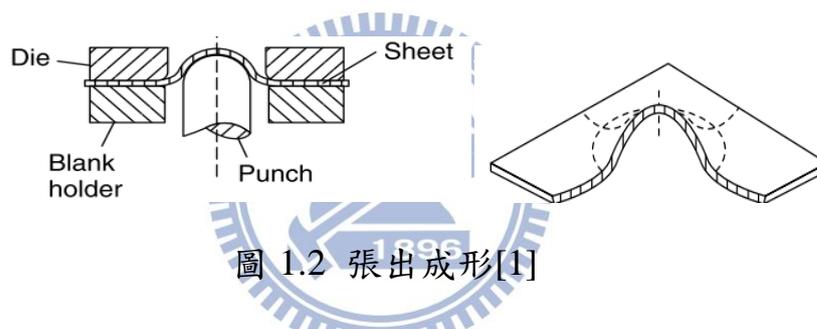


圖 1.2 張出成形[1]

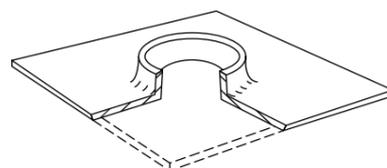


圖 1.3 伸緣成形[1]

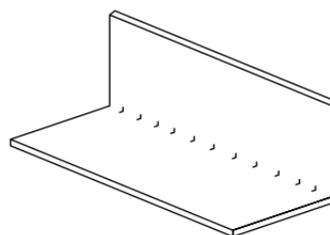


圖 1.4 彎曲成形[1]

在深衝成形上主要的變形為縮緣上的伸長-收縮變形。張出成形

則是藉由伸長-伸長的變形，而將成形體表面擴大的成形方式。伸緣成形的變形形式及變形量則是有顯著的變化，在伸緣的邊緣為伸長-收縮變形(單軸拉伸)，隨著離開邊緣時則變化為伸長-伸長的變形。彎曲成形則以在板厚斷面內的變形量的分佈為特徵。

由於金屬薄板在成形的過程中，有著複雜的變形狀態，必須針對不同的變形形式進行各種實驗，才可瞭解不同的變形狀態或其變形極限。因此，為了能更有系統的得到各種變形狀態的成形極限，發展了一模擬各種變形狀態的實驗，即成形極限實驗，用以取得材料的成形極限圖(forming limit diagram, FLD)，瞭解材料破裂時的成形狀態，即極限應變值，可應用於設計產品，做為金屬成形極限的依據，並避開可能破裂的成形設計。

為了取得不同的材料性質，必須使用不同的材料實驗，材料實驗有拉伸、彎曲、硬度、成形極限等實驗，其中針對金屬薄板，最為廣泛應用的是拉伸實驗與成形極限實驗。在傳統工程應用上，單軸拉伸實驗與成形極限實驗需用到兩種不同的試驗機台及試片幾何。

## 1.2 文獻回顧

由於實際的金屬薄板成形狀態多為受雙軸應力而產生不同變形量(應變)，所以為了能形容真實金屬薄板成形狀態，進行了為雙軸應力狀態的液壓膨脹實驗，瞭解金屬薄板破裂前的彈性與塑性之性質。

而為了瞭解破裂當下的變形情況，則藉由成形極限實驗所得到的極限應變，構成一金屬薄板的成形極限圖，此部分相關的文獻如下。

(1)液壓膨脹實驗：

Hill[2]假設膨脹球殼為圓球的一部分，提出液膨脹實驗的分析方法，利用球殼之圓頂厚度與曲率半徑之關係式，得出材料之應力-應變關係曲線。Kruglov et al.[3]也針對膨脹球殼發展出一圓頂厚度的計算公式。Panknin [4]發展一液壓膨脹實驗，使用半徑規直接量測曲率半徑；並比 Hill 多考慮壓力腔上模具的圓角半徑，也發展出一曲率半徑的計算公式，經由與實驗比較，在膨脹高度( $h$ )小於壓力腔半徑( $R$ )的 0.56 倍之前，分析與實驗有一致性；當膨脹高度更高時，其實驗值會比分析值越來越小，最多會比分析值小 10%。Gologranc [5]的實驗結論也與 Panknin 一致。

(2)成形極限實驗：

成形極限圖的概念最早由 Keeler 和 Backofen[6]對冷軋鋼板做雙軸拉伸變形實驗而建立右半部份之成形極限圖，Goodwin [7]以拉壓變形實驗而建立左半部份之成形極限圖，構成一成形極限圖的完整概念，如圖 1.5 所示。成形極限圖的理論最早由 Hill [8]的局部頸縮理論(localized necking theory)和 Swift [9]的擴散頸縮理論(diffused necking theory)作為基礎，如圖 1.6 所示。Marciniak 和 Kuckzinsky [10]假設材

料原本就有厚度不均勻的缺陷，即有一凹槽缺陷於薄板上，並且其凹槽方向垂直於主應力與主應變的方向，如圖 1.7 所示，而材料是局部頸縮，並發生於有缺陷的區域，提出一可行性的數學模型(M-K 模型)形容雙軸拉伸的狀態，即成形極限圖的右半部分。Hutchinson 和 Neale [11]發展 Marciniak 和 Kuckzinsky 的模型，假設凹槽缺陷的方向與次應力和次應變夾一個角度，如圖 1.7 所示，並應用於拉伸-壓縮的應變狀態，即成形極限圖的左半部分。因此，M-K 模型可以完整的形容成形極限圖。Nakazima[12]使用球形沖頭沖壓薄板，並設計不同的試片幾何，對應其所需的應力與應變狀態，發展一薄板成形極限實驗，如圖 1.8 所示。德國研究機構 The Institute of Metal Forming Technology of Stuttgart University(Institut für Umformtechnik — IFU)[13]設計液壓膨脹實驗的模具外型以達到成形極限圖右半部的應變狀態，並設計拉伸實驗，搭配設計不同試片幾何以達到成形極限圖左半部的應變狀態，提出一整合實驗之概念，如圖 1.9 所示。

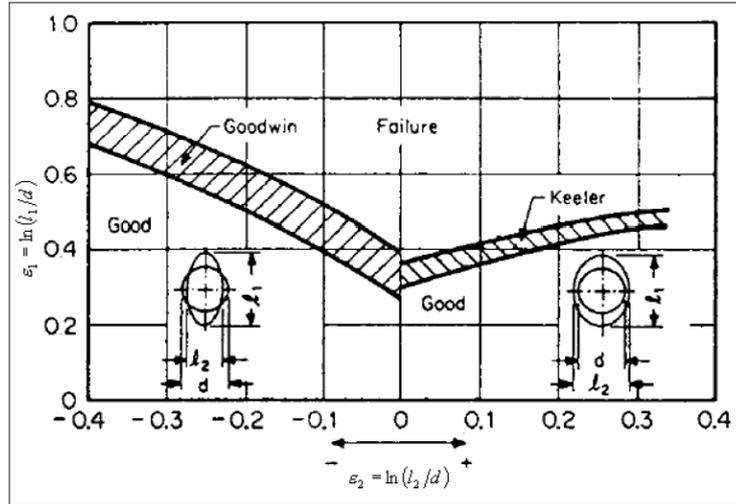


圖 1.5 Keeler-Goodwin 之成形極限圖概念

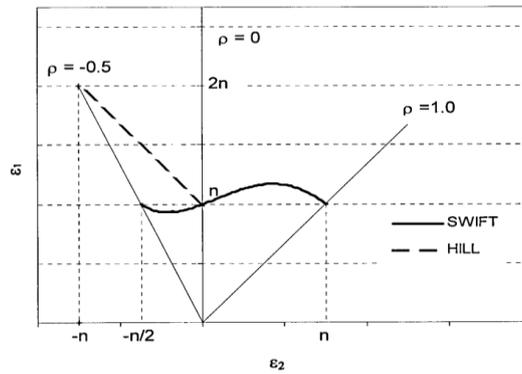


圖 1.6 理論之成形極限圖(Hill 理論和 Swift 理論)[14]

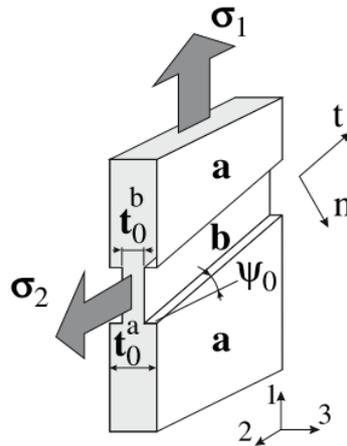


圖 1.7 Marciniak-Kuczynsky( $\psi_0=0$ ) 和 Hutchinson-Neale( $\psi_0 \neq 0$ )

的缺陷模型[15]

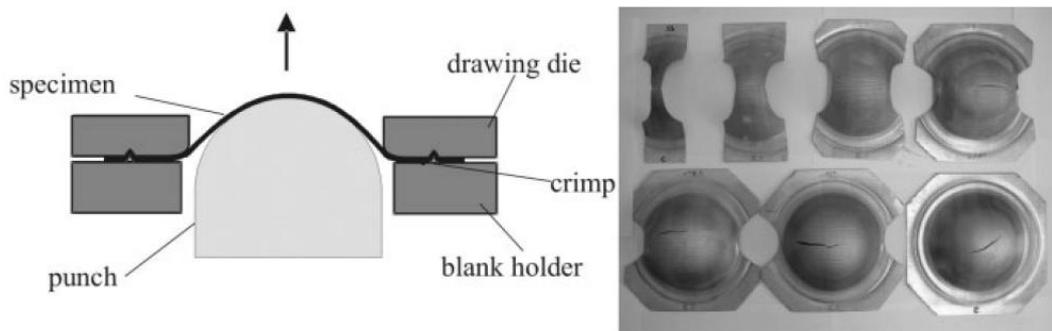


圖 1.8 Nakazima 的成形極限實驗和試片設計[12]

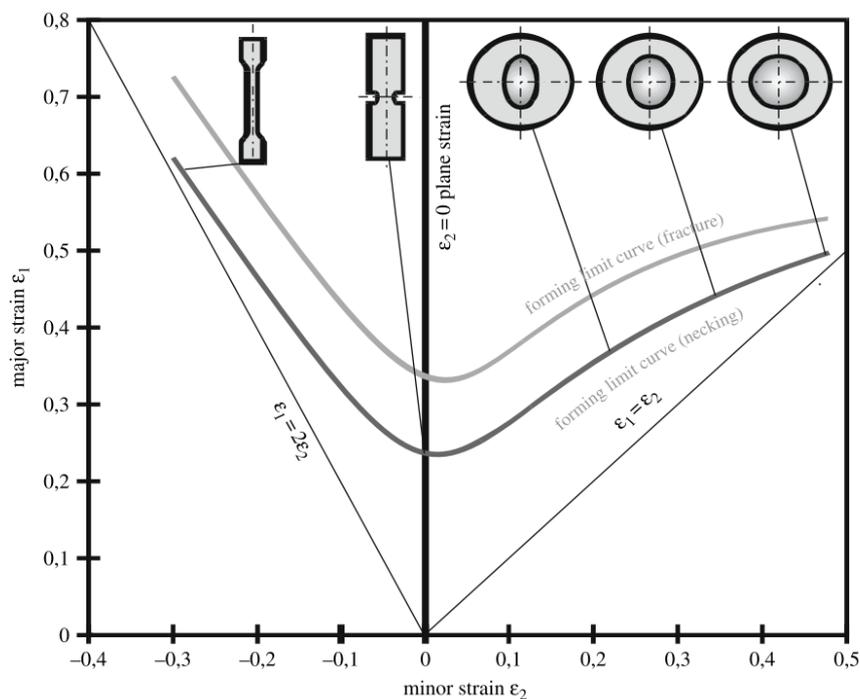


圖 1.9 IFU 設計的成形極限實驗和試片設計[13]

### 1.3 研究動機與目的

為了充分瞭解一金屬薄板材料的機械性質，主要進行的材料實驗為拉伸實驗與成形極限實驗。由拉伸實驗取得一應力-應變曲線，瞭解材料的彈性與塑性之性質。由成形極限實驗取得一成形極限圖，瞭

解材料的成形極限，即材料何時破裂的情況。而為了進行此兩種實驗，需使用到兩種不同的實驗設備與試片幾何，增加了材料性質取得的不方便性與困難度，因此本研究欲研發一薄板的整合材料實驗設備，可以單一套實驗設備取得應力-應變曲線與成形極限圖，能更便利地且快速地瞭解金屬薄板的材料性質。

普遍進行的拉伸實驗，常用是使用單軸拉伸實驗，但由於單軸拉伸實驗為單軸的應力狀態，而薄板金屬成形的應力狀況通常都為雙軸應力，而液壓膨脹實驗的雙軸應力狀態，更適合於薄板金屬成形時的真實應力狀態，所以本研究研發的薄板液壓膨脹實驗設備，可取得雙軸應力下的應力-應變曲線。

傳統的成形極限實驗是以衝壓成形為主，近期則由一德國研究機構 IFU 提出一新型的成形極限實驗之整合概念，以拉伸實驗搭配液壓膨脹實驗，使用兩種不同的設備取得完整之成形極限圖，其中，右半部分之成形極限圖藉由液壓膨脹實驗取得，左半部份之成形極限圖藉由拉伸實驗取得。所以為了能夠更便利、更準確並更完整地得到薄板的材料性質。本研究發展並使用液壓膨脹實驗設備，提出一使用橡膠做為液壓傳遞壓力的概念，取得完整的成形極限圖。最後建立成一整合的材料實驗設備，以單一實驗設備取得薄板之應力-應變曲線和成形極限圖。

## 1.4 研究方法

本研究使用厚度為 0.1mm、面積為 100mm\*100mm 且退火過的不銹鋼板 SUS304 為試片來進行新式多目的液壓膨脹實驗設備的開發，其研究方法之流程如圖 1.10 所示。

為了建立一多目的之薄板材料實驗設備，首先建立了液壓膨脹實驗設備，並根據文獻之分析公式，經由初步實驗確定適合於本研究之分析公式，再搭配分析公式進行液壓膨脹實驗，取得不銹鋼薄板 SUS304 之應力-應變關係曲線。

後續進行薄板單軸拉伸實驗，以 ASTM-E8 之拉伸規範，在同一金屬薄板上，沿滾軋方向 0 度、45 度、90 度切割三片拉伸試片，取得薄板的應力-應變關係曲線，瞭解薄板之方向性。再將液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之結果做比較，驗證液壓膨脹實驗的可行性。

接下來為了取得成形極限圖，本研究以液壓膨脹實驗設備為基礎，使用液壓膨脹實驗的圓形模具，並規劃一系列不同幾何之金屬薄板試片，發展液壓成形極限實驗。針對裁切過的試片，提出一使用橡膠做為液壓傳遞壓力的概念，取得成形極限圖的左半部與部分右半部的資訊。針對未裁切過的方形試片進行液壓膨脹實驗，取得等雙軸拉伸變形下的極限應變值，即成形極限圖的右半部資訊。最後取得一完整的成形極限圖後，再與傳統的衝壓成形極限實驗的成形極限圖做比較，

驗證液壓成形極限實驗的可行性。最後整合成一薄板材料實驗之設備，以單一套設備取得薄板的應力-應變曲線與完整的成形極限圖。

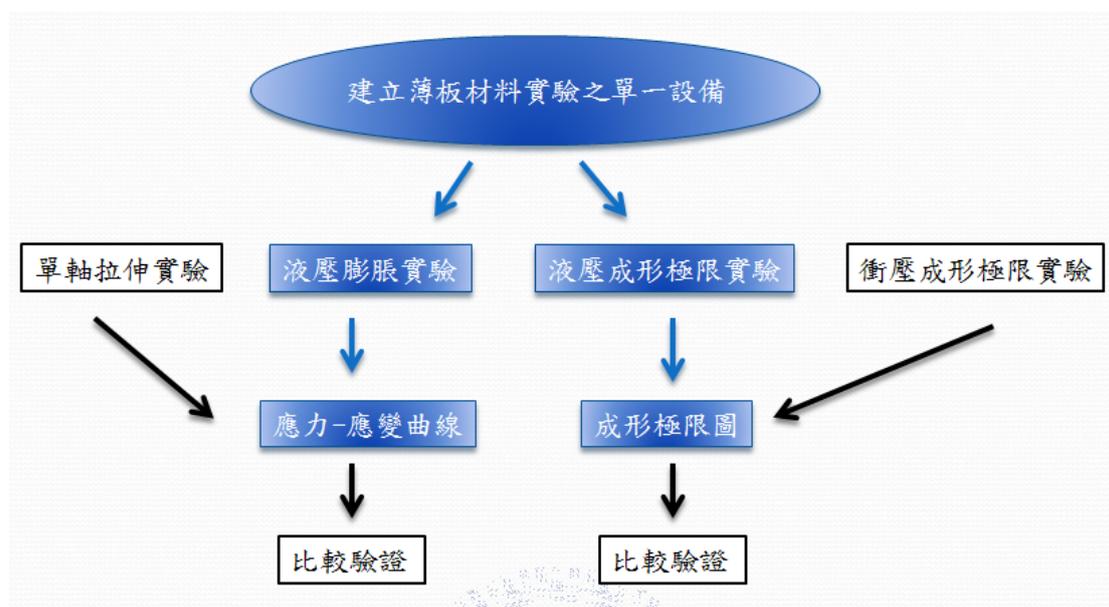


圖 1.10 研究方法之流程圖

## 1.5 論文架構

本論文第一章先介紹研究動機及文獻回顧。第二章針對單軸拉伸實驗、液壓膨脹實驗和成形極限圖的理論分析。第三章首先建立液壓膨脹實驗設備進行液壓膨脹實驗，進行單軸拉伸實驗，瞭解薄板之方向性，並將液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之結果做比較，驗證液壓膨脹實驗之可行性。接著以液壓膨脹實驗設備為基礎，發展液壓成形極限實驗，再與傳統的衝壓成形極限實驗之結果做比較，驗證液壓成形極限實驗之可行性。在第四章則針對各個實驗之結果進行討論。最後第五章為結論與未來工作。

## 第二章材料實驗之理論分析

本章將介紹單軸拉伸實驗與液壓膨脹實驗所需之理論與分析，並簡單介紹成形極限圖之理論，以瞭解後續實驗所需之理論分析。

### 2.1 單軸拉伸實驗之理論分析

單軸拉伸實驗主要原理，係將試片夾持於萬能試驗機(material test system)，然後施加拉力，則試片隨拉力之荷重增加而逐漸伸長，若將每一荷重及其所對應之伸長量逐一記錄下來，便可得一荷重-伸長曲線圖(load -elongation diagram)，依所得之荷重-伸長曲線圖加以分析材料之諸性質。圖 3.1 為一般拉伸試片，其中， $l_0$  為標點距離、 $w_0$  為寬度、 $t_0$  為厚度、 $P$  為荷重。圖 3.2 為鋼板拉伸試驗的荷重-伸長曲線圖，其中， $P_y$  為降伏點之荷重、 $P_{max}$  為材料所承受的最大荷重、 $\Delta l_{max}$  為試片伸長極限。

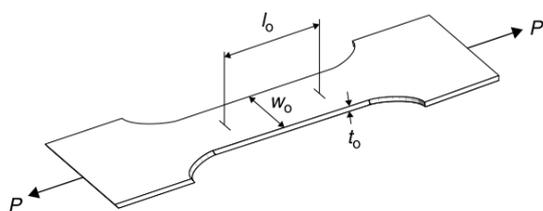


圖 2.1 一般拉伸試片[1]

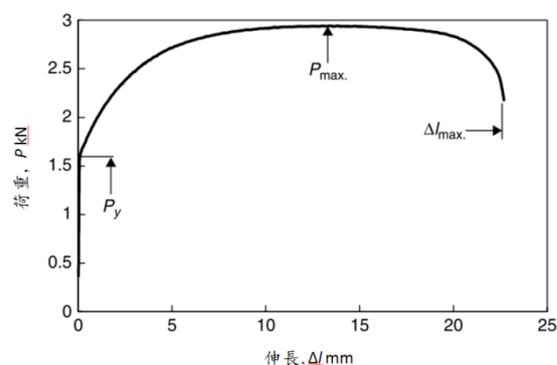


圖 2.2 荷重 - 伸長曲線圖[1]

從實驗中得到荷重與伸長關係後，利用荷重與伸長量的資料，

藉由數學關係式，可以轉換為工程應力(Engineering stress)與工程應變(Engineering strain)：

$$\sigma_E = \frac{P}{A_0} \quad (2-1)$$

$$\varepsilon_E = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \quad (2-2)$$

其中， $\sigma_E$  為工程應力、 $\varepsilon_E$  為工程應變、 $P$  為試片所受的荷重、 $A_0$  為試片的原始截面積、 $\Delta l$  為試片伸長量、 $l_0$  為試片初始長度。

藉由真實應力與真實應變之定義：

$$\sigma_T = \frac{P}{A} \quad (2-3)$$

$$\varepsilon_T = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) \quad (2-4)$$

其中， $\sigma_T$  為真實應力、 $\varepsilon_T$  為真實應變。

與體積不變定率：

$$A_0 \times l_0 = A \times l \quad (2-5)$$

將工程應力與工程應變轉成真實應力(True stress)與真實應變(True strain)[16]：

$$\sigma_T = \sigma_E(1 + \varepsilon_E) \quad (2-6)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon_E) \quad (2-7)$$

再將取得的真實應力-應變曲線取其彈性區域進行迴歸分析以取得材料的彈性係數  $E$ 。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部份，得到塑性區的應變(2-8)，進而繪出材料真實應力-塑性應變曲線，再找出一指數定律(power law)(2-9)與其趨近，可利用此指數定律有效表示材料的機械性質。

$$\varepsilon_T^p = \varepsilon_T - \frac{\sigma_y}{E} \quad (2-8)$$

$$\sigma_T = K(\varepsilon_T^p)^n + \sigma_y \quad (2-9)$$

其中， $\varepsilon_T^p$ ：真實塑性應變、 $\sigma_y$ ：初始降伏應力、 $E$ ：彈性係數、 $n$ ：應變硬化係數(strain hardening exponent)、 $K$ ：常數。

## 2.2 液壓膨脹實驗之理論分析

液壓膨脹實驗為一等雙軸應力狀態下的拉伸實驗，針對於薄板材料，在限制住薄板邊緣的情況下，假設薄板受液壓膨脹後之形狀為近似球狀，如圖 2.3 所示，並利用理論分析與實驗量測，取得其應力-應變關係曲線。

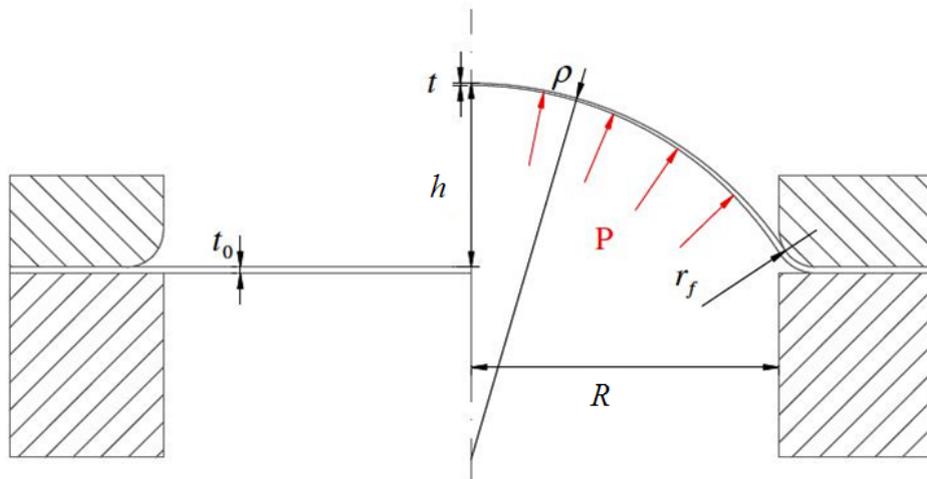


圖 2.3 液壓膨脹示意圖

以下各節將逐步介紹理論分析之細節，分析中將使用的相關參數如下表所示：

表 2.1 液壓膨脹實驗之相關參數

<u>變數</u>	<u>不變數</u>
$h$ ：膨脹高度	$R$ ：壓力腔半徑
$P$ ：液壓壓力	$r_f$ ：上模具的圓角徑
$t$ ：圓頂厚度	$t_0$ ：薄板初始厚度
$\rho$ ：曲率半徑	

### 2.2.1 薄殼理論(membrane theory)

在假設薄板受液壓膨脹變形後為薄球殼(球殼半徑必須大於 10 倍厚度,  $\rho \geq 10t$ )的情況下，可以忽略其彎曲應力(bending stress)與厚度方向之應變，即薄板上的應力狀態可以平面應力表示[17]。

因此薄殼理論可以應用於薄板之液壓膨脹球殼，並取得其應力、幾何與壓力關係[1]：

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1} + \frac{\sigma_2}{\rho_2} = \frac{P}{t} \quad (2-10)$$

其中  $\sigma_1$  與  $\sigma_2$  為薄殼面上的主應力、 $\rho_1$  與  $\rho_2$  為曲面上的曲率半徑、 $t$  為薄殼厚度、 $p$  為液壓壓力。

由於膨脹球殼的對稱性，並且塑性變形不會改變體積，所以球殼

圓頂上的應力與應變為：

$$\text{應力：} \sigma_1 = \sigma_2, \sigma_3 = 0 \quad (2-11a)$$

$$\text{應變：} \varepsilon_1 = \varepsilon_2, \varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) = -2\varepsilon_1 \quad (2-11b)$$

其中  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  為主應力， $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  為主應變， $t_0$  薄板初始厚度， $t$  為圓頂厚度。

其薄殼應力與應變狀態如圖 2.4 所示：

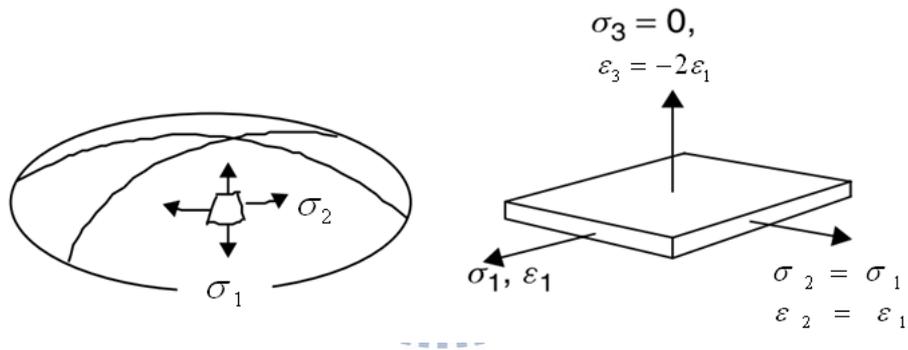


圖 2.4 薄球殼上的應力與應變狀態[1]

所以 2-10 可以表示成：

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{p\rho}{2t} \quad (2-12)$$

根據 von Mises 對等效應力的定義[18]：

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{3}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2-13)$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{2}{3}\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}$$

帶入 2-11 與 2-12 可以得到圓頂上的等效應力 ( $\bar{\sigma}$ ) 與等效應變 ( $\bar{\varepsilon}$ )：

$$\bar{\sigma} = \frac{P\rho}{2t} \quad (2-14)$$

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_3 = \ln\left(\frac{t}{t_0}\right) \quad (2-15)$$

由式 2-14 與式 2-15，可以得知為了取得應力-應變關係，需要三個變數[17,19]：(a) 液壓壓力 P；(b) 即時的曲率半徑  $\rho$ ；(c) 即時的圓頂厚度 t。其中曲率半徑與圓頂厚度的即時量測較為不易，若為了即時量測到此兩變數，則需要使用的量測設備會過於複雜，並且會導致成本過高。因此本研究是利用分析方法來求得曲率半徑與圓頂厚度，並即時量測較易取得的壓力與膨脹高度(h)，再帶入式 2-14 與式 2-15，取得應力-應變關係曲線，其流程如圖 2.5。

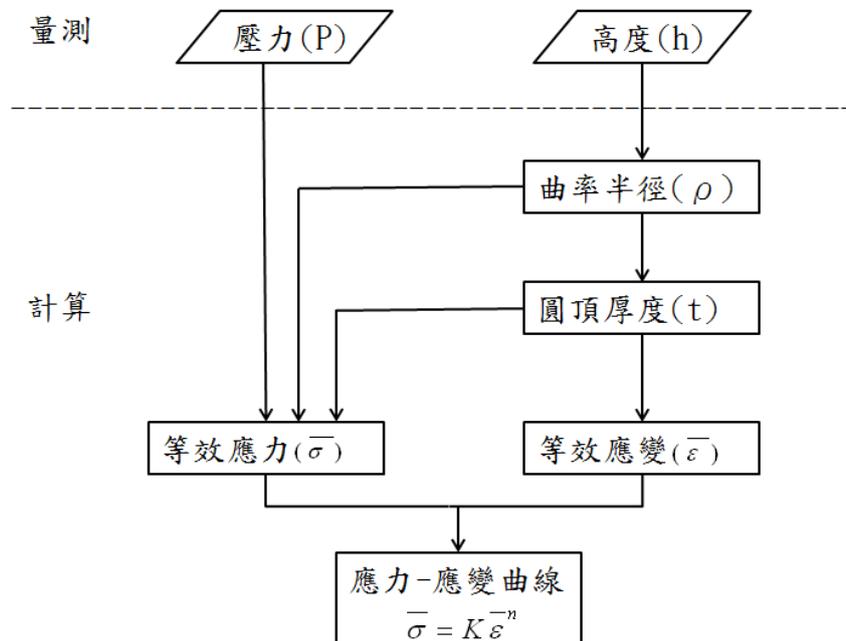


圖 2.5 決定應力-應變關係曲線之流程

## 2.2.2 曲率半徑之分析

由於在實驗的過程中，即時量測膨脹球殼之曲率半徑並不容易，需要使用複雜之設備量測，而為了使實驗簡單化，本研究考慮以文獻中分析之曲率半徑公式，如表 2.2，取代其複雜量測，使實驗更為便利。並且後續會將此分析公式與實驗結果比較，驗證(2-16)式與(2-17)式何者較為適用。其中，已知 Panknin 之曲率半徑公式有其限制，在膨脹高度( $h$ )大於壓力腔半徑( $R$ )的 0.56 倍後，其分析公式與實驗情況不符。

表 2.2 曲率半徑之分析

分析方法	曲率半徑
Hill(1950)[2]	$\rho = \frac{R^2 + h^2}{2h} \quad (2-16)$
Panknin(1959)[4]	$\rho = \frac{(R + r_f)^2 + h^2 - 2r_f h}{2h} \quad (2-17)$

## 2.2.3 圓頂厚度之分析

由於在實驗的過程中，無法即時量測膨脹球殼之圓頂厚度，必須將試片取下後量測，只能分別使用不同試片，階段性的實驗，並無法以一試片連續實驗取得量測資訊，因此本研究亦考慮文獻中以解析分析之圓頂厚度之公式，如表 2.3，取代其階段量測，使實驗更為便利。

並且後續會將此分析公式與實驗結果比較，驗證哪一公式較為準確。

表 2.3 圓頂厚度之分析

分析方法	圓頂厚度
Hill(1950)[2]	$t = t_0 \left[ \frac{1}{1 + (h/R)} \right]^2 \quad (2-18)$
Kruglov et al.(2002)[3]	$t = t_0 \left[ \frac{R/\rho}{\sin^{-1}(R/\rho)} \right]^2 \quad (2-19)$

## 2.3 成形極限實驗之理論分析

成形極限實驗是為了調查薄板成形的難易或成形的極限，並瞭解薄板在各種成形狀態的過程中，薄板變形所發生的成形不良現象或破裂，而進一步將成形極限實驗的結果，即材料的極限特性關係，用體系的方式以成形極限圖表示。

### 2.3.1 成形極限圖

成形極限圖是以主應變  $\varepsilon_1$  為縱座標，次應變  $\varepsilon_2$  為橫座標，並將薄板以各種成形狀態變形至破裂時之應變，即為薄板成形的極限應變，以座標圖形的方式繪出，構成一成形極限圖，如圖 2.6 所示。成形極限圖中的成形極限曲線為一帶狀，若  $\varepsilon_1$  與  $\varepsilon_2$  的組合，落於成形極限

曲線之上，則代表工件已發生破裂；若  $\varepsilon_1$  與  $\varepsilon_2$  的組合落在成形極限曲線之下，則表示工件處於安全狀態；而中間的帶狀區域稱為臨界區，表示工件在此部份有瀕臨破裂的危險，須加以注意。

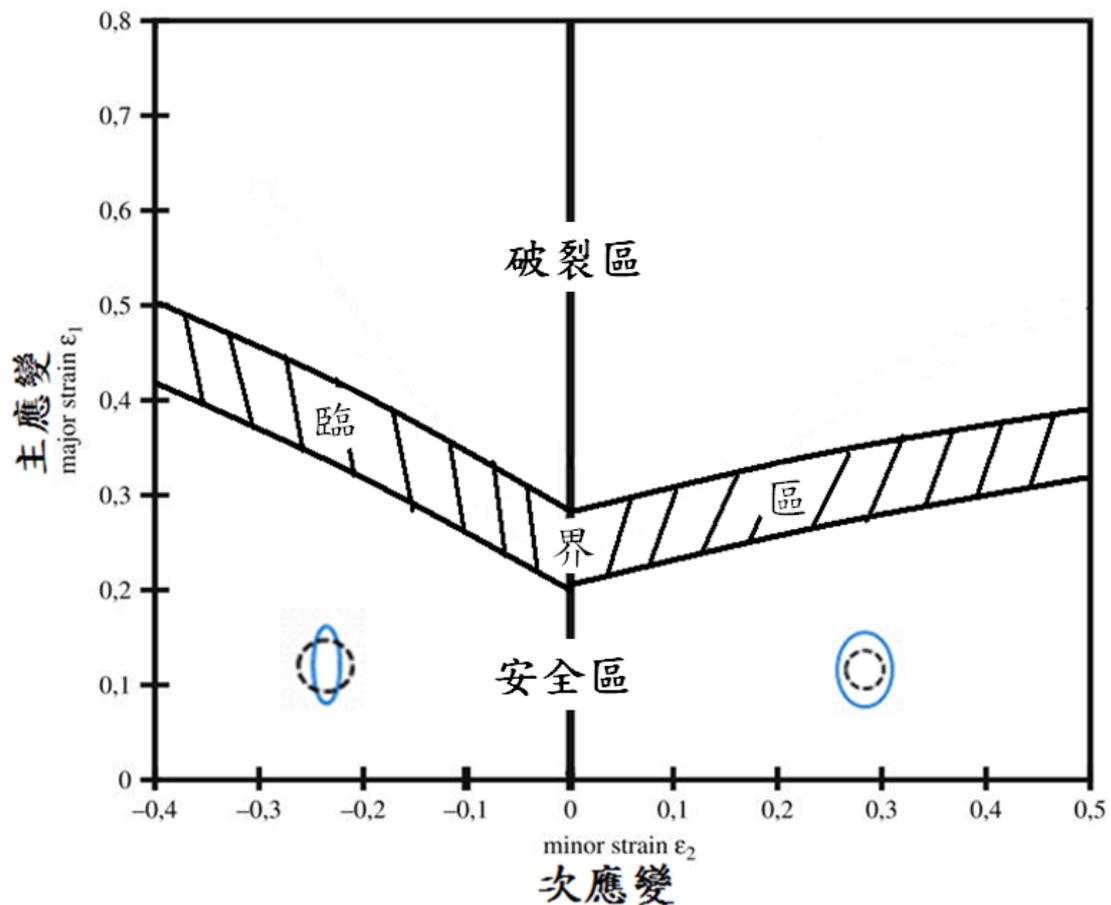


圖 2.6 成形極限圖

成形極限圖為一判斷薄板之成形性的準則，薄板在不同的應力狀態下變形，會產生不同的應變狀態，藉由成形極限圖可以得到薄板不同成形狀態的應變的資訊，也包括破裂時的極限應變資訊。而為了瞭解薄板變形後的應變狀態，主要是以網格分析法 (circle grid analysis) 進行解析。

### 2.3.2 網格分析法

係在金屬薄板上網印一均勻分布的圓形網格，將此薄板成形後，測定薄板變形後所繪網格形狀變化的方法。網格原始直徑為  $d_0$ ，在薄板受一平面應力變形後，網格也隨之變形產生不同的大徑( $d_1$ )與小徑( $d_2$ )，如圖 2.7 所示，再藉由網格的變化量，計算求得其應變量，主應變為  $\varepsilon_1 = \ln(d_1/d_0)$ ，次應變為  $\varepsilon_2 = \ln(d_2/d_0)$ ，進而瞭解薄板的變形狀態。

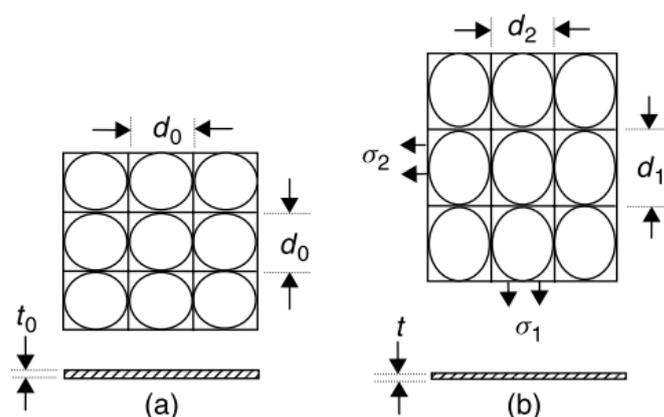


圖 2.7 薄板的元素(a)薄板變形前，網格為圓形，初始厚度為  $t_0$  (b)薄板變形後，網格為橢圓形，厚度為  $t$  [1]

### 2.3.3 應變圖

在應變圖中，薄板的變形狀態以一座標點表示，而薄板的變形過程通常都假設為線性的應變路徑，即應變比  $\beta = \varepsilon_2 / \varepsilon_1$  為一定值常數。藉由不同的應變路徑，會在應變圖上顯示出不同的變形狀態，等雙軸

拉伸( $\beta=1$ )，平面應變( $\beta=0$ )，單軸拉伸( $\beta=-1/2$ )，純剪應力( $\beta=-1$ )，  
單軸壓縮( $\beta=-2$ )，如圖 2.8 所示。

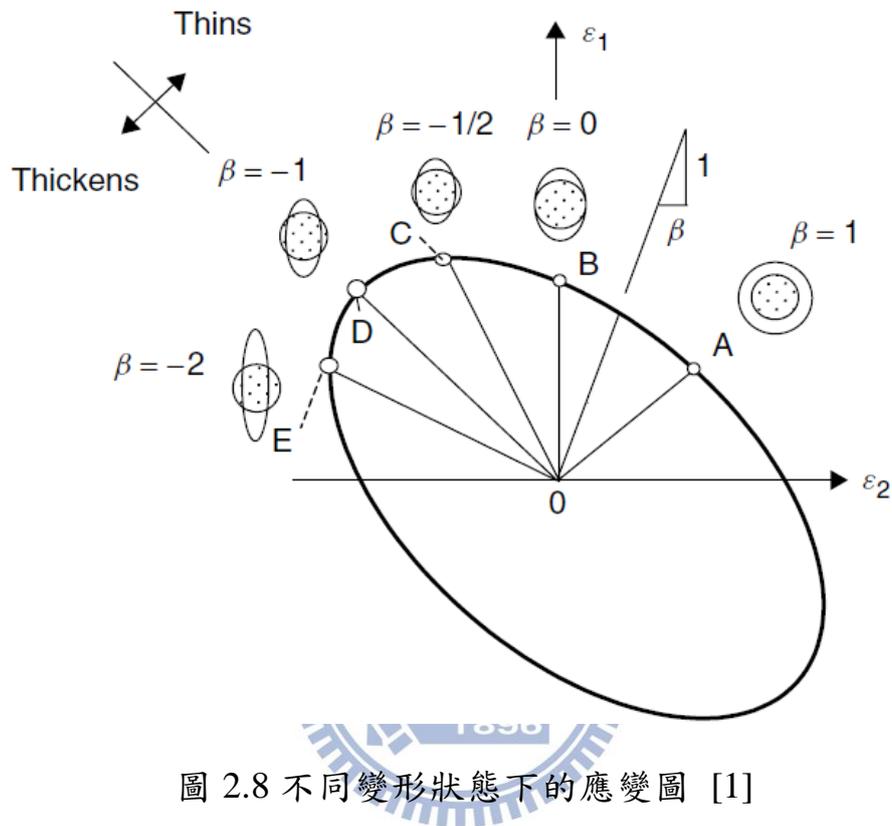


圖 2.8 不同變形狀態下的應變圖 [1]

而薄板成形極限實驗的目的就是完成一薄板之極限應變圖，藉由設計不同的模具幾何或試片幾何，使薄板由特定之應變路徑變形至破裂，而得到成形極限圖所需的極限應變，最後經由多種的應變路徑產生的極限應變構成完整的成形極限圖。

## 第三章 實驗規劃

本章首先建立了一液壓膨脹實驗設備，進行液壓膨脹實驗，再與單軸拉伸實驗之結果比較，確定液壓膨脹實驗之可行性。再以液壓膨脹實驗設備為基礎，發展液壓成形極限實驗，並與衝壓成形實驗之結果進行比較，確定液壓成形極限實驗之可行性。

### 3.1 液壓膨脹實驗

由於金屬薄板在成形時，主要的應力狀態並非只是受單軸應力，通常是以平面應力為主，而液壓膨脹實驗為雙軸應力的狀態，相對於單軸拉伸實驗，更適合於形容金屬薄板成形時的應力狀態。

#### 3.1.1 實驗設備之建立

實驗設備的概略關係圖如圖 3.1 所示，步驟依箭頭方向順序進行，使用比例洩壓閥控制油壓動力單元的出口壓力，並直接均勻施壓於薄板，壓力感測器與位移感測器量測並產生類比訊號，經由 AD 資料擷取卡轉成數位訊號後，再由撰寫的 LabVIEW 程式處理資料，並使用 LabVIEW 程式控制可控電源供應器輸出類比信號至比例洩壓閥，控制系統壓力。

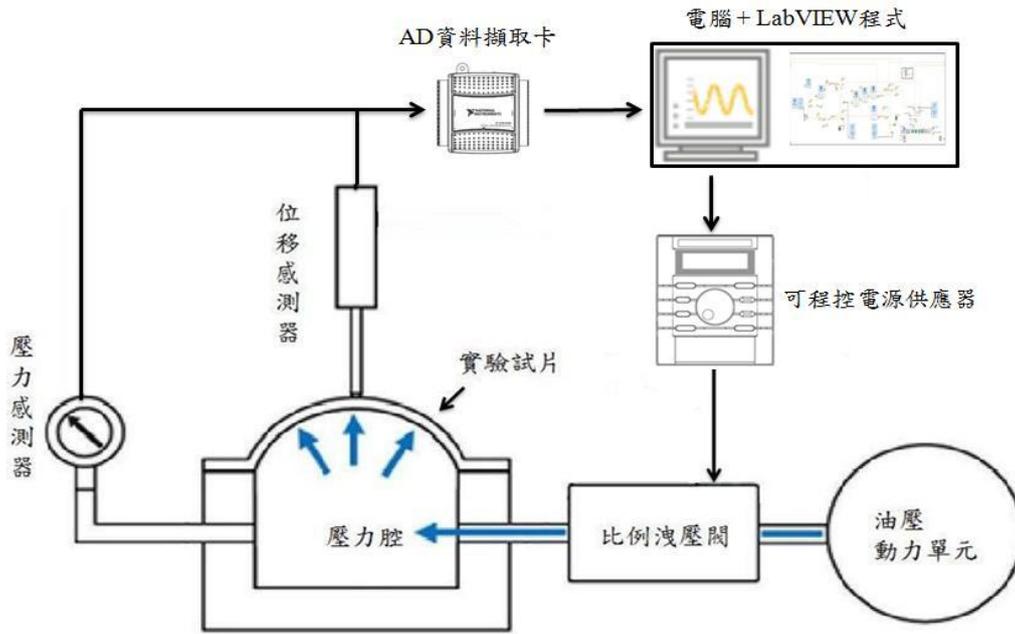


圖 3.1 系統間的作用示意圖

實驗設備主要包含夾具系統、液壓系統與量測與控制系統，其完整的設備元件如圖 3.2 所示，實體圖如圖 3.2a 與 3.2b 所示，系統間各元件規格如表 3.1，以下詳細說明系統各元件的基本原理與功能。

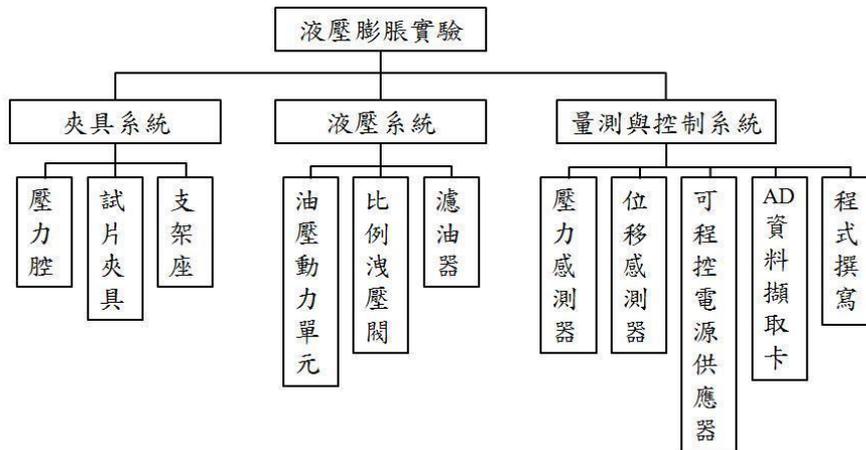


圖 3.2 系統架構

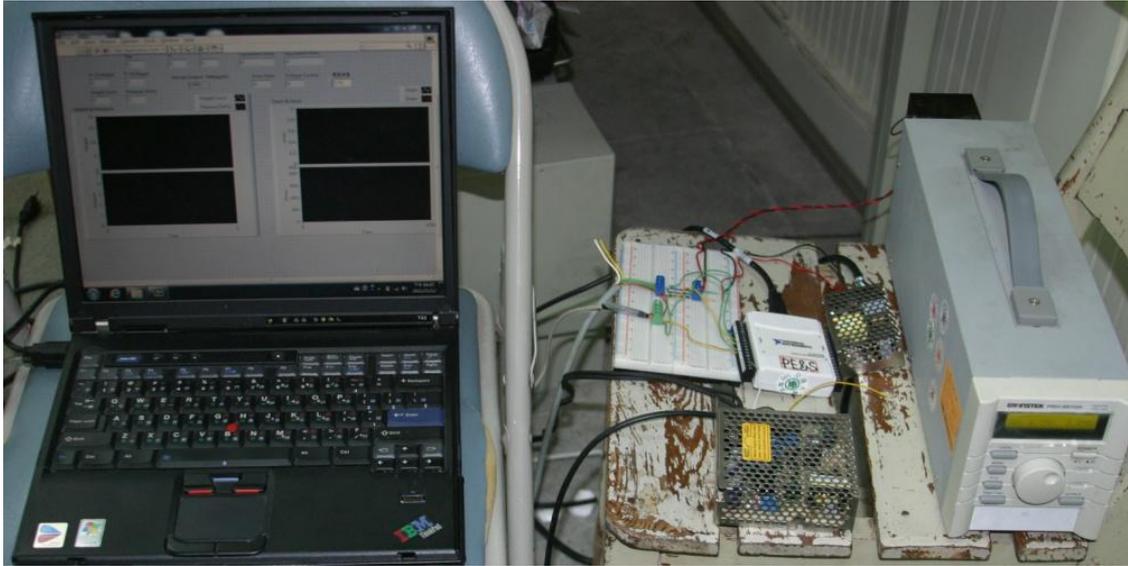


圖 3.2a 量測與控制系統



圖 3.2b 液壓系統與夾具系統

表 3.1 系統間各元件規格

元件	廠牌	規格
馬達	旭源馬達(台灣)	輸出馬力: 3HP 容許壓力: 200bar
電磁比例洩壓閥	HydraForce(美國) TS58-20-50-6TD-N-12DG	容許壓力: 345 bar
電磁比例洩壓閥控制器	HydraForce (美國) Controller #4000165	操作電壓: 12V 輸入電壓: 0-10V
壓力感測器	久德電子(台灣) JPT-131	容許壓力: 0-400 bar 操作電壓: 24V 輸出訊號: 0-10V 精度: 0.5%
位移感測器	MyTech(台灣) RP-TR-100	操作電壓: 0-42V 有效行程: 100 mm 輸出訊號: 電壓 精度: 0.01 mm 最大作業頻率: 10Hz
AD 資料擷取卡	NATIONAL INSTRUMENTS (美國) 1896 NI USB-6009	通訊介面: USB 可識別電壓輸入: 0-10 V 取樣速率: 48 kHz
可程控電源供應器	固緯電子(台灣) PSH-3610A	通訊介面: RS232 輸出電壓: 0-36 V 精度: 0.005 V 最大作業頻率: 6.7Hz

(1) 夾具系統：

夾具系統為用來固定液壓膨脹實驗中各部件之空間幾何關係，夾具系統主要分為三部件，支架部件、壓力腔與試片夾具。支架部件除電阻尺支架組件與試片座支架外，亦有支架組件固定試片座與位移量測系統，可對位移量測系統之中心點定位做微調整以修正準確性，並包含固定所有組件相關位置之底座；試片座係用來固定試片，並使試

片與油體接觸面之周緣密封，進而建構出液壓膨脹實驗進行時可提供均勻液壓之壓力腔。試片之固定方式係為以試片上十六個位置對稱之孔洞來定位試片，再由十六根位置對稱之螺絲穿過孔洞，均勻施力鎖附使試片底下油體密封產生壓力腔。夾具系統實體圖如圖 3.3，其詳細尺寸規格請見附錄 A。

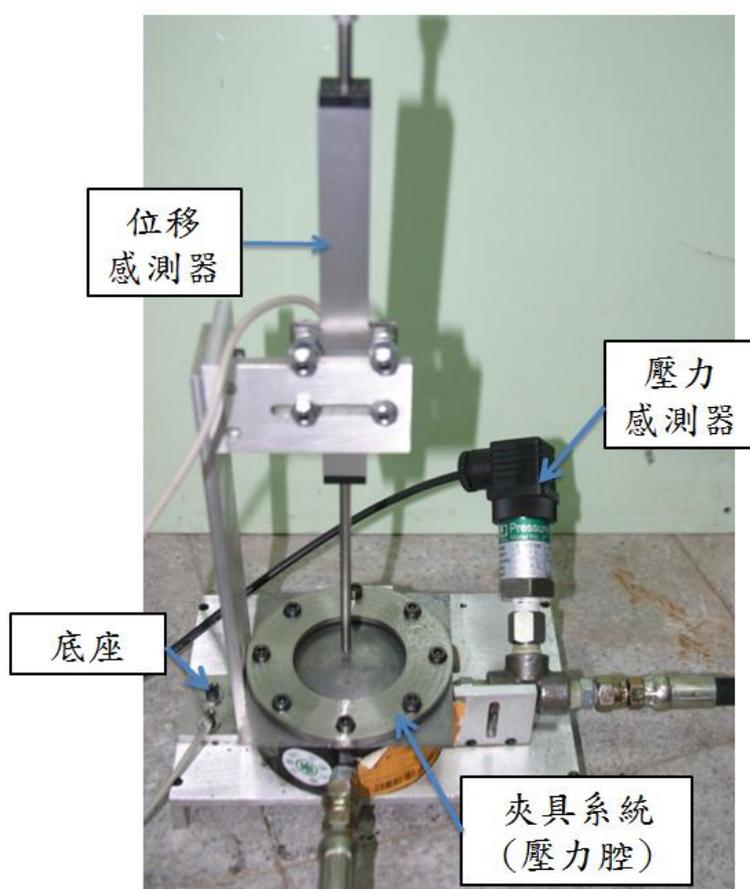


圖 3.3 夾具系統實際成品與電阻尺和壓力感測器

## (2)液壓系統：

液壓系統為液壓膨脹實驗之動力源，主要是利用比例洩壓閥的特

性，控制油壓動力單元的輸出壓力，以完成使試片膨脹之目的。液壓系統總共分為六部件，為油壓動力單元、電磁比例洩壓閥、可變節流閥、停止閥、過濾器與配接之硬/軟管，油路設計示意如圖 3.4 所示。

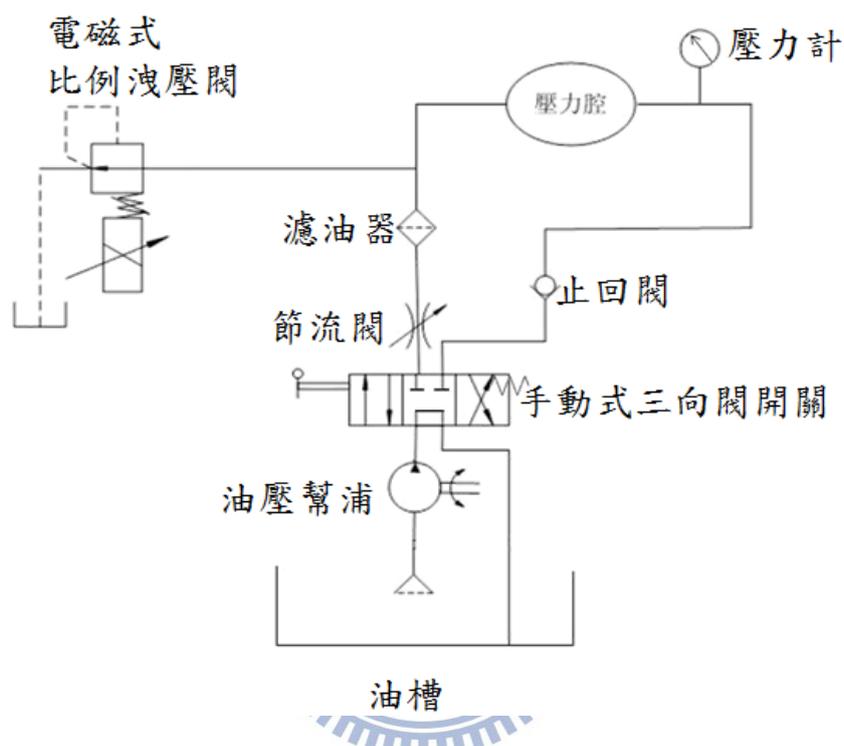


圖 3.4 油路設計示意圖

(a)油壓動力單元：

本研究液壓系統所使用之油壓動力單元分成四個部份，為電動馬達、油壓幫浦、儲油槽與手動式三向閥開關，如圖 3.5 所示。油壓幫浦是藉由電動馬達的旋轉，驅動輸入軸使機械能轉換成液壓能的裝置，油壓幫浦的主要功能是提供整個液壓系統一個固定的壓力及流量，為整個液壓設備的動力來源。

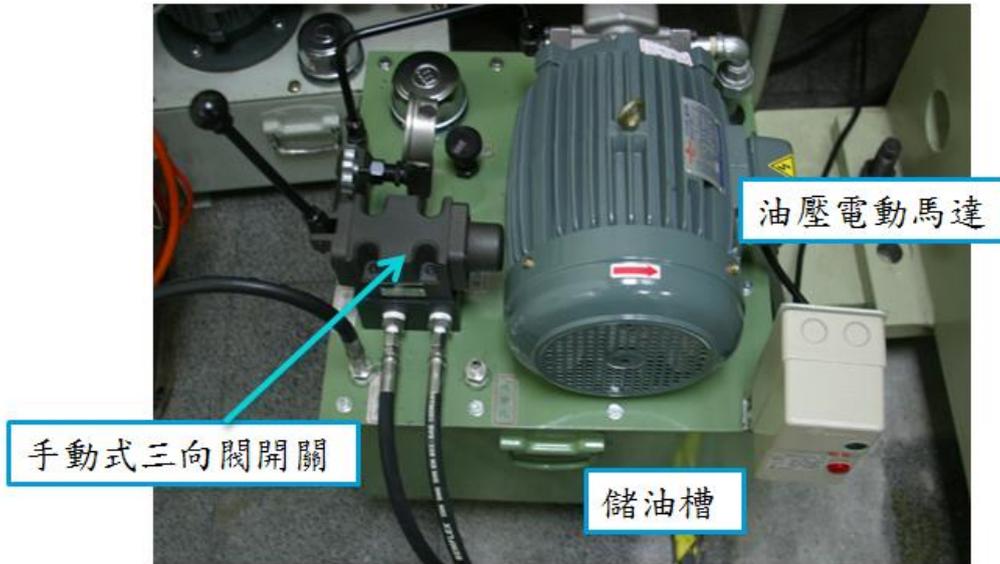


圖 3.5 油壓動力單元

(b) 電磁式比例洩壓閥(electro-proportional relief valve)：

電磁比例洩壓閥主要是透過比例放大器接受一可變的電流，讓電流經直流式線圈而獲得與電流成比例關係之作用力擠壓彈簧，使閥軸移動，藉而精確控制管路油壓的壓力[20]，其控制系統如圖 3.6 所示。

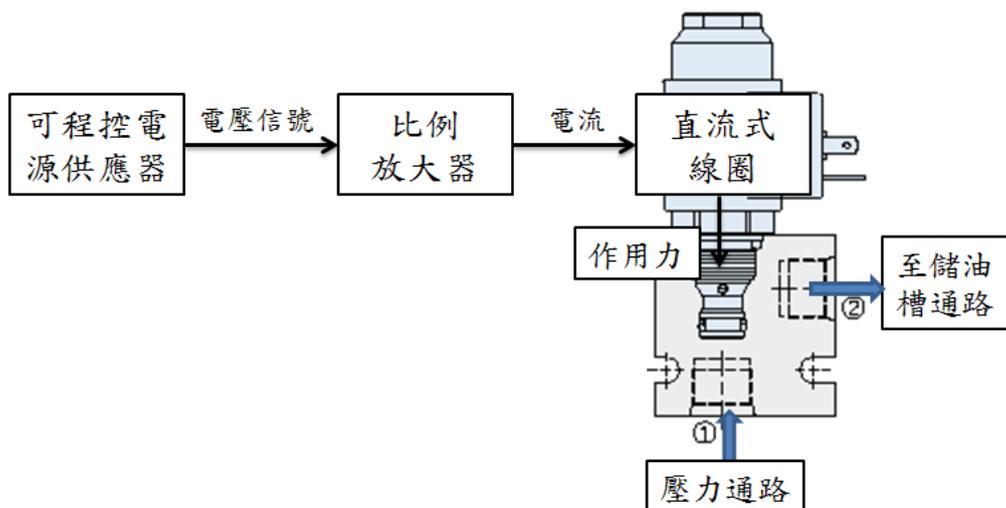


圖 3.6 電磁比例閥的控制系統示意圖

本實驗使用 HydraForce (TS58-20)比例洩壓閥如圖 3.7 所示，其工作原理為：阻止從①到②的流量，直到①獲得足夠的壓力來抵銷電磁驅動閥軸的力。如果電磁閥中無電流，則油液可以自由從①流向②。輸入電流與壓力特性曲線如圖 3.8 所示，實際使用狀況如圖 3.9。

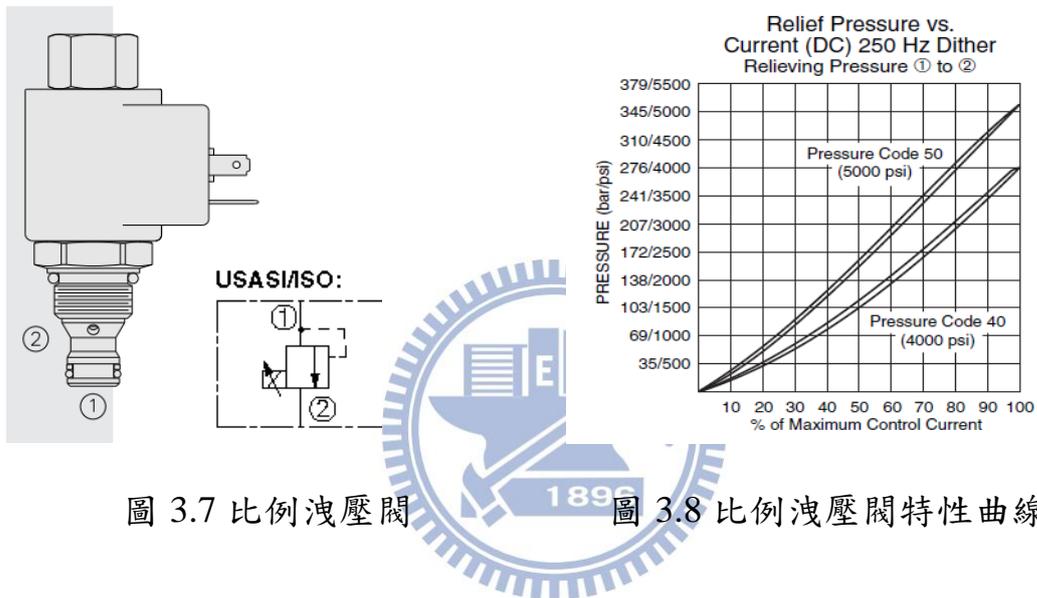


圖 3.7 比例洩壓閥

圖 3.8 比例洩壓閥特性曲線

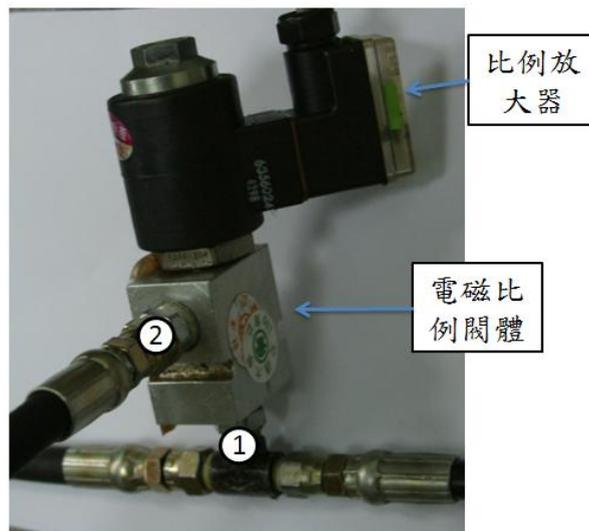


圖 3.9 電磁比例洩壓閥實際使用狀況

(c) 濾油器：

液壓控制系統在長時間運轉後，壓油中可能含有灰塵、污垢、填料碎片、鐵銹等污物，此些污物會造成液壓泵及各種液壓元件之損壞，故一般在液壓迴路中需安裝過濾器，將污物去除。

(d) 液壓油：

輸出液壓之流體媒介為中國石油公司出品的特級循環機油 CPC-R68，適用溫度範圍為 5-40°C。

(3) 量測與控制系統：

量測與控制系統為控制液壓膨脹實驗進行與記錄數據之主幹，量測與控制系統分為包含壓力感測器、位移感測器、可程控電源供應器、AD 資料擷取卡、電子比例洩壓閥控制器與程式撰寫。

(a) 壓力感測器：

壓力感測器是利用元件之變形，來改變元件之電阻值，然後將此一電阻值變化，利用電量方式測量，就可以量測到壓力的大小。本實驗使用的壓力感測器，對應 0-400bar 壓力量測範圍，輸出 0-10V 的電壓訊號(三線式輸出)。壓力感測器的特性曲線為一線性關係，因此使用 AD 資料擷取卡量測到電壓量，以 40bar/1V 換算回壓力值資料，壓力感測器接線如圖 3.10 所示。

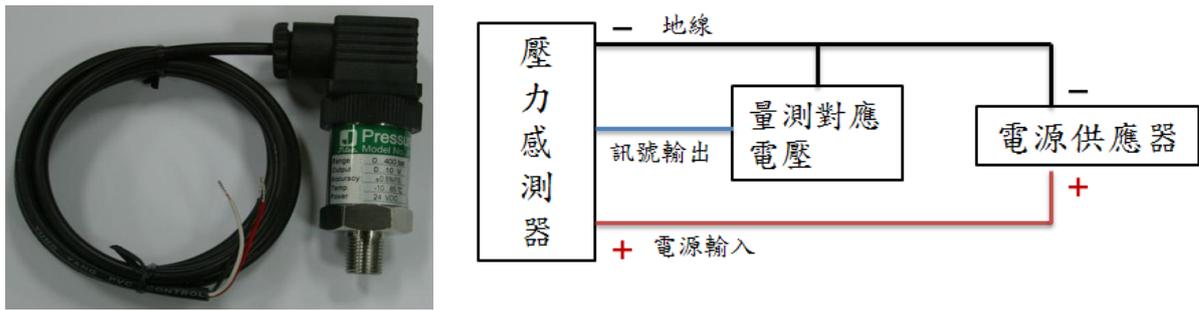


圖 3.10 壓器感測器實體圖與使用接線圖

(b) 位移感測器：

本實驗使用 MyTech(RP-TR-100)的電阻尺，其原理為等效於一線性電位計，當位移產生時帶動簧片(wipers)改變電阻  $R_x$  之阻值，將電阻尺線性的位移變化以電阻的變化輸出，藉由量測電阻改變的電壓，推回實際的位移量，如圖 3.11 所示之電路圖，而  $V_{out}$  為量測之電壓， $V_{in}$  為輸入之操作電壓；由於電位計的內部是利用接觸式簧片改變電阻值，造成輸出電壓之改變，因此在使用壽命方面有一定的年限。並使用片規校準電阻尺取得其特性曲線，做為計算位移量的依據，如圖 3.12 所示。



圖 3.11 電阻尺實際圖與原理電路圖

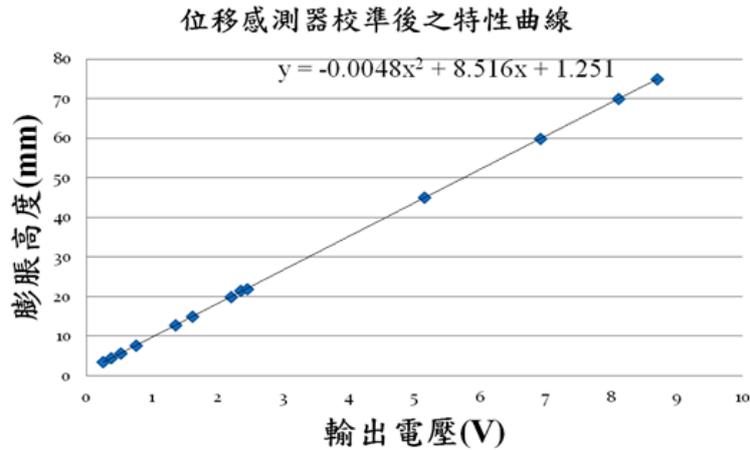


圖 3.12 電阻尺校準後之特性曲線

(c) 可程控電源供應器：

本實驗使用台灣固緯電子的可程控電源供應器，為一可程式交換式電源供應器，整個系統完全由微處理器(MPU)控制，可以輕易的利用通訊介面(RS-232 或 GPIB)與電腦(PC)連線，再藉由所撰寫的 Lab VIEW 程式，用電腦控制可程控電源供應器之輸出電壓，而被輸入電壓端之比例洩壓閥控制器，便根據輸入電壓大小來調整比例洩壓閥之流量，如圖 3.13 所示。



圖 3.13 可程控電源供應器

(d) AD 資料擷取卡：

擷取卡的功能是負責與外界訊號源(如:感測器)溝通的介面，負責將訊號作轉換(A/D 及 D/A)及放大的功能[21]。本實驗使用的資料擷取卡(DAQ)，為 USB 通訊介面，如圖 3.14 所示。



圖 3.14 AD 資料擷取卡

(e) 程式撰寫：

本研究以 LabVIEW 做為基礎系統規劃實驗程式，用視覺化之線路圖介面來進程式設計，前端控制板面(Front Panel)如圖 3.15 所示，功能圖塊(Block Diagram)如圖 3.16 所示。程式主要工作為擷取高度與壓力的數據並儲存後，控制可程控電源供應器之輸出電壓，進而控制油壓壓力，並且使薄板變形時的變應變率小於  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。其中所編寫之各模組可分為以下部份簡介：

(e.1) AD 端輸入模組：啟動 AD 資料擷取卡之軟體媒介，將

外界之類比訊號轉讀入後換為數位訊號，可設定每秒讀

取資料數速率。

- (e.2) 應力與應變式換算模組：主要由方程式功能塊組成，可將整理完後之電壓數據換算成壓力與高度，再換算出等效雙軸應力與雙軸應變值。
- (e.3) 判斷控制模組：所使用之控制原理為微分控制，依據所量得並換算後之數據資料，判斷所控制之液壓系統中比例洩壓閥是否升或降流量，再將可程控電源供應器應調整的電壓值傳送到 DA 端輸出模組，並且當膨脹高度超過設定限制值時停止輸出控制電壓。
- (e.4) DA 端輸出模組：啟動可程控電源供應器之軟體媒介，透過 RS232 傳輸介面改變可程控電源供應器之輸出電壓，而被輸入電壓端之比例洩壓閥控制器，便根據輸入電壓大小來調整比例洩壓閥之流量。
- (e.5) 數據文件編列模組：將資料寫入文件檔案之用，本研究預設輸出之檔案類型為 EXCEL 之數據列檔案。

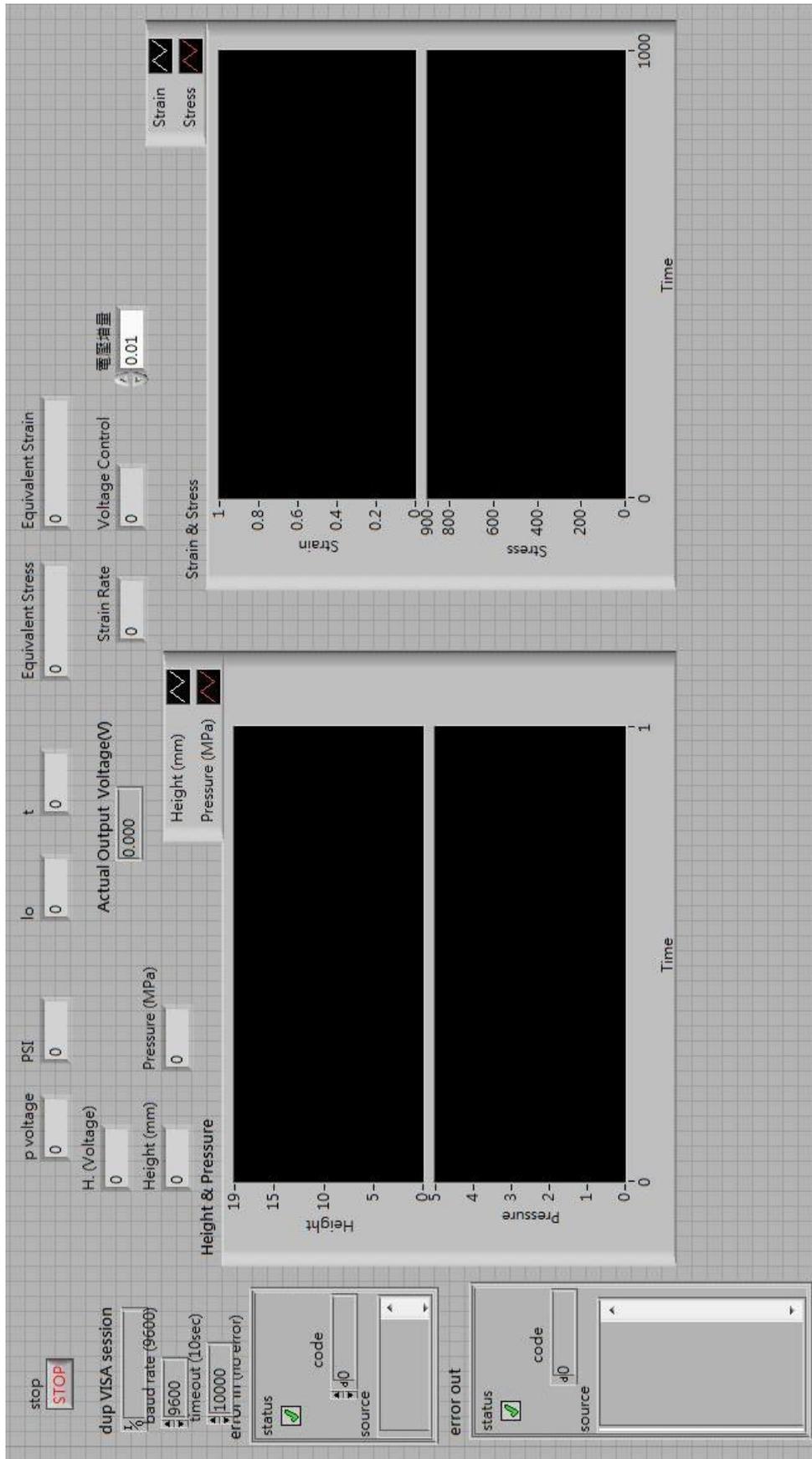


圖 3.15 前端控制面板面所示

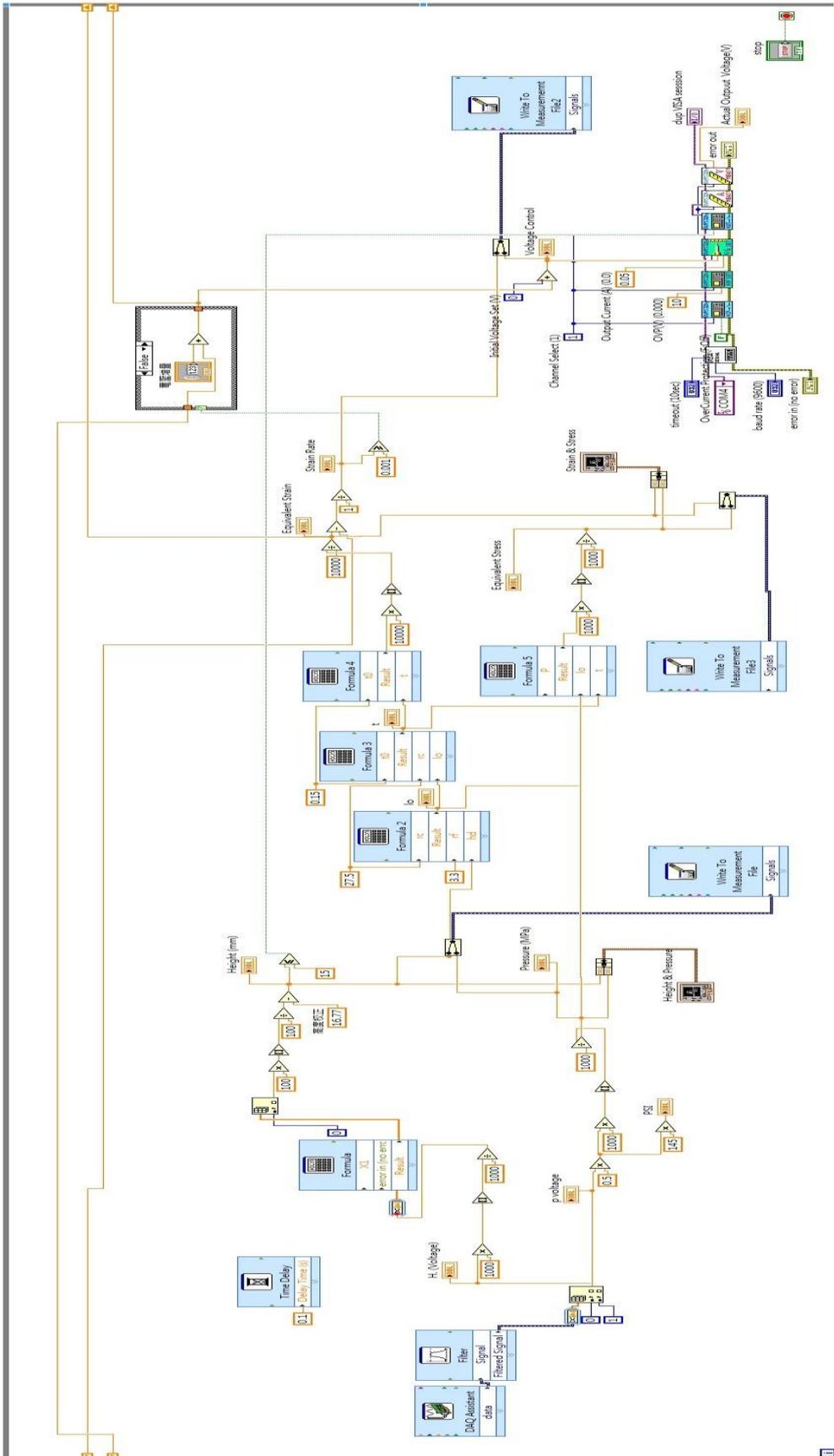


圖 3.16 功能圖塊

### 3.1.2 實驗規劃

本實驗的材料是使用厚度 0.1mm、面積 100mm\*100mm 且退火過的不銹鋼板(SUS304)。使用液壓直接作用薄板，使圓周被夾持固定住的薄板進行軸向膨脹。並且為了確定圓頂厚度與曲率半徑分析公式之選用，本研究除了使用圓頂厚度與曲率半徑分析公式進行連續實驗外，也規畫了一階段實驗，將實際量測到的圓頂厚度與曲率半徑與分析公式做比較驗證。以下詳細說明實驗的進行方式。

#### (1)連續實驗：

在薄板膨脹成形時，膨脹高度從低到高不間斷，連續量測高度與壓力，並即時由分析公式計算圓頂厚度與曲率半徑，再帶入公式取得真實應力-應變曲線。

#### (2) 階段實驗：

在薄板膨脹成形時，將膨脹高度從低到高，分成各個階段，一個高度為一個階段，使用一片試片，所以整個實驗過程，一分成的階段個數，需使用幾片試片，並在每一階段分別量測高度、壓力、厚度與曲率半徑值。

### 3.1.3 實驗流程

液壓膨脹實驗系統建立完後，標準之實驗作業流程分成三階段，即為初始階段、動作階段與結束階段：

a. 初始階段：

- (1) 在實驗初始階段，以夾具系統固定試片，校準電阻尺指向試片中心點。
- (2) 啟動油壓馬達使液壓系統開始空轉。
- (3) 開啟可程控電源供應器重設比例洩壓閥控制器，使比例洩壓閥關閉。
- (4) 啟動量測與控制系統。



b. 動作階段：

- (5) 實驗進入動作階段，切換油壓馬達三向閥使液壓系統之油體開始流動。
- (6) 電子式壓感計與電阻尺透過放大器傳送類比訊號至 AD 資料擷取卡。
- (7) AD 資料擷取卡將類比資料轉換為數位資料。
- (8) 透過程式內部已編寫好之方程式，計算壓力與應變式。
- (9) 判斷是否超過膨脹高度限制，同時將量測所得資料寫入數據列檔案。

- (10) 未超過膨脹高度限制，則繼續判斷應變率是否超過標準。
- (11) 根據上述判斷結果，透過可程控電源供應器調整比例洩壓閥控制器電壓。
- (12) 當試片膨脹達到實驗設定之最大高度時動作階段結束。
- c. 結束階段：
- (13) 實驗進入結束階段，降低比例洩壓閥控制器之電壓以關閉比例洩壓閥。
- (14) 切換三向閥使油壓馬達恢復空轉狀態後關閉油壓馬達運作。
- (15) 開啟油管末端之停止閥使油體回流油槽。
- (16) 關閉可程控電源供應器，使其內部記憶體資料清除重設。
- (17) 待已成球體之試片洩壓完畢，移除試片後實驗完成。

## 3.2 單軸拉伸實驗

單軸拉伸實驗目的主要是取得材料的基本機械性質，如：彈性係數、塑性性質及方向性等，並可應用於有限元素分析中所需之材料性質。

本實驗的材料是使用厚度 0.1mm、面積 100mm\*100mm 且退火過的不銹鋼板(SUS304)。拉伸實驗之試片尺寸由 ASTM-E8 之拉伸規範決定，然而考慮得到之試片的面積只有 100mm\*100mm，故將試片

大小依原始試片尺寸做等比例縮小，拉伸試片尺寸如圖 3.17 所示。

另外，考慮不銹鋼薄板的方向性，因此於同一片薄板上切割了三種方向的拉伸試片，由滾軋方向為基準，做 0 度、45 度與 90 度三種方向的拉伸試片，進行單軸拉伸實驗，其拉伸試片配置如圖 3.18 所示。

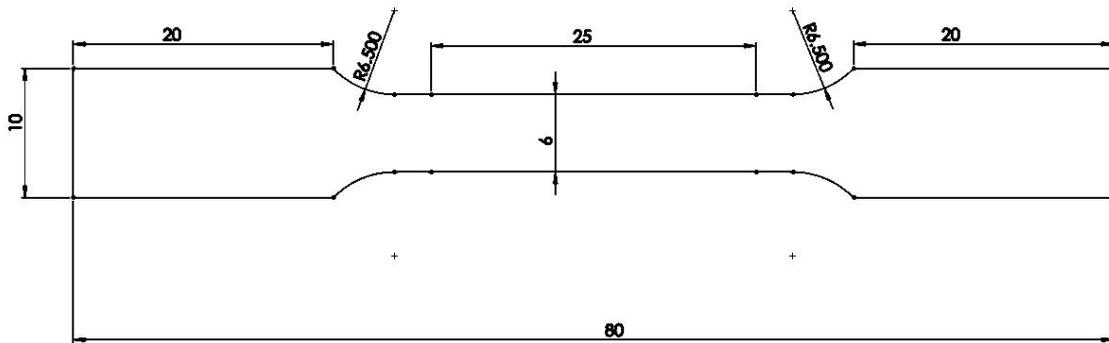


圖 3.17 拉伸試驗試片尺寸圖(mm)

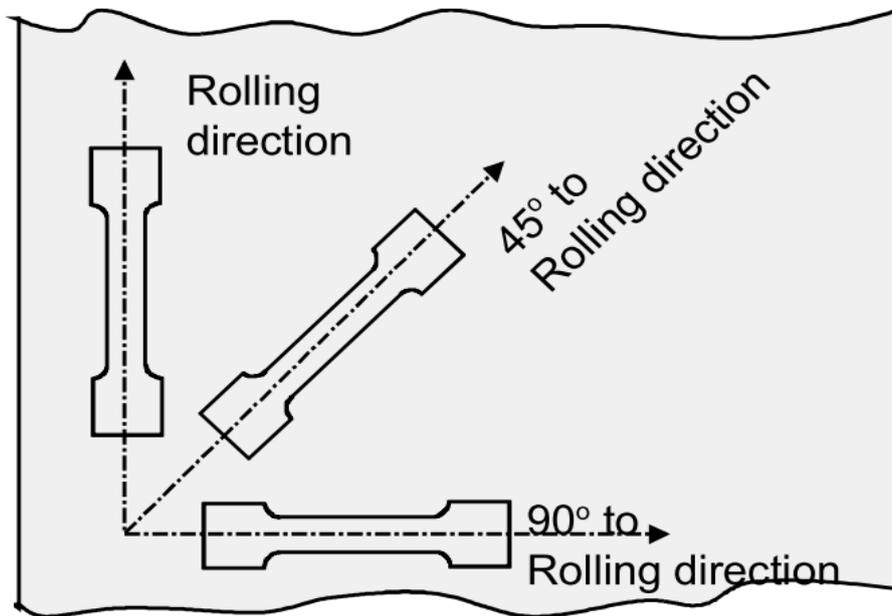


圖 3.18 SUS304 拉伸試驗試片配置圖

本實驗在常溫下進行，並設定拉伸速率為 0.025mm/s 將試片拉伸至斷裂，由擷取器擷取紀錄拉伸試驗機上荷重元(load cell)所量測之荷重值( $P$ )、位移量( $\Delta l$ )及應變規之應變值( $\varepsilon_T$ )，藉此取得材料的機械性質，即應力-應變關係曲線。

本研究之拉伸試驗是採用本系之 MTS-810 萬能試驗機如圖 3.19 所示，並針對同一薄板的三種方向的拉伸試片進行一組單軸拉伸實驗。



圖 3.19 MTS-810 萬能試驗機

### 3.3 成形極限實驗

本研究除了發展一液壓成形實驗，以取得薄板的成形極限圖外，也進行傳統使用圓形沖頭的衝壓成形實驗，並將兩實驗結果做比較，驗證液壓成形實驗的可行性。

成形極限實驗的材料是使用厚度 0.1mm、面積 100mm\*100mm 且退火過的不銹鋼板(SUS304)。並藉由改變不同的試片形狀，以達到不同的應變路徑，如圖 3.20 所示。

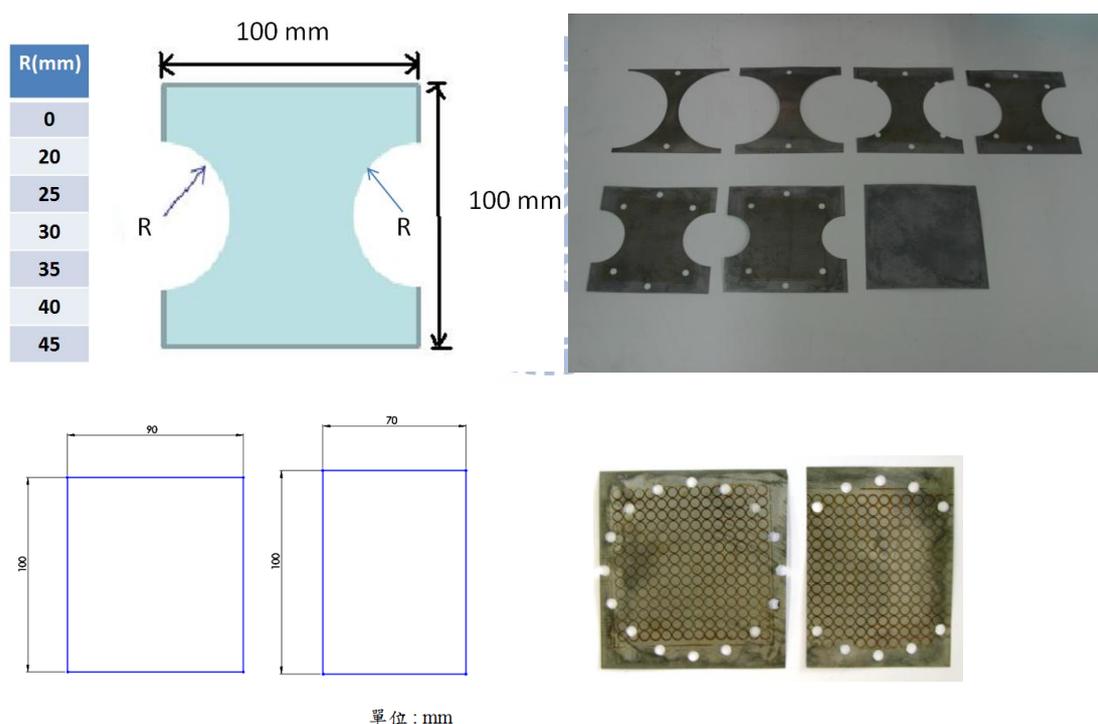


圖 3.20 成形極限實驗之試片規劃

為了瞭解薄板的成形性，在薄板上網印一均勻分布且直徑為 5mm 的圓形網格，如圖 3.21 所示，並經由不同應變路徑的薄板成形極限實驗，使薄板受不同的平面應力變形至破裂後，量測破裂周圍的

網格變化量，以求得材料在不同應變路徑下之極限應變值，即最大主應變  $\varepsilon_1$  與最大次應變  $\varepsilon_2$ ，進而建立一成形極限圖。

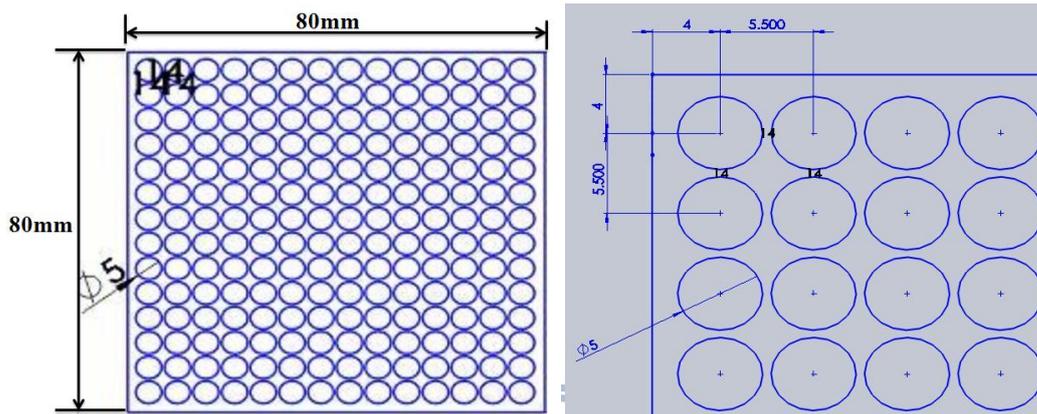


圖 3.21 網格設計

本實驗使用廣華電子的金屬電印機 HD-600，如圖 3.22 所示。可適用於各系列鋼材、鋁、銅、合金、鎂、鉻...等。金屬材質凡工作母機配件手工具軸承，汽車零件等金屬製品均可適用。

其工作原理為利用金屬電印機輸出電力，經印頭、網版（網格圖形），再經化學電解液，向金屬製作加工物放電，將網格圖形鉻印於金屬製品上，如此則可永久鉻印於金屬表面上，永不脫落，且沒有變形，毛邊或應力等不良因素產生。因此為了瞭解金屬變形後的應變狀態，可以鉻印圓型網格於未變形前的金屬上的，再觀察網格的變形狀況，即可瞭解金屬真實的應變情形。



圖 3.22 金屬電印機

### 3.3.1 液壓成形極限實驗

本實驗與衝壓成形實驗最大的不同是以液壓為成形力來對金屬薄板成形，並利用本研究自行研發的液壓膨脹實驗機台發展並進行一金屬薄板液壓成形極限實驗。針對裁切過的試片，提出一使用橡膠做為液壓傳遞壓力的概念，以取得左半部與部分右半部的成形極限圖。針對未裁切過的試片直接進行液壓膨脹實驗，取得等雙軸拉伸變形的成形狀態，即部分右半部的成形極限圖。

本實驗以分為兩部份：

#### (1) 橡膠結合液壓成形實驗之概念：

使用圓形模具，並以裁切過的金屬薄板做為試片，在試片與壓力腔中間，夾入一層厚度 10 mm 的 PU 橡膠，可以藉由橡膠均勻地將壓力傳遞至試片，取得左半部與部分右半部的成

形極限圖。此外，橡膠也提供一密封的功能，可以防止液壓油在成形時外洩，如圖 3.23 所示。

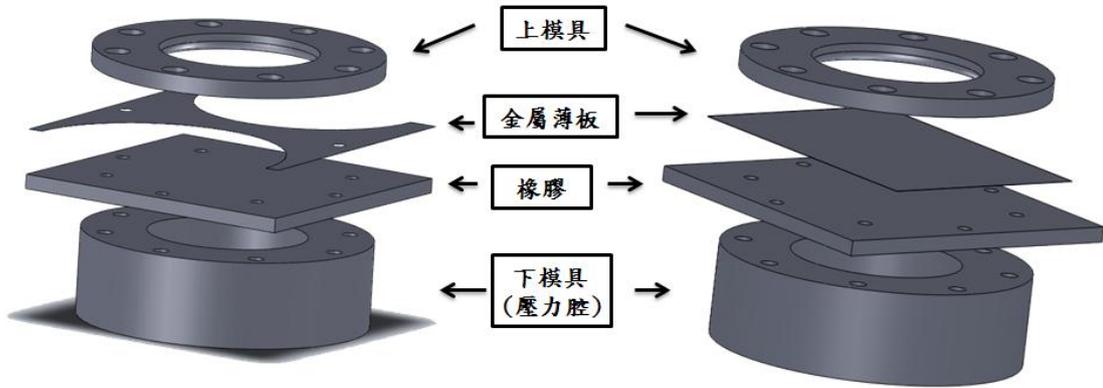


圖 3.23 橡膠結合液壓成形實驗之概念圖

(2) 直接液壓成形極限實驗之概念：

以未裁切過的金屬薄板做為試片，中間不加橡膠，對金屬薄板直接以液壓成形進行實驗，如圖 3.24 所示。並藉由使用圓形的上模具，使金屬薄板以等雙軸拉伸的應力狀態成形，取得成形極限圖右半部份之資訊，其模具組如圖 3.25 所，詳細尺寸參見附錄 B。

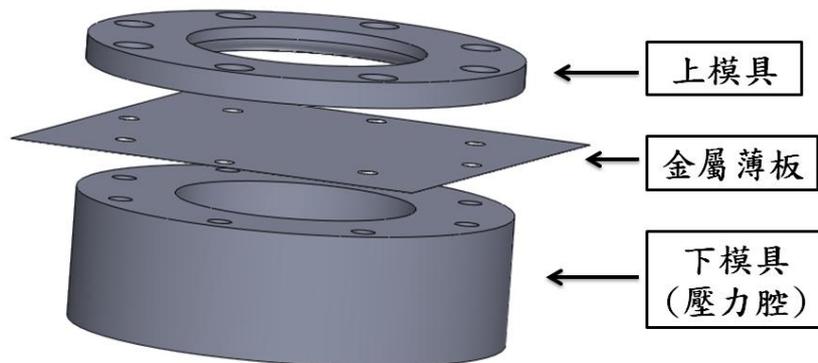


圖 3.24 直接液壓成形極限實驗之概念圖



圖 3.25 圓形模具

最後將上述(1)與(2)的結果結合，即構成一完整的成形極限圖，  
如圖 3.26 所示。

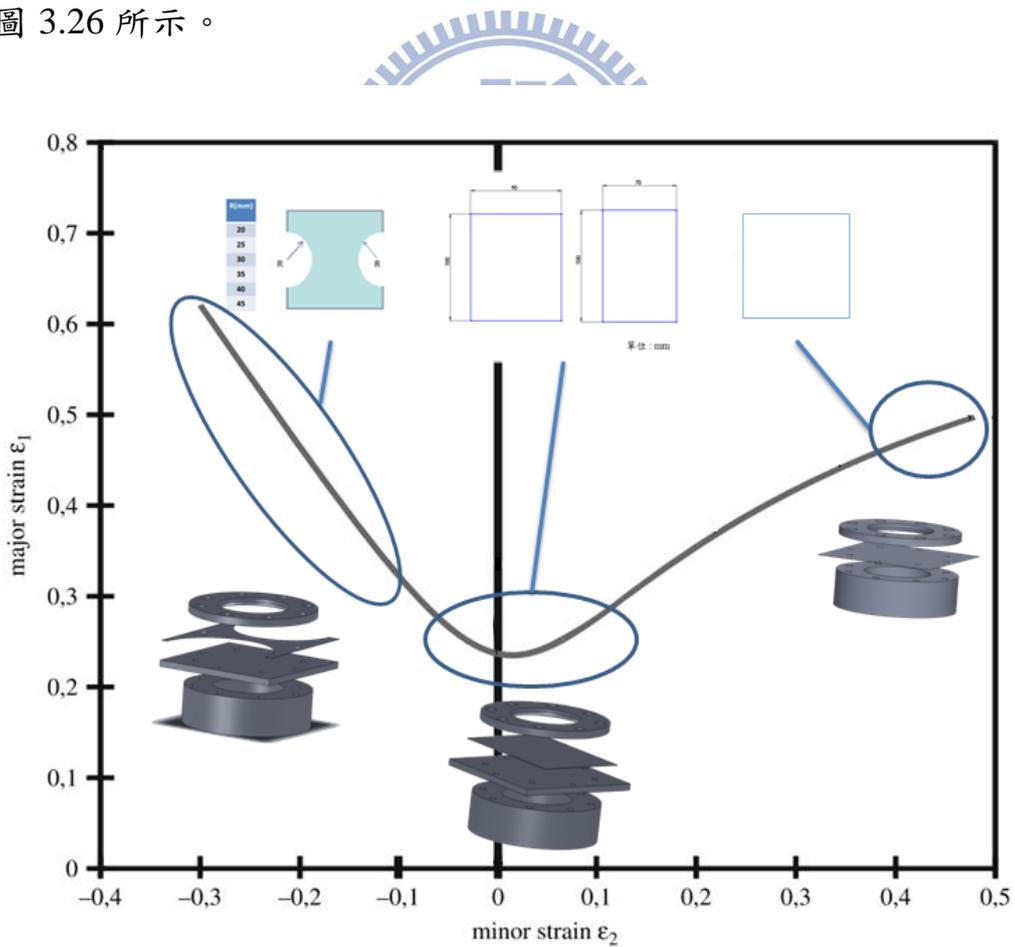


圖 3.26 液壓成形極限圖之完整概念

### 3.3.2 衝壓成形極限實驗

傳統的金屬薄板衝壓成形極限實驗，是藉由不同的試片規劃，圖 3.20 所示，以達到不同的應變路徑，再使用一球型沖頭與模具組件，對金屬薄板衝壓成形至破裂狀況後，觀察其網格變化，得到不同的極限應變值，最後構成一成形極限圖。

本實驗使用台科大機械系提供之 50 噸萬能深引伸試(SAS-50-D, TOKYO TESTING MACHINE INC.)，如圖 3.27 所示，模具組件與沖頭如圖 3.28 所示，其沖頭直徑為 60mm。



圖 3.27 萬能深引伸試驗機



圖 3.28 模具組件與沖頭



## 第四章 實驗結果與討論

### 4.1 液壓膨脹實驗

連續液壓膨脹實驗：針對單一試片，將其膨脹成形高度從 0 到 12mm 後停止，如圖 4.1 所示；階段液壓膨脹實驗：針對五片試片，分別將其膨脹成形至 3、4、6、8、10mm 後停止，如圖 4.2 所示。



圖 4.1 連續實驗之試片



圖 4.2 階段實驗之試片

#### 4.1.1 曲率半徑之分析與量測驗證

藉由階段實驗，直接量球殼之曲率半徑，並與 Panknin 和 Hill 的曲率半徑分析公式做比較，其結果如圖 4.3 所示。觀察圖中得知 Panknin 計算的曲率半徑與實驗量測具有相當的一致性。所以在後續液壓膨脹實驗中，使用 Panknin 的曲率半徑分析公式。

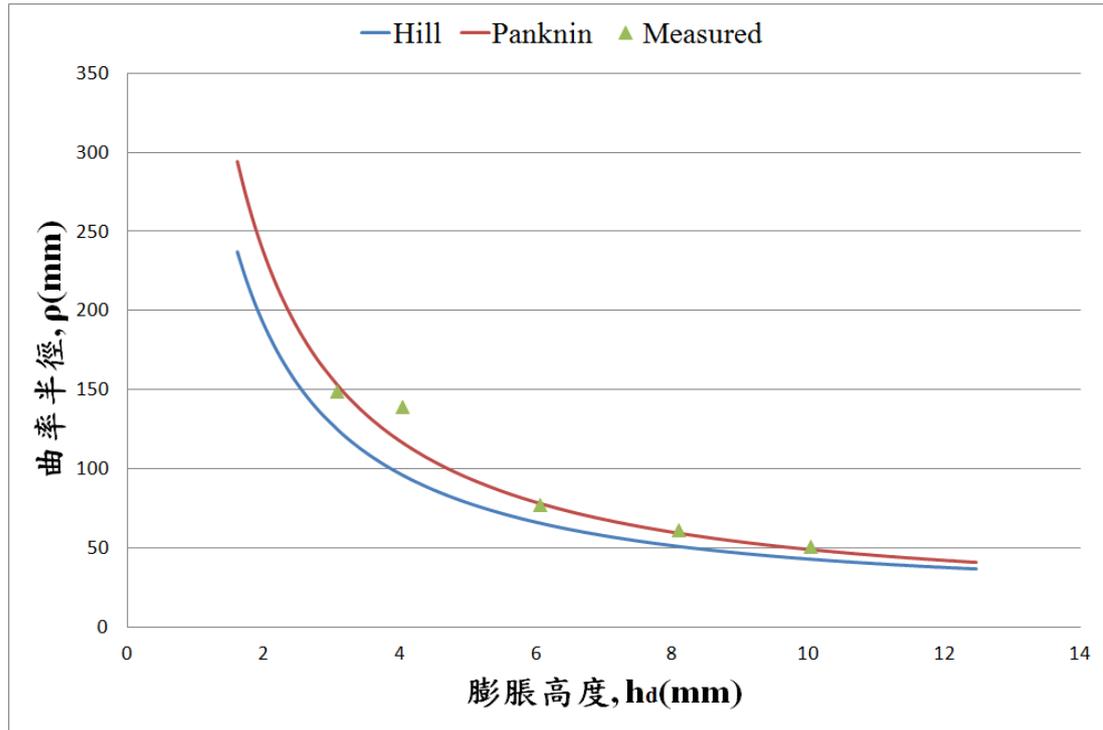


圖 4.3 曲率半徑之分析與量測驗證

#### 4.1.2 圓頂厚度公式之分析與量測驗證

藉由階段實驗，直接量測球殼之圓頂厚度，並與 Kruglov 和 Hill 的厚度分析公式做比較，其結果如圖 4.4 所示。觀察圖中得知 Kruglov 計算的圓頂厚度與實驗量測具有相當的一致性。所以在後續液壓膨脹實驗中，使用 Kruglov 的厚度分析公式。

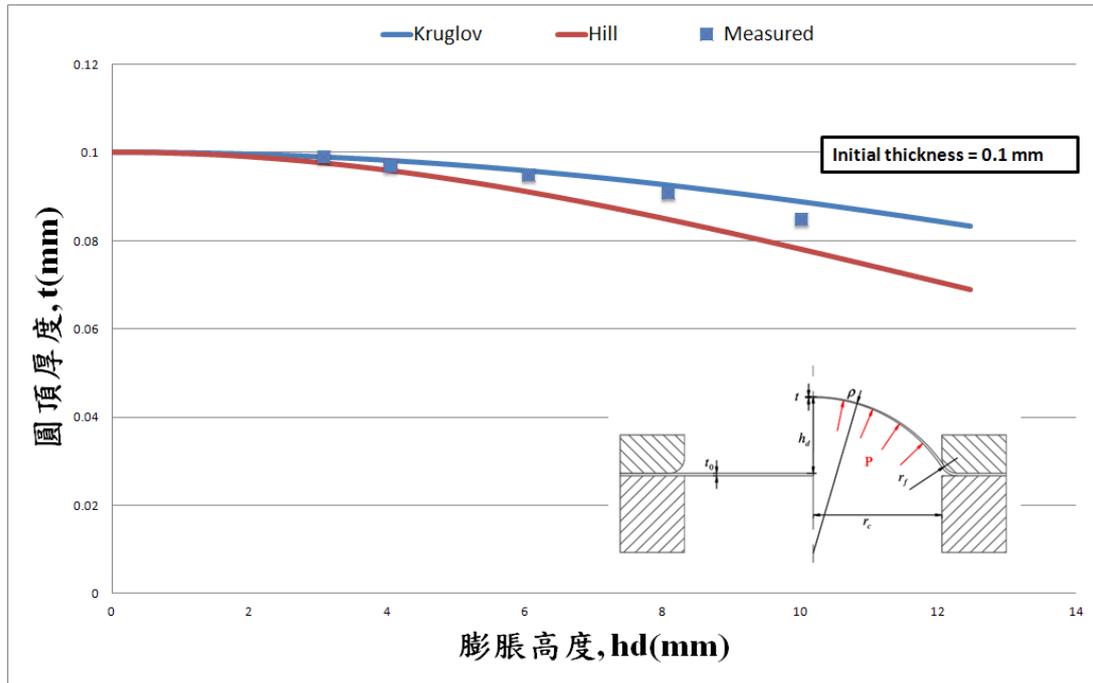


圖 4.4 圓頂厚度公式之分析與量測驗證

### 4.1.3 應力-應變曲線

實際量測膨脹高度與液壓壓力後，使用 Kruglov 的圓頂厚度分析公式與 Panknin 的曲率半徑分析公式，並帶入式 2-14 與式 2-15，取得應力-應變關係曲線，如圖 4.5 所示。

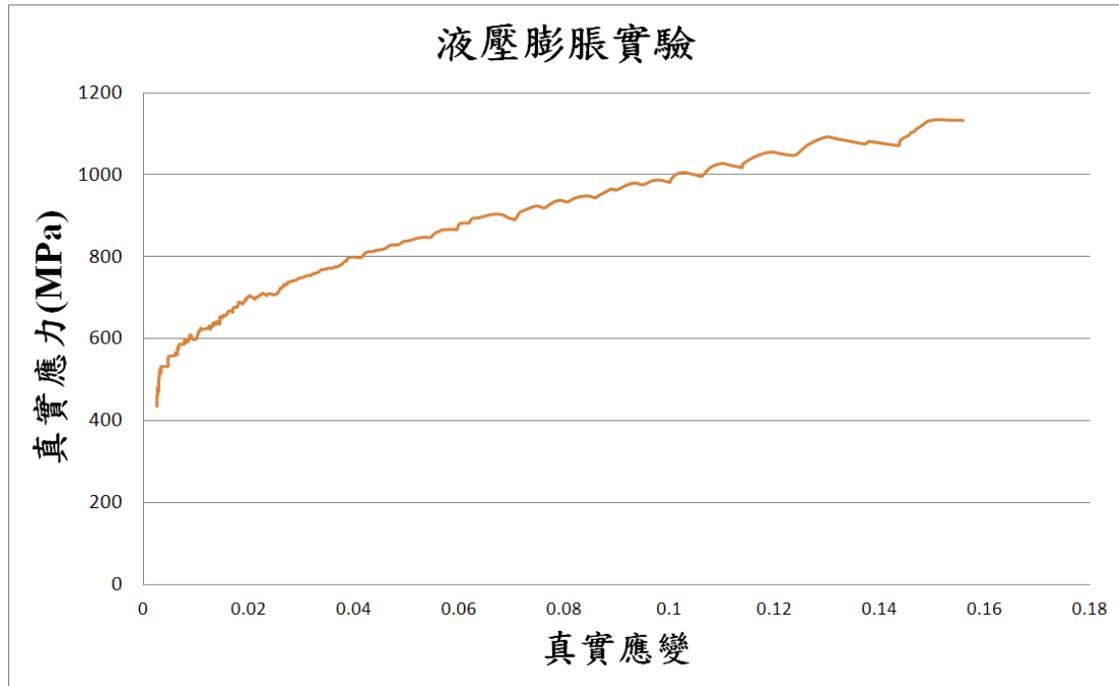


圖 4.5 液壓膨脹實驗之應力-應變曲線(SUS304)

#### 4.1.4 應變硬化係數

將單軸拉伸實驗之結果以指數定律(式 2-9)擬合後，以剛塑性模型表示於圖 4.6，並取得不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質，如表 4.1 所示。

表 4.1 不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質(液壓膨脹實驗)

初始降伏應力 $\sigma_y$	550MPa
應變硬化係數 $n$	0.7177
常數 $K$	2321

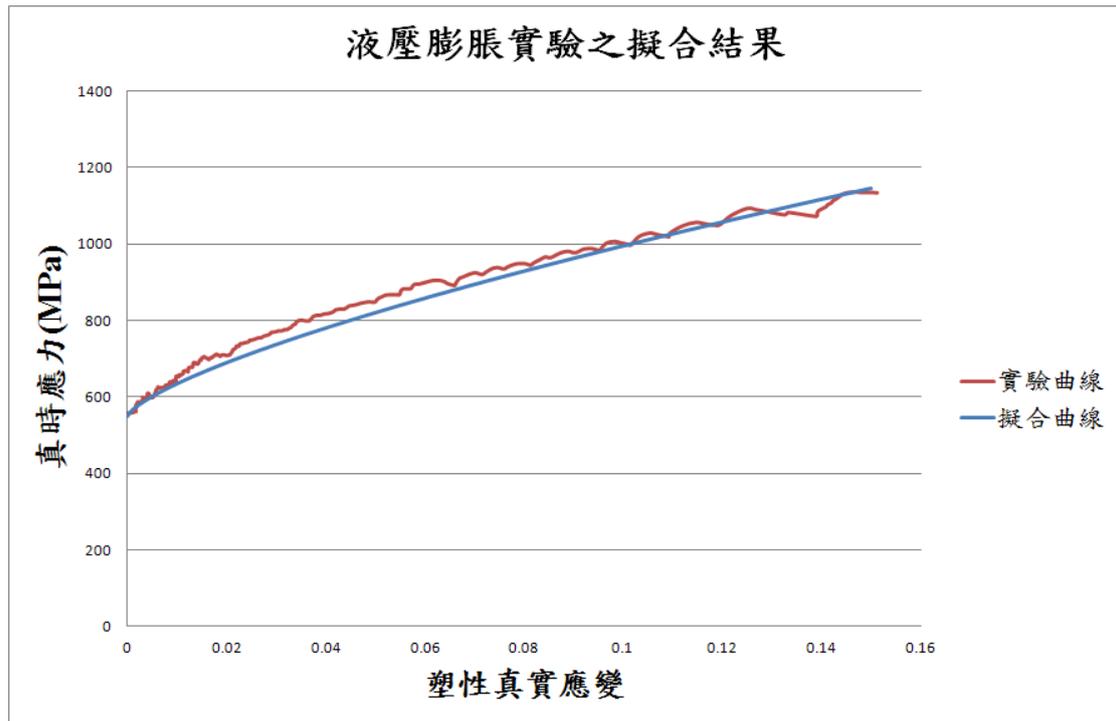


圖 4.6 液壓膨脹之擬合結果(SUS304)

#### 4.1.5 模具尺寸之影響

由文獻 [22]針對不銹鋼 304 厚度 0.051mm 之薄板進行液壓膨脹實驗，可以知道圓形模具的大小( $D_C$ )由 10mm 增加至 100mm，應力-應變曲線會向上移動，應力值會變大，而 10mm 以下則有相反情況，由 2.5mm 增加至 5mm，模具尺寸越大，應力值越小，如圖 4.7。而文獻[23]針對 CuZn36 厚度 0.25 之薄板進行液壓膨脹實驗，在模具尺寸(d)50mm 與 20mm 比較，可以發現模具尺寸越大不但應力值會上升外，其應變值也會變大，如圖 4.8 所示。

而本實驗也針對模具尺寸，使用不銹鋼 304 厚度 0.1mm 之薄板，設計一直徑為 35mm 之圓形模具，詳細尺寸如附錄 B 之圖 B.3 所示，

並於液壓膨脹實驗後與直徑 55mm 的圓形模具之結果進行比較，如圖 4.9 所示，觀察圖中可以發現圓形模具 35mm，其應力值比 55mm 之模具大，可以確定。但由於本實驗只進行一種不同的模具尺寸，並無法完整瞭解模具尺寸與實驗結果的關係，只能確定模具尺寸的改變，會影響液壓膨脹實驗之結果。

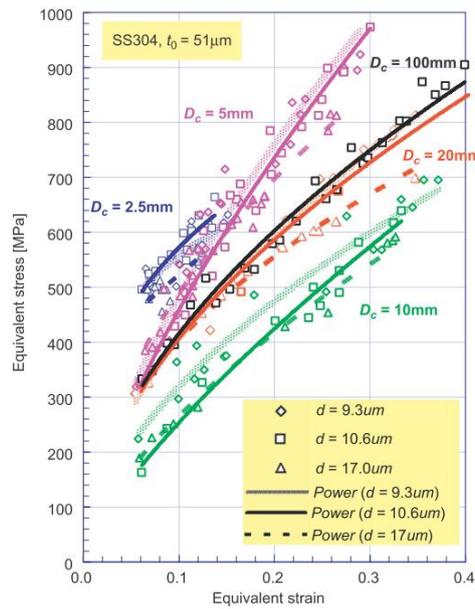


圖 4.7 不銹鋼 304 厚度 0.051mm 薄板，不同之圓形模具尺寸( $D_c$ )[22]

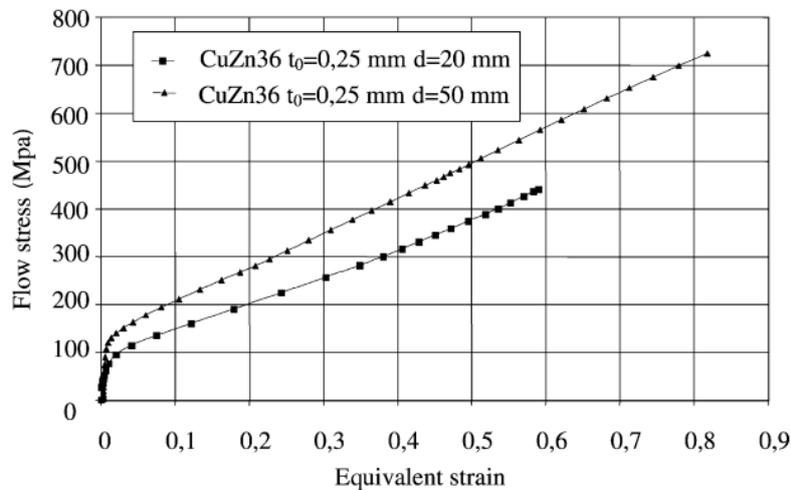


圖 4.8 CuZn36 厚度 0.25 薄板，不同之圓形模具尺寸( $d$ )[23]

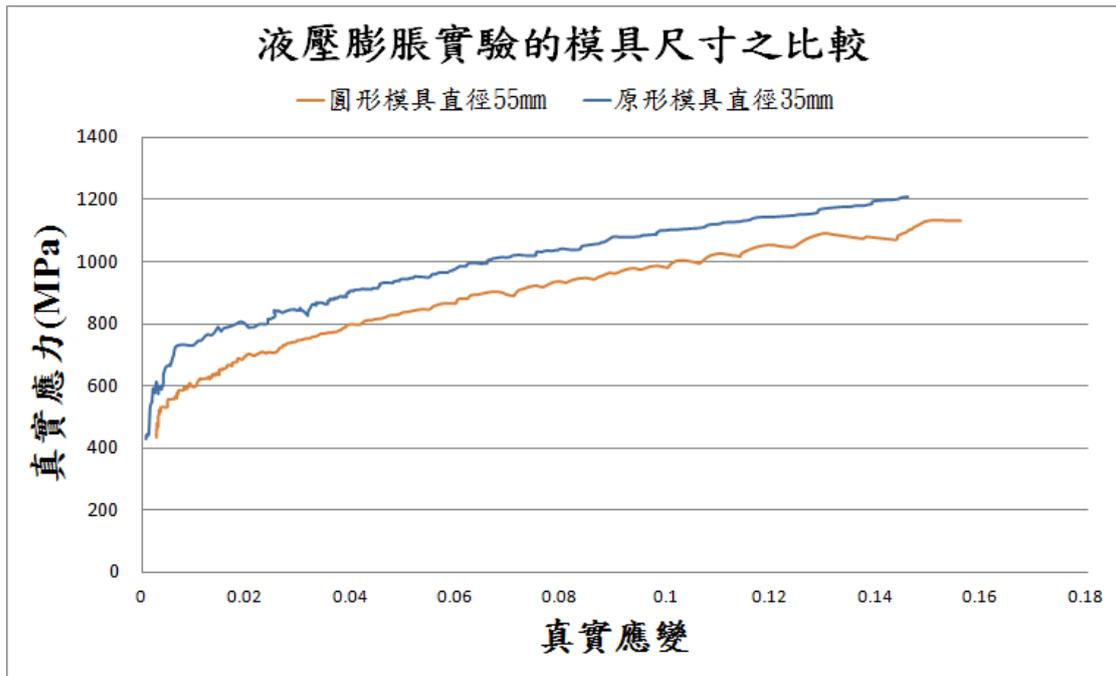


圖 4.9 液壓膨脹實驗的模具尺寸之影響(SUS304)

## 4.2 單軸拉伸實驗

沿滾軋方向為 0 度、45 度與 90 度三種方向的拉伸試片，經由 MTS 萬能試驗機拉伸至破裂後之試片如圖 4.10 所示。

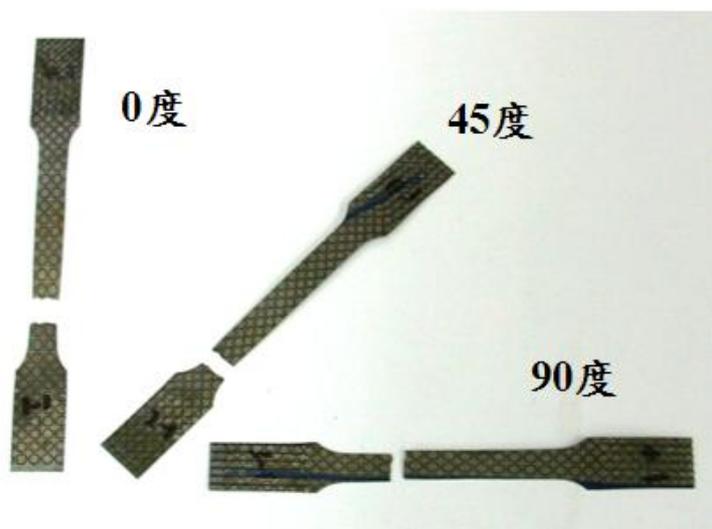


圖 4.10 拉伸後之拉伸試片

## 4.2.1 金屬薄板之方向性

單軸拉伸實驗之結果為工程應力與工程應變，將其轉換成真實應力與真實應變後，取得圖 4.11 結果。藉由觀察圖中可知三方向之應力-應變曲線只有稍微不同，視為實驗操作上之誤差，因此由結果可知，其試片並無異向性存在，後續亦將不考慮版材之方向性。

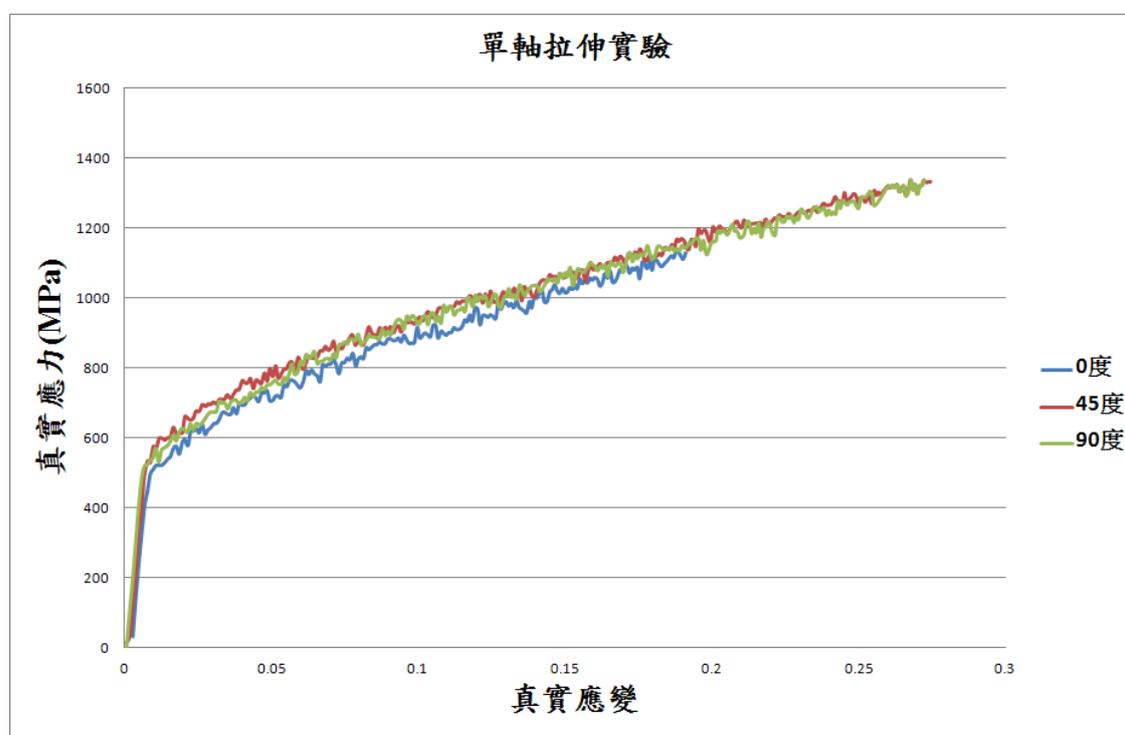


圖 4.11 單實軸拉伸實驗之結果(SUS304)

## 4.2.2 應變硬化係數

將單軸拉伸實驗之結果以指數定律(式 2-9)擬合後，以剛塑性模型表示於圖 4.12，並取得不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質，如表 4.2

所示。

表 4.2 不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質(單軸拉伸實驗)

初始降伏應力 $\sigma_y$	520MPa
應變硬化係數 $n$	0.7743
常數 $K$	2316

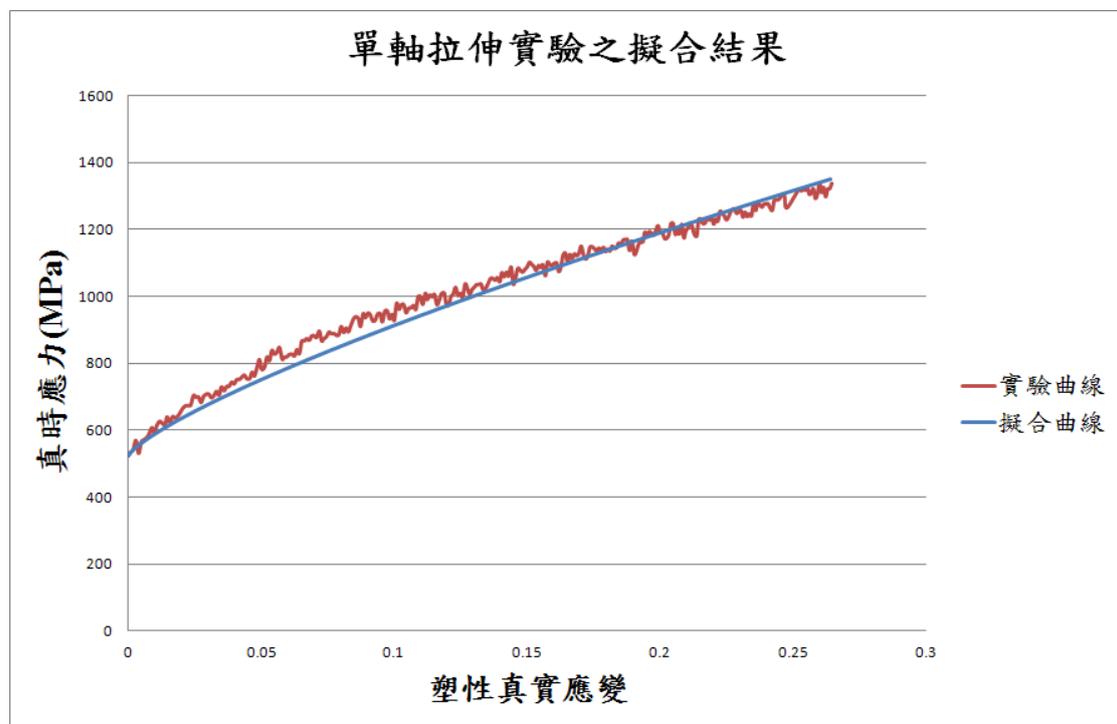


圖 4.12 單軸拉伸實驗之擬合結果(SUS304)

### 4.3 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之結果比較

在液壓膨脹實驗中，即時量測膨脹高度與液壓壓力，並搭配使用 Panknin 的曲率半徑分析公式和 Kruglov 的圓頂厚度分析公式，求得雙軸拉伸下，應力-應變的關係曲線，並比較單軸拉伸實驗的結果，

如圖 4.13 與表 4.3 所示。由圖 4.13 可知，液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之應力應變曲線的趨勢有一致性，並且由表 4.3 的結果可以得知兩實驗之初始降伏應力沒有很大的落差，因此可以確定液壓膨脹實驗之可行性。

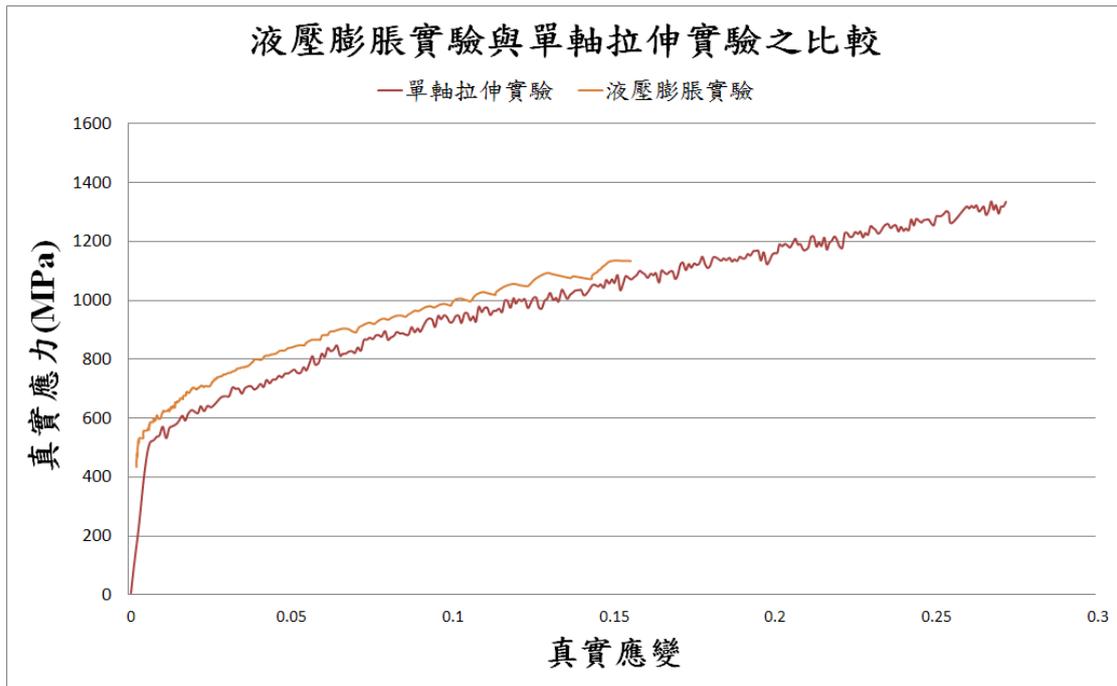


圖 4.13 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之比較圖(SUS304)

表 4.3 不銹鋼薄板 SUS304 之材料性質(液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗)

	液壓膨脹實驗	單軸拉伸實驗
初始降伏應力 $\sigma_y$	550MPa	520MPa

## 4.4 液壓成形極限實驗

### 4.4.1 模具幾何之影響

根據德國研究機構 IFU[13] 的整合實驗概念，改變液壓膨脹實驗的模具外型可以達到成形極限圖右半部的不同應變狀態，因此本研究除了使用液壓膨脹實驗的圓形模具外，也進行了橢圓形模具幾何對金屬薄板應變狀態之探討，使用的試片皆為未裁切過的方形薄板，不銹鋼 304，橢圓形模具如圖 4.14，詳細尺寸參考附錄 B，其實驗結果為圖 4.15 所示。由圖 4.15 中發現使用橢圓形模具可以得到靠近主軸右方的極限應變值，搭配使用原形模具得到等雙軸拉伸下之極限應變值，最後得到完整的右半部之成形極限圖。但卻需要使用兩種不同的幾何模具，使實驗有相當的不便利性，因此後續本研究提出一更便利的方法，為結合橡膠進行液壓成形極限實驗，並只使用液壓膨脹實驗之單一圓形模具，搭配不同的試片幾何，不但可以取得與橢圓形模具相同之應變結果，並且可以得到左半部之成形極限圖，最後得到一完整的成形極限圖。



圖 4.14 橢圓形模具

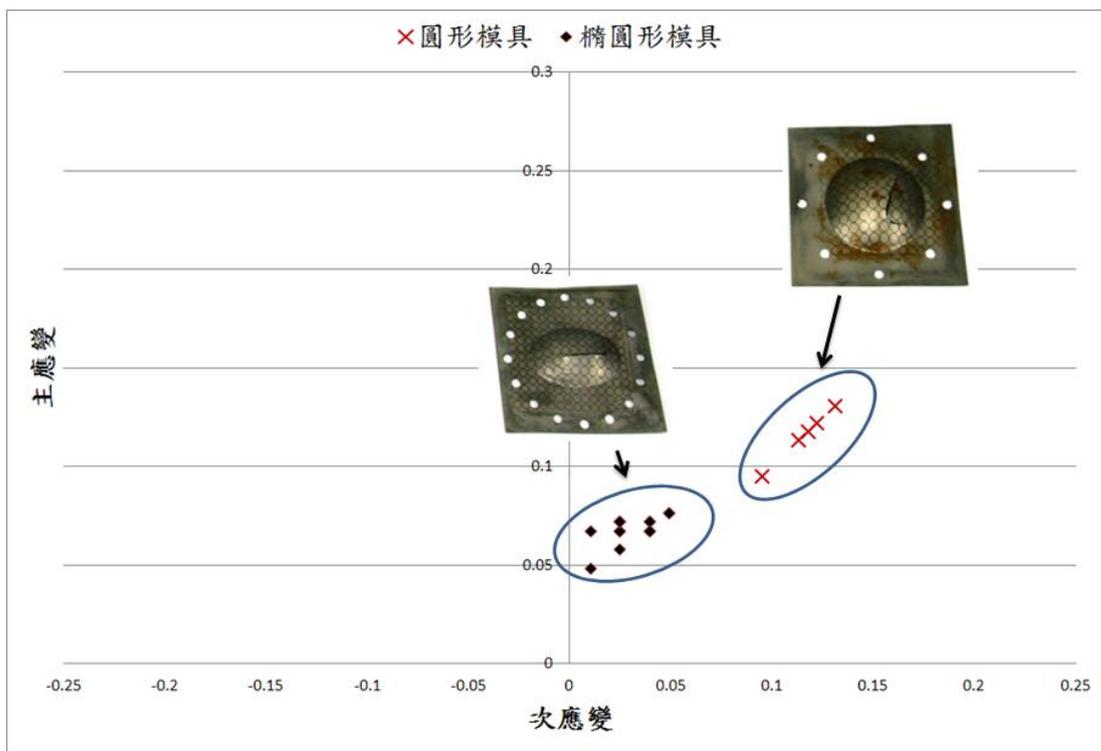


圖 4.15 模具幾何與極限應變狀況之影響(SUS304)

#### 4.4.2 液壓成形極限實驗之結果

使用液壓膨脹實驗的圓形的模具，針對裁切過的試片，使用橡膠做為液壓傳遞壓力至薄板使之成形至破裂；針對未裁切過的方形試片進行膨脹實驗，由液壓直接對薄板成形至破裂，而成形後的試片為圖 4.16。

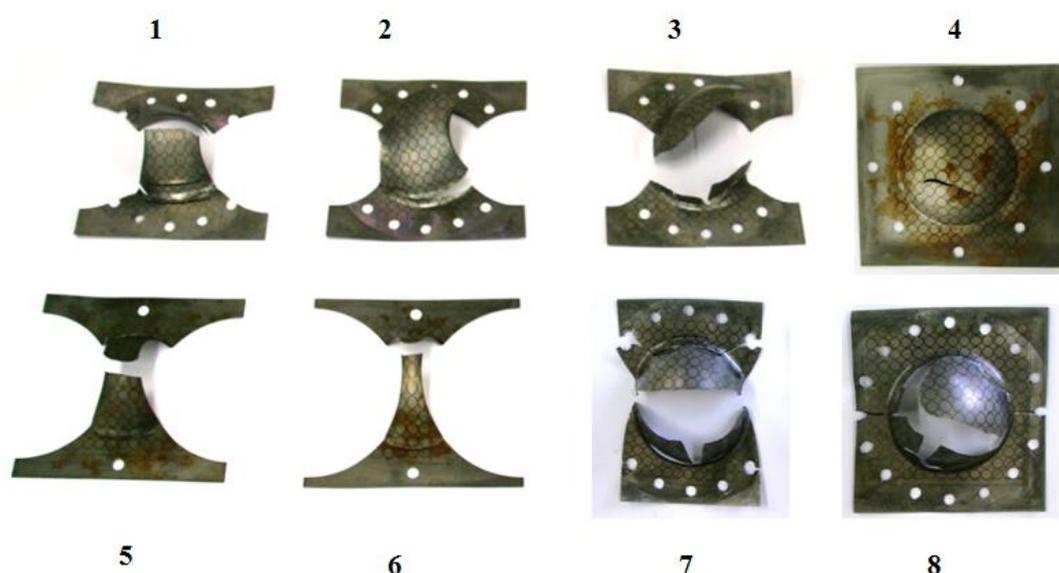


圖 4.16 液壓成形後的試片

經由金屬薄板成形至破裂後，量測其 5mm 圓形網格之變形量，計算取得其極限應變值，並建立一薄板液壓成形極限圖如圖 4.17 所示。結合橡膠成形裁切過之薄板(1~3、5~8 號試片)至破裂的量測結果為次應變-0.16~0.04，其中次應變-0.16~-0.03 為試片 1~3、5 和 6。次應變-0.025~0.05 的極限應變值為試片 7 和 8 的量測結果。次應變 0.1~0.15 的極限應變為試片 4 的量測結果。結果液壓成形實驗可得到

次應變-0.2 至 0.15 的極限應變狀態，構成一完整成形極限圖。

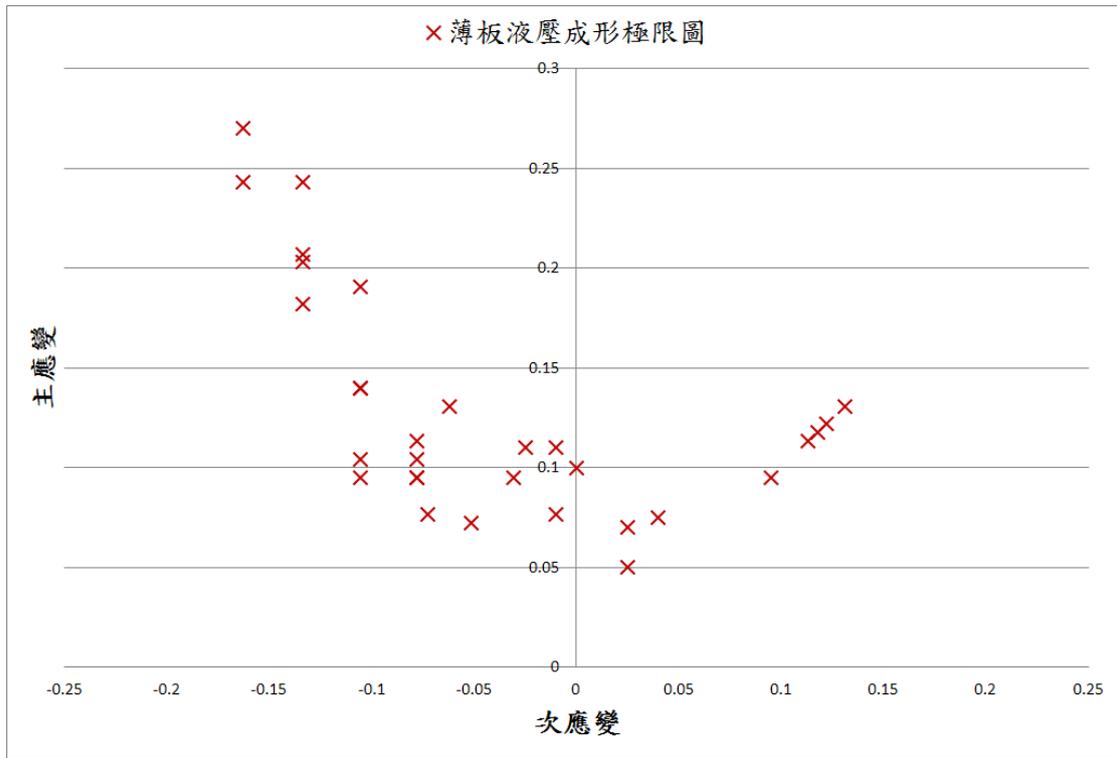


圖 4.17 薄板液壓成形極限圖(SUS304)

在圖 4.18 中可以發現本研究之液壓成形極限實驗，使用液壓膨脹實驗之圓形模具，結合橡膠成形不同幾何之試片，也可達到使用橢圓形模具成形方形試片之相同應變狀態。因此本研究之液壓膨脹實驗不需替換模具，使實驗更具便利性，單純使用圓形模具即可取得完整的成形極限圖。

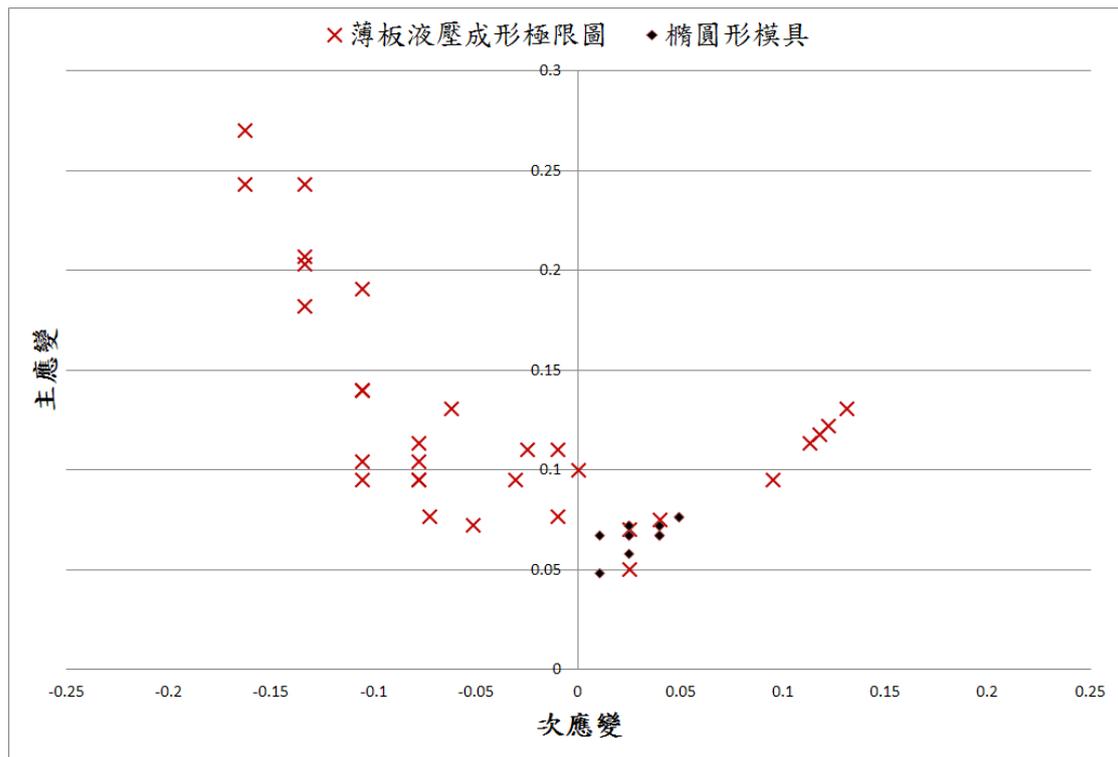


圖 4.18 液壓成形極限圖與橢圓形模具成形之結果比較

#### 4.5 衝壓成形極限實驗

本實驗規劃的試片經由一球型沖頭與模具衝壓成形後，如圖 4.19 所示，並藉由觀察薄板上直徑 5mm 之圓形網格計算成形極限應變值，而構成成形極限圖。

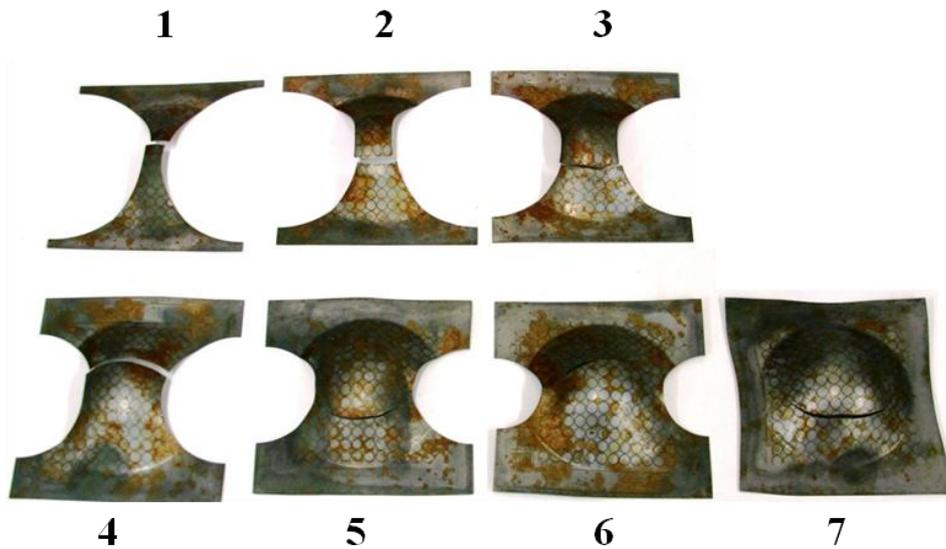


圖 4.19 衝壓成形後的試片

量測網格變形量後得到的成形極限圖如圖 4.20。由於本實驗之金屬薄板比常見的板金較薄，厚度為 0.1mm，並且在衝壓成形時，試片是由上模具與壓板以平面夾持，針對有裁切過( $R$  大於 0)的試片，試片並沒有因夾持力不足而滑移，衝壓成形後試片邊緣仍保持變形前的狀態，如圖 4.19 中的試片 1 至 6，最後得到預估的應變路徑，即落於左半部的成形極限圖。

而針對沒有裁切過( $R=0$ )的方形試片在衝壓成形時，式設計為雙軸應力狀態下的應變路徑，即落於右半部的成形極限圖。但是由於試片是以平面夾持，試片厚度又為 0.1mm 的薄板，在夾持情況不佳的下，又無裁切的方形試片與沖頭的接觸面積較大，所以試片由沖頭所施加的衝壓成形力較大於有裁切過的試片，也大於夾持力，以至於在

成形無裁切的方形試片時，無法完全夾緊試片，在衝壓成形時，使材料產生滑移，如圖 4.19 中的試片 7，試片邊緣有明顯內縮，衝壓成形後已不是原本的方形試片。使預估的等雙軸應變路徑無法達成，而成為次應變上為零並落於主應變軸上的平面應變狀態。所以針對本實驗之薄板衝壓實驗無法取得等雙軸拉伸的成形極限應變狀態，即缺少右半部的成形極限圖的資訊。

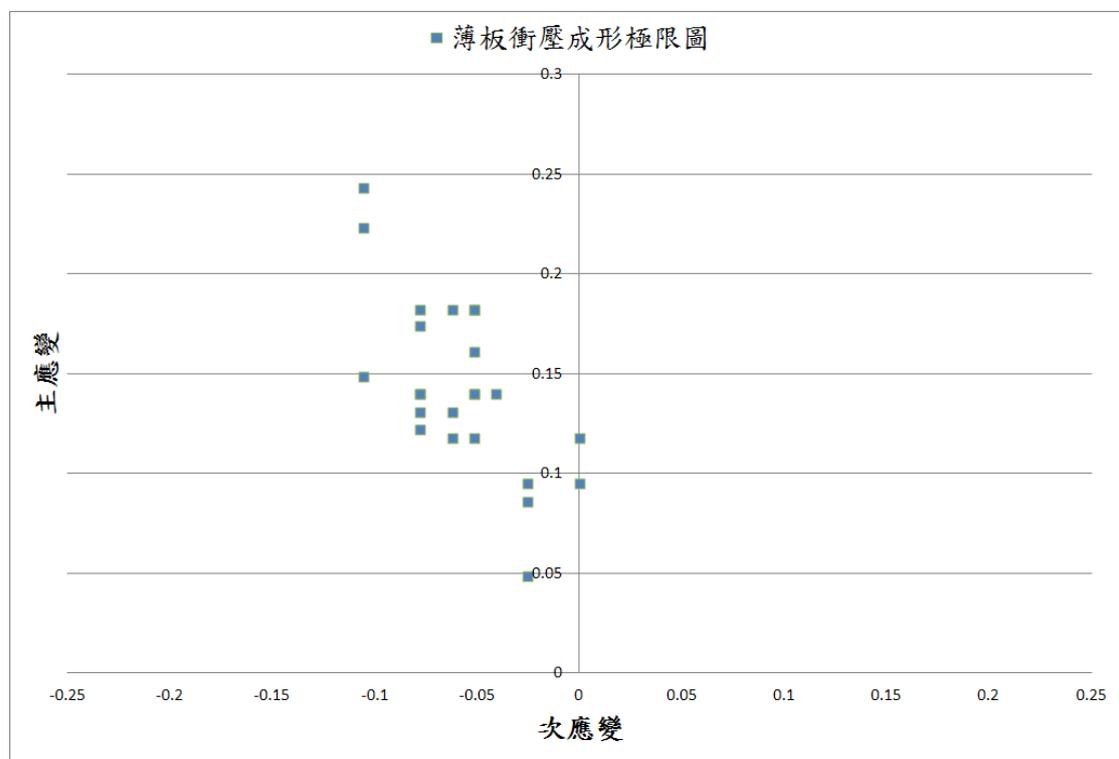


圖 4.20 薄板衝壓成形極限圖(SUS304)

## 4.6 液壓成形極限實驗與衝壓成形極限實驗之結果比較

針對同一金屬薄板材料不銹鋼 304，使用同樣的試片幾何，並網印同為 5mm 直徑的圓形網格，分別進行液壓成形極限實驗與衝壓成形極限實驗後，其結果比較如圖 4.21 所示。觀察圖中可以發現新型的液壓成形極限圖與傳統的衝壓成形極限實驗有一致的趨勢，因此可以確定新型液壓成形極限實驗的可行性。

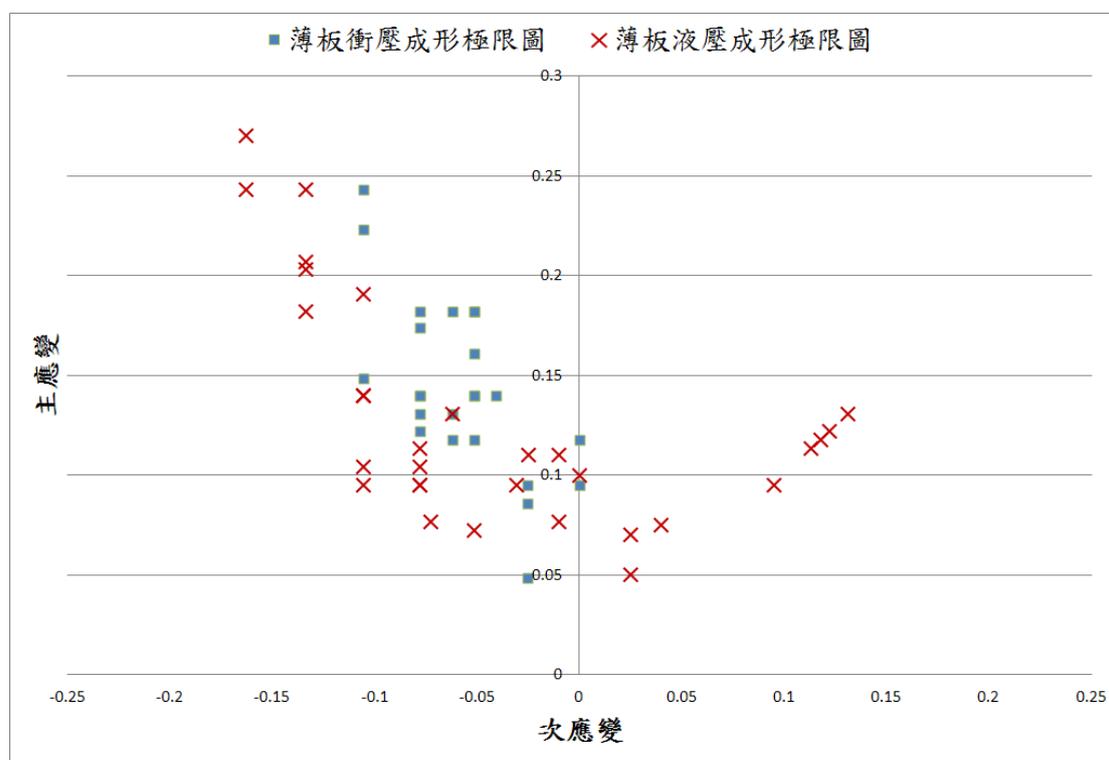


圖 4.21 液壓成形極限實驗與衝壓成形極限實驗之比較圖(SUS304)

## 第五章 結論與未來工作

### 5.1 結論

本研究使用液壓系統為動力源，並設計製作一具有圓環上模具之壓力腔固定薄板試片並限制其變形方式，再由本研究撰寫的 Labview 程式控制系統壓力使薄板之應變量小於  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  並截取量測數據後儲存於電腦，最後整合以上設備並成功建立液壓膨脹實驗設備。並經由實驗結果，驗證所選用薄板圓頂厚度與曲率半徑之分析公式的準確性。並且本研究之薄板液壓膨脹實驗結果在與單軸拉伸實驗比較後，已驗證薄板液壓膨脹實驗之可行性。

利用本研究自行研發的液壓膨脹實驗機台發展並進行一金屬薄板液壓成形極限實驗。針對裁切過的試片，提出一使用橡膠做為液壓傳遞壓力的概念，以取得左半部和部分右半部之成形極限圖。針對未裁切過的方形試片，在進行液壓膨脹實驗時，成形至薄板破裂，取得等雙軸拉伸下的極限應變，即部分的右半部之成形極限圖，最後構成一完整的成形極限圖。並且在與傳統的衝壓成形極限實驗比較後，已驗證薄板液壓成形極限實驗之可行性。

## 5.2 未來工作

### (1) 金屬薄板之夾持：

為了在金屬薄板成形時能有效的夾持試片，本研究的夾持力是由十六根螺絲提供，並由人工鎖上，所以只能盡可能的鎖緊每個螺絲，無法有效重現或量化一固定的夾持力，並且在實驗時，每做一次實驗就必須鎖緊並鬆開十六個螺絲取下試片，過程相當費時也費力。因此未來將考慮以液壓力做為夾持力的來源，可以迅速的夾持並放開試片，也可以比螺絲提供更大的夾持力，並設計一凸環於上模具與一凹環槽的壓力腔配合，可以使試片夾持的更緊，防止試片在成形時因夾持力不足產生的材料滑移。

### (2) 模具尺寸之影響：

由文獻[22,23]與本實驗發現圓形模具之尺寸會影響液壓膨脹實驗之結果，後續將針對不銹鋼 304 之金屬薄板，設計一系列之緣形模具尺寸，瞭解模具尺寸對液壓膨脹實驗結果之影響，找出一有系統的影響關係。

### (3) 金屬薄板厚度之影響：

文獻[23]針對 CuZn36 之薄板進行液壓膨脹實驗，探討改變試片厚度(0.1mm 至 0.5mm)與實驗結果之影響，如圖 5.1 所示，可以發現厚度 0.1mm 之結果應力值最低；而從厚度 0.2mm 增加至 0.5mm，

應力值會下降，但下降量並不明顯。當厚度增加至一定程度後對液壓膨脹實驗結果影響並不大，但在較薄的厚度時如 0.1mm 與 0.2mm 卻有明顯的不同。因此後續也將針對不銹鋼 304 之金屬薄板，改變其厚度進行液壓膨脹實驗，瞭解其薄板厚度與液壓膨脹實驗之影響。

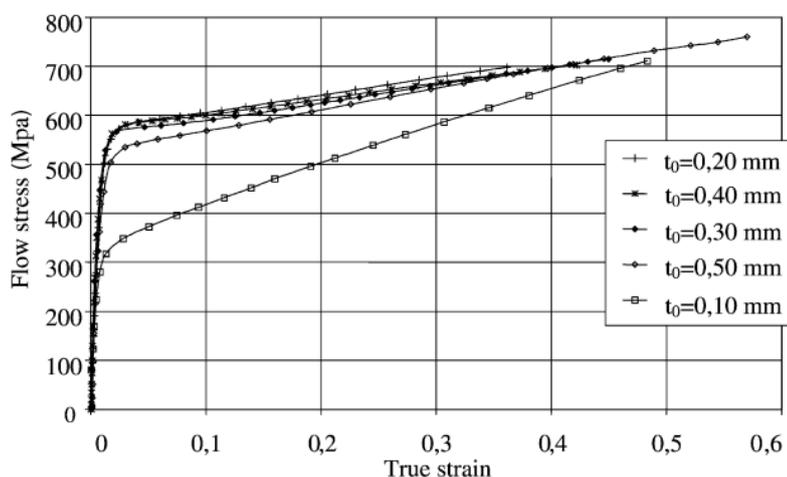


圖 5.1 CuZn36 薄板，不同厚度尺寸( $t_0$ )[23]

(4) 應力-應變曲線之可用範圍：

後續也將利用本研究的整合材料實驗設備，針對不同材料的金屬薄板進行實驗，瞭解其完整的材料性質，建構一金屬薄板材料性質之資料庫。本研究現階段已針對不銹鋼 316L，使用本研究之設備進行一初步的材料實驗，詳細的實驗結果與材料性質參照附錄 C。

## 參考文獻

- [1] Z. Marciniak, J.L. Duncan and S.J. Hu. “Mechanics of Sheet Metal Forming”, Second edition, Butterworth-Heinemann, 2002.
- [2] R. Hill, “A theory of the plastic bulging of a metal diaphragm by lateral pressure”, Philosophical Magazine Series 7, Volume 41, Issue 322, 1950.
- [3] A.A. Kruglov, F.U. Enikeev and R.Ya. Lutfullin, “Superplastic forming of a spherical shell out a welded envelope” , Materials Science and Engineering A323 : pp.416–426, 2002.
- [4] W. Panknin, “Der hydraulische Tiefungsversuch und die Ermittlung von Fließkurven (The hydraulic bulge test and the determination of the flow stress curves)” , Dissertation, Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany, 1959.
- [5] F. Gologranc, “Beitrag zur Ermittlung von Fließkurven im kontinuierlichen hydraulischen Tiefungsversuch (Evaluation of the flow stress curve with the continuous hydraulic bulge test)” , Dissertation, Institute for Metal Forming Technology, University of Stuttgart, Germany, 1975.
- [6] S.P. Keeler and W.A. Backofen, “Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches”, ASM TRANS Q, Vol. 56, no. 1, pp. 25-48, 1963.
- [7] G.M. Goodwin, “Application of strain analysis to sheet metal forming problems in press shop”, SAE Paper No. 680093, 1968.
- [8] R. Hill, “On discontinuous plastic states, with special reference to

- localized necking in thin sheets”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids Volume 1, Issue 1, pp.19-30, 1952.
- [9] H.W. Swift, “Plastic instability under plane stress Journal of the Mechanics and Physics of Solids”, vol. 1, issue 1, pp.1-18, 1952.
- [10] Z. Marciniak and K. Kuckzinsky, “Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal”, International Journal of Mechanical Sciences Volume: 9, Issue: 9, pp.609-620 , 1967.
- [11] J.W. Hutchinson and K.W. Neale, "Sheet Necking- II. Time-Independent Behavior.", Mechanics of Sheet Metal Forming edited by D. P. Koistinen and N.M. Wang, Plenum Publishing Corporation, pp. 127-153, 1978.
- [12] Sebastian Dziallach, Wolfgang Bleck, Michael Blumbach and Torsten Hallfeldt, “Sheet Metal Testing and Flow Curve Determination under Multiaxial Conditions”, ADVANCED ENGINEERING MATERIALS , No. 11, 2007.
- [13] L. Părăianu , D.S. Com,sa, J.J. Gracio and D. Banabic, “Modelling of the Forming Limit Diagrams Using the Finite Element Method”, Advanced Methods in Material Forming, Dorel Banabic, 2007.
- [14] Marilena Carmen Butuc, FORMING LIMIT DIAGRAM SDEFINITION OF PLASTIC INSTABILITY CRITERIA, Engineering Faculty of Porto University, 2004.
- [15] A.Barata da Rocha, Abel D Santos and Pedro Teixeira, M.C. Butuc ,”Analysis of plastic flow localization under strain paths changes and its coupling with finite element simulation in sheet metal forming”, Journal of Material Processing Technology 209, 2009.

- [16] 林進誠等編著，材料實驗，修訂版，高立圖書有限公司，台北，民國 82 年。
- [17] Muammer Koç , Eren Billur and Ömer Necati Cora “An experimental study on the comparative assessment of hydraulic bulge test analysis methods”, Journal of Materials & Design, Volume 32, Issue 1, pp.272-281, 2011.
- [18] A.A. Kruglov, F.U. Enikeev and R.Ya. Lutfullin, “Superplastic forming of a spherical shell out a welded envelope”, Materials Science and Engineering A323 , pp.416–426, 2002.
- [19] Gerhard Gutscher, Hsien-Chih Wu, Gracious Ngaile and Taylan Altan, ”Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test”, Journal of Materials Processing Technology Volume 146, Issue 1, pp.1-7, 2004.
- [20] 歐陽渭城，『油壓基礎技術』，初版，全華圖書，民國 93 年。
- [21] 陳瓊興，『LabVIEW 8.X 與感測電路應用』，二版，台科大圖書，2009。
- [22] Sasawat Mahabunphachai and Muammer Koc,” Investigation of size effects on material behavior of thin sheet metals using hydraulic bulge testing at micro/meso-scaled”,International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 2008.
- [23] J.F. Michel and P.Picart,”Size effects on the constitutive behavior for brass in sheet metal forming”, Journal of Material Processing Technology 141, 2003.

## 附錄 A 夾具系統之設計規格圖

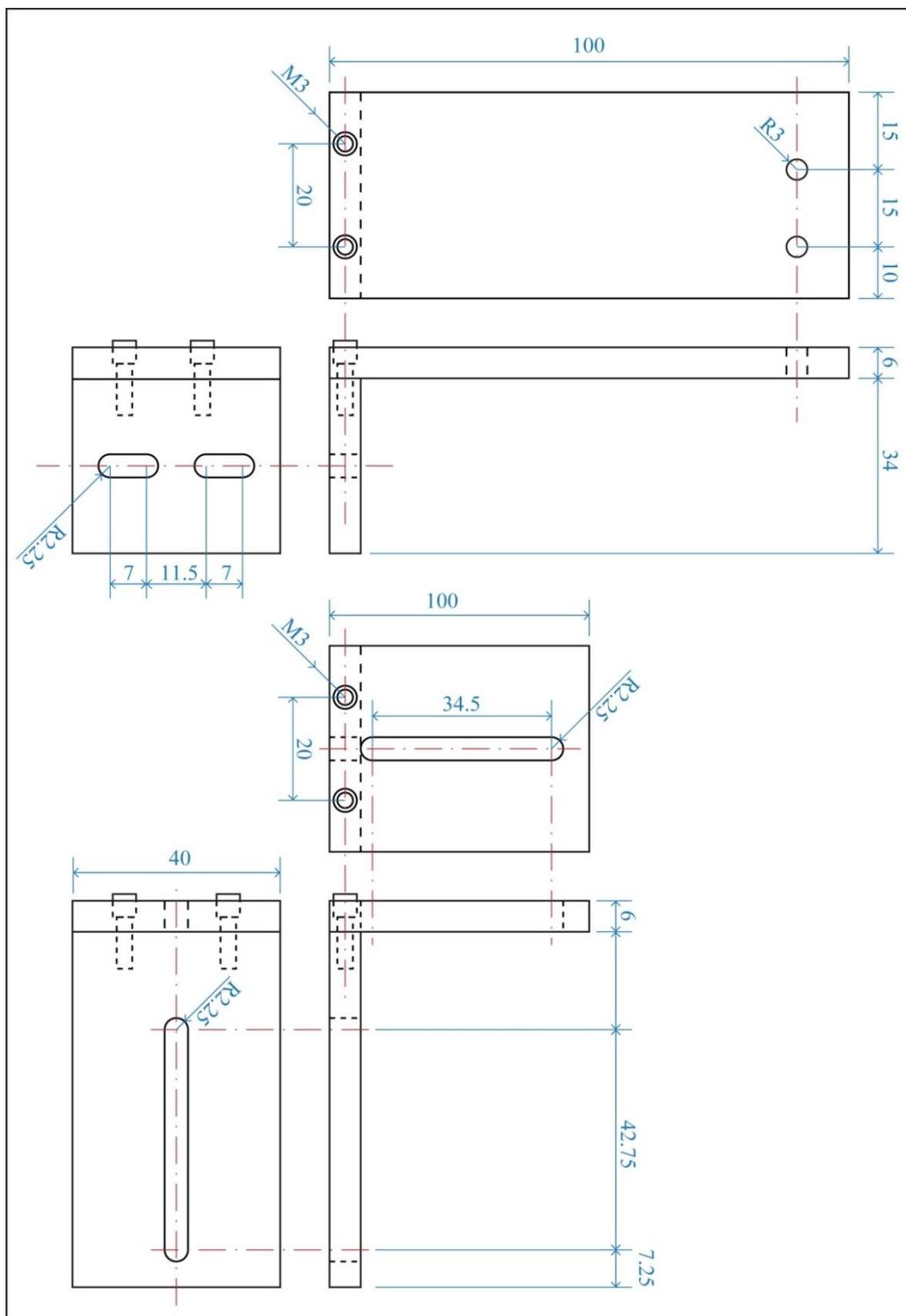


圖 A.1 支架部件：電阻尺支架組件

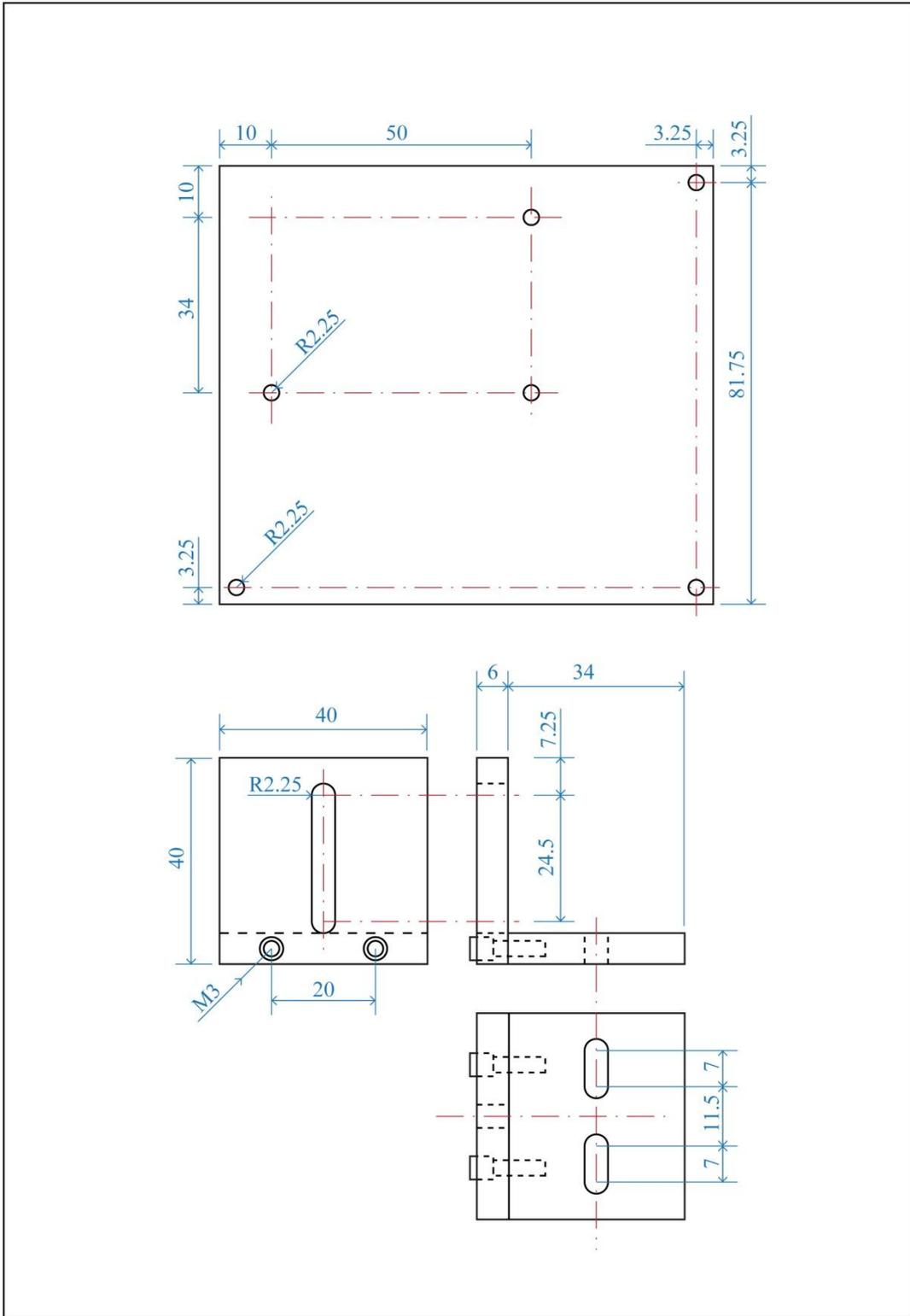


圖 A.2 支架部件：電路板支架組件與試片座支架組件

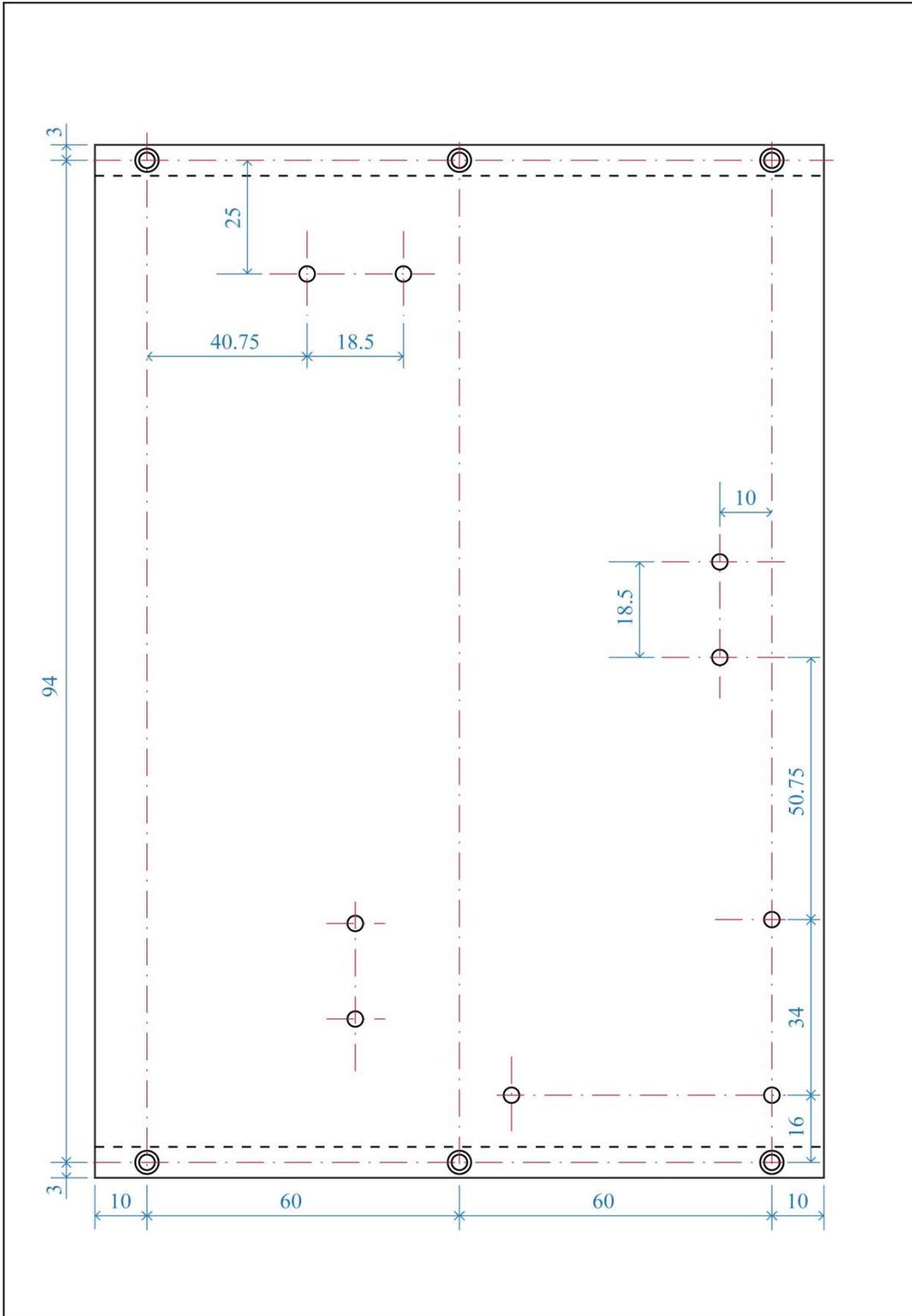


圖 A.3 總底座部件

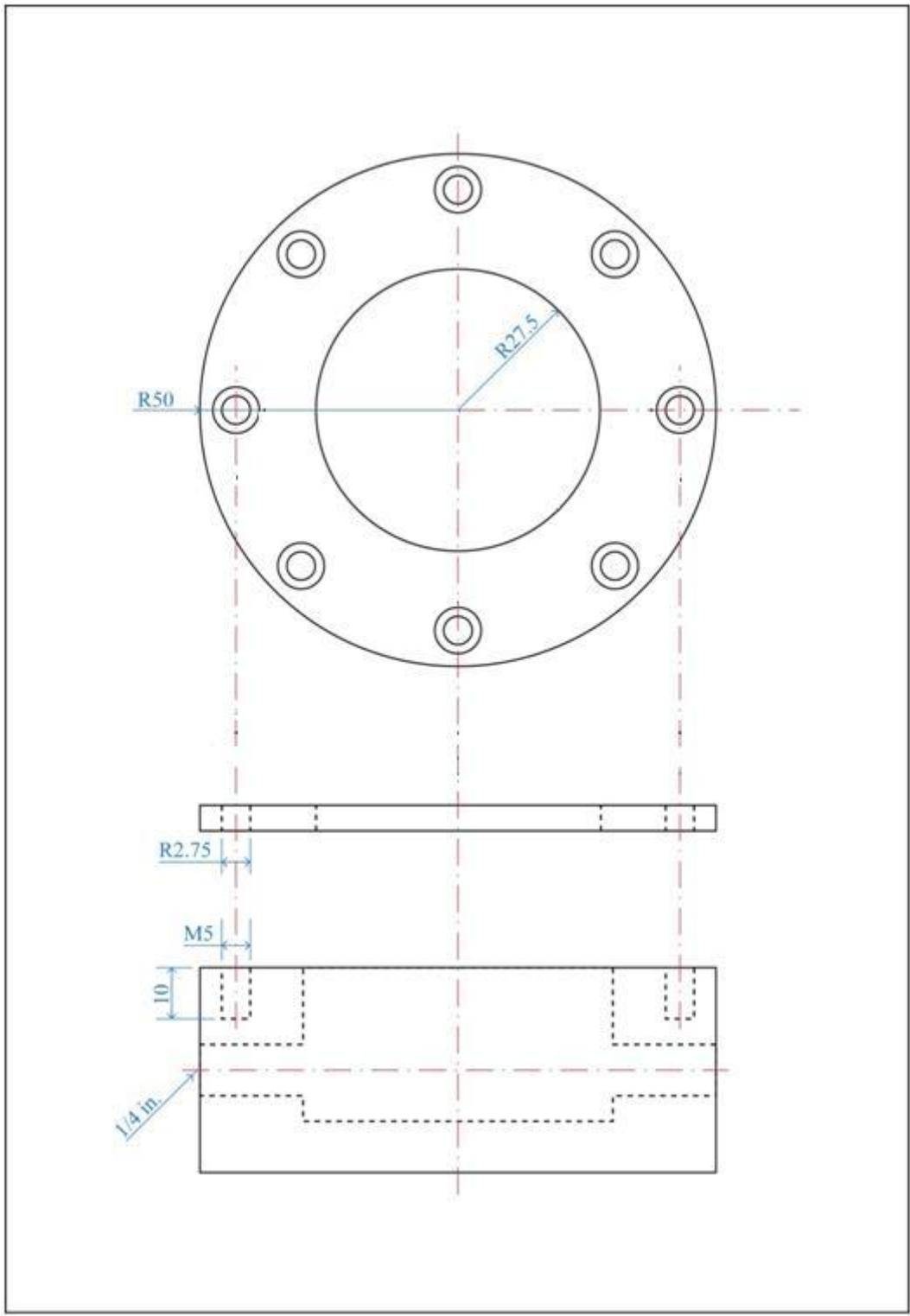


圖 A.4 試片座部件

## 附錄 B 模具組之設計規格圖

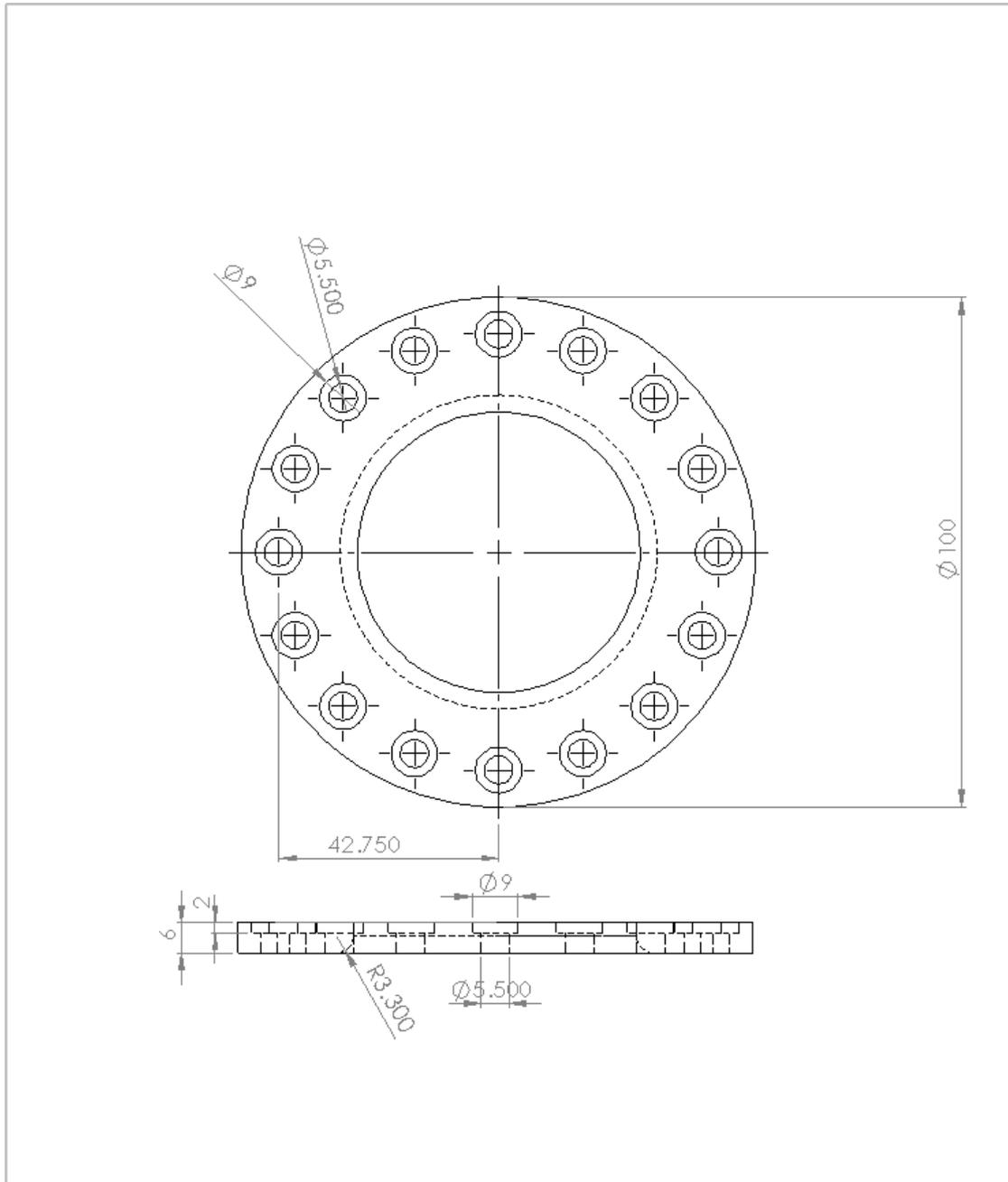


圖 B.1 圓形模具

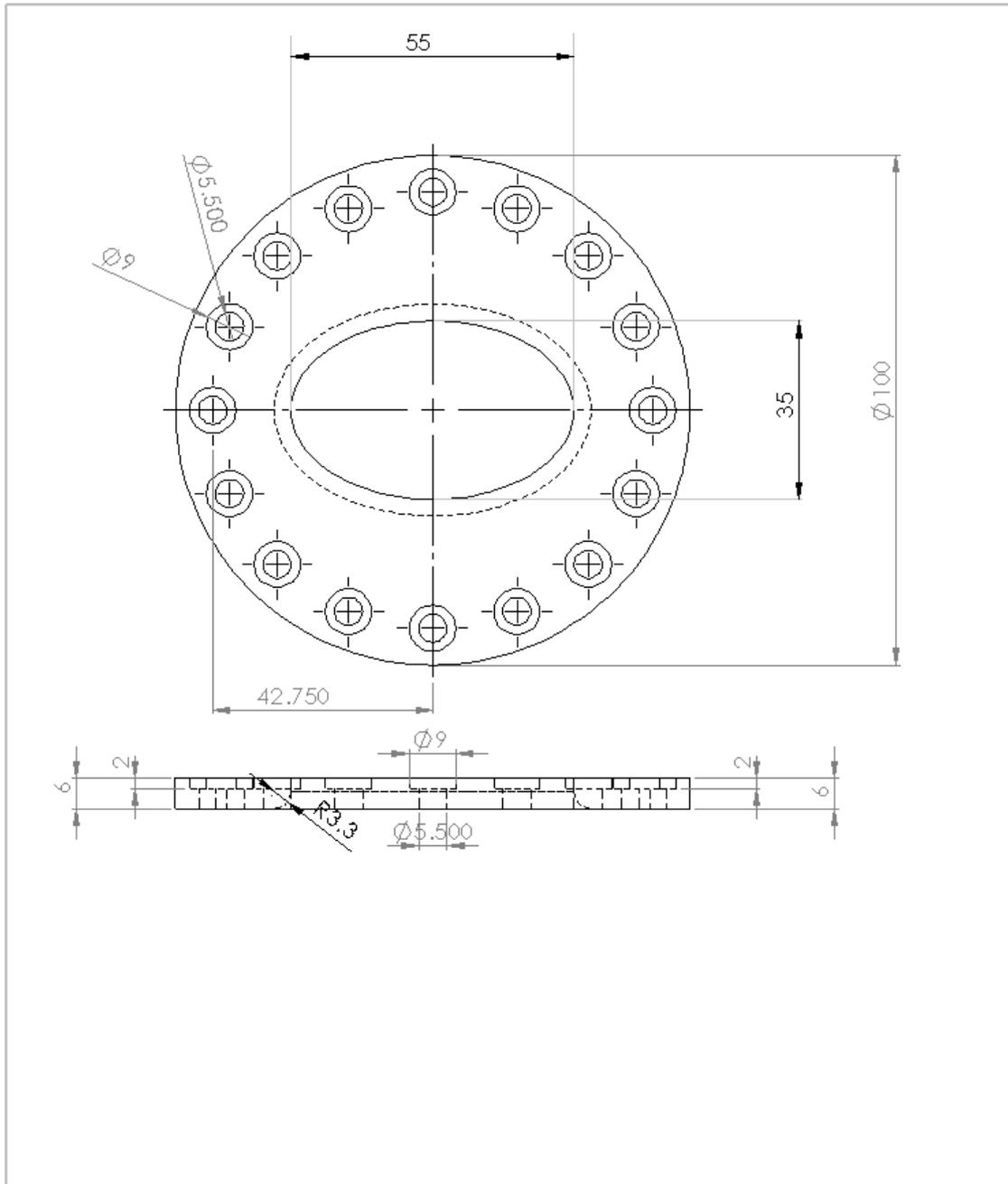


圖 B.2 橢圓形模具

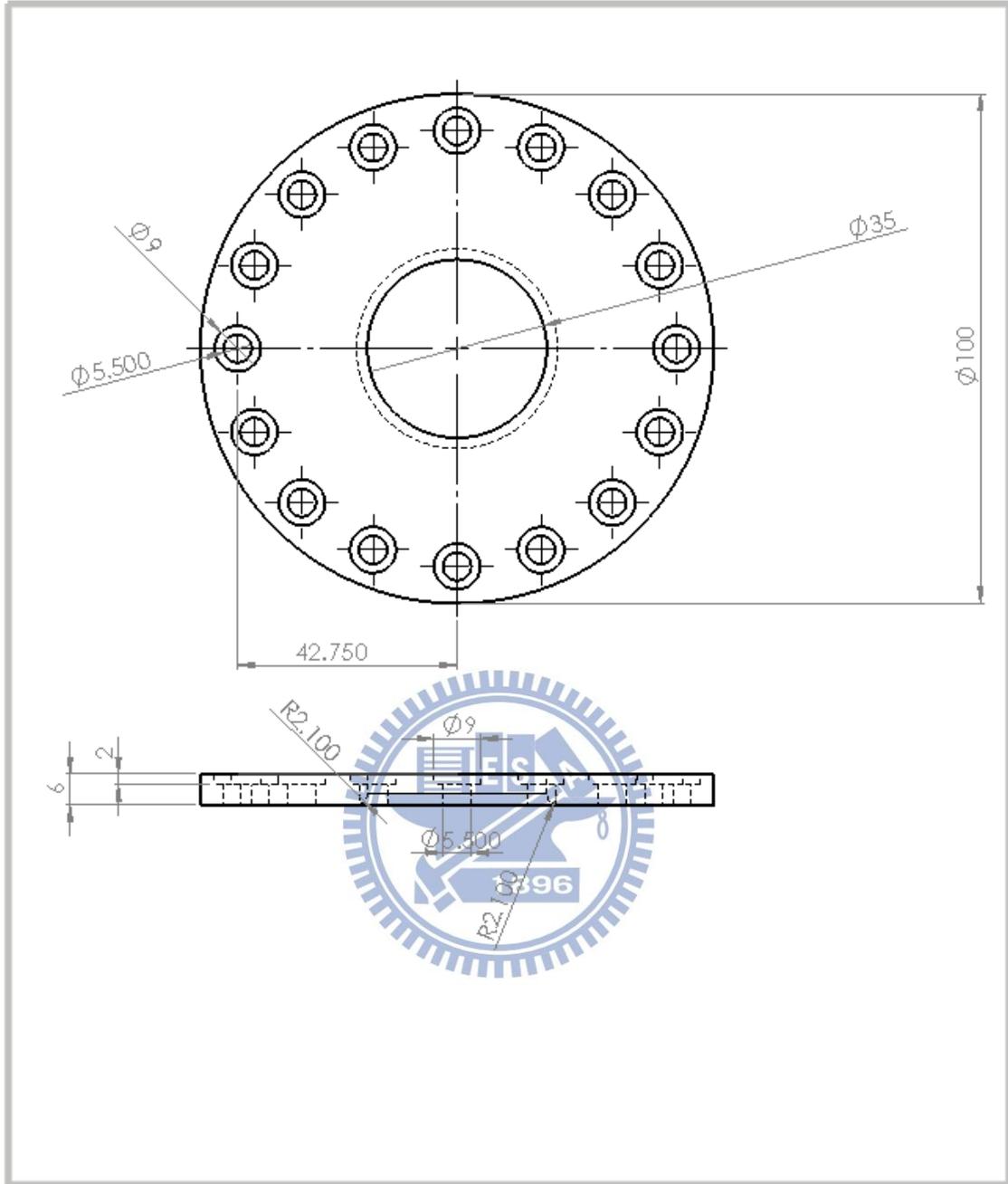


圖 B.3 小徑之圓形模具

## 附錄 C 不銹鋼薄板 316L 之完整材料性質

### C.1 液壓膨脹實驗

使用材料為不銹鋼薄板 316L，厚度為 0.12mm，面積 100\*100mm 的方形試片，實驗後之試片為圖 C.1，實驗結果之應力-應變曲線如圖 C.2 所示。



圖 C.1 液壓膨脹實驗後之試片(SUS316L)

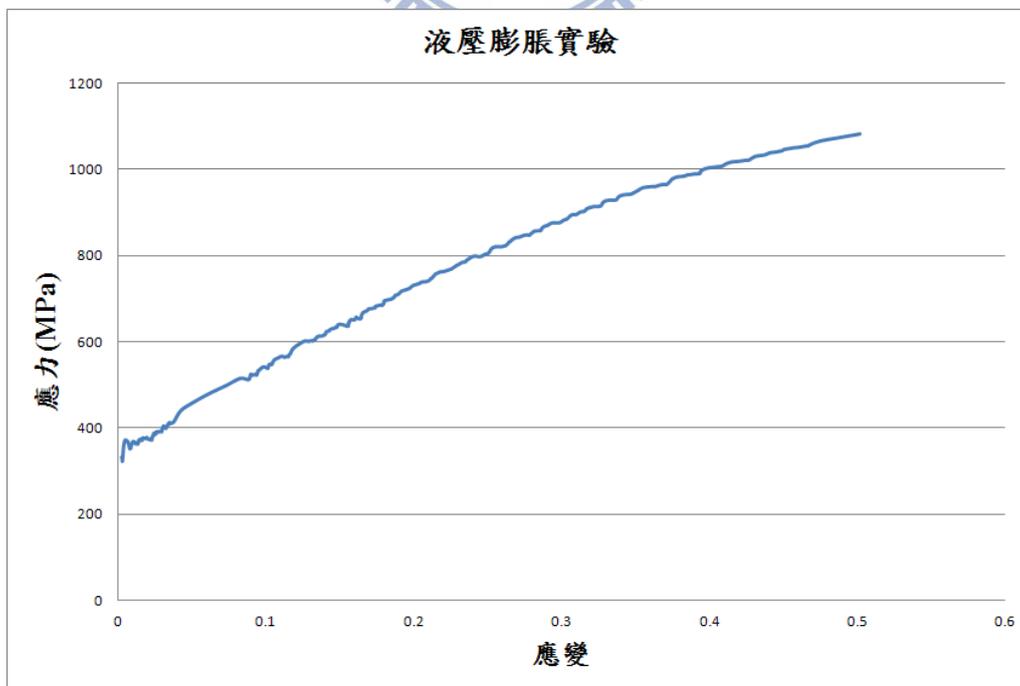


圖 C.2 液壓膨脹實驗之結果(SUS316L)

## C.2 金屬薄板之方向性

本實驗的材料是使用厚度 0.12mm、面積 100mm\*100mm 的不銹鋼板 316L。拉伸實驗之試片尺寸參考 ASTM-E8 之拉伸規範決定拉伸試片尺寸如圖 3.17 所示。另外，考慮不銹鋼薄板的方向性，因此於同一片薄板上切割了三種方向的拉伸試片，由滾軋方向為基準，做 0 度、45 度與 90 度三種方向的拉伸試片，進行單軸拉伸實驗。實驗後之試片如圖 C.3 所示，實驗結果如圖 C.4 所示。由圖 c.4 中可以發現三個方向之應力-應變曲線有相當的一致性，因此可以確定不銹鋼 316L 並無明顯之方向性。

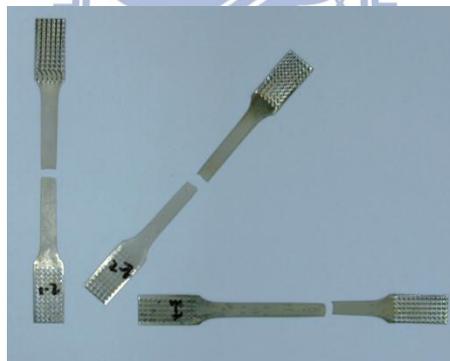


圖 C.3 單軸拉伸後之試片(SUS316L)

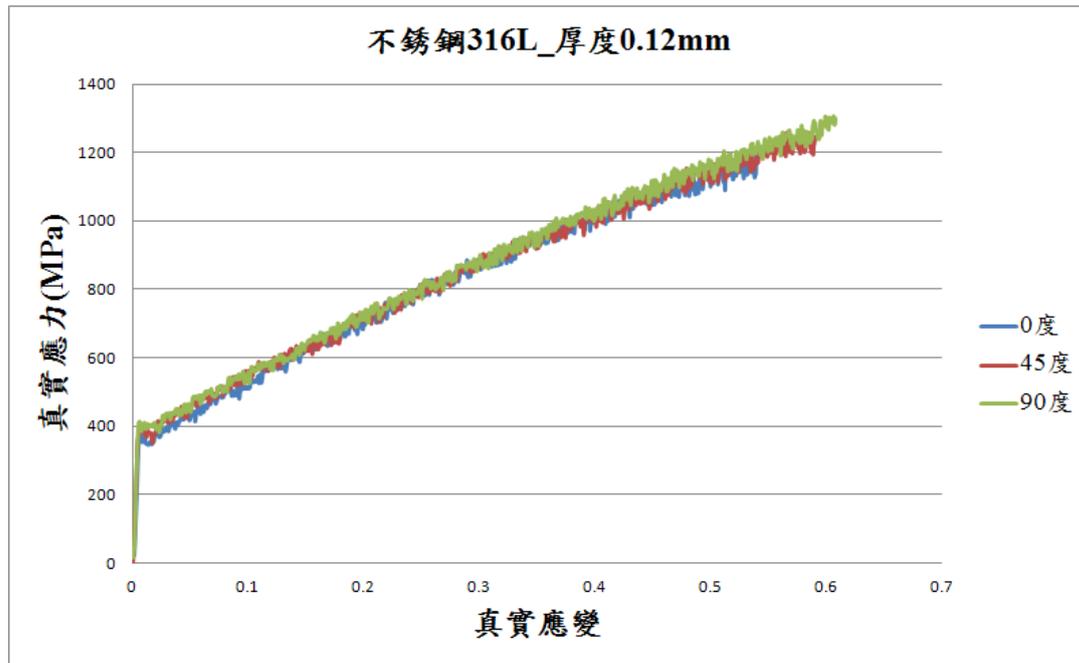


圖 C.4 單軸拉伸實驗之結果(SUS316L)

### C.3 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之比較

由圖 C.5 中之比較可以發現液壓膨脹實驗之結果與單軸拉伸實驗之結果有相當的一致性，因此確定液壓膨脹實驗針對不銹鋼 316L 之可行性，也表示本研究之液壓膨脹實驗設備可以用不銹鋼 304 與不銹鋼 316L 兩種不同之材料。後續將會針對不同材料之金屬薄板進行材料實驗，建立一金屬薄板之材料性質的資料庫。

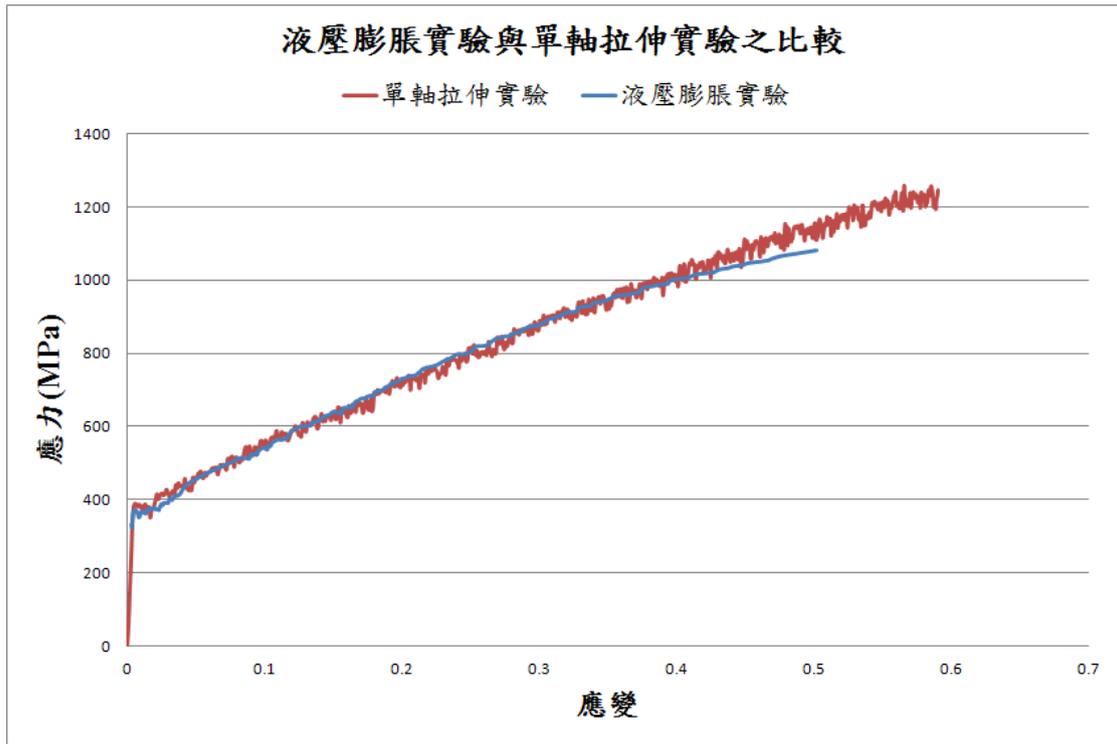


圖 C.5 液壓膨脹實驗與單軸拉伸實驗之比較

