

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

複合金屬板材液壓成形之有限元素分析

Finite Element Analysis on Hydroforming of
Clad Metal Sheet



研究生：韓忠諭

指導教授：洪景華 教授

中華民國九十八年六月

複合金屬板材液壓成形之有限元素分析
Finite Element Analysis on Hydroforming of
Clad Metal Sheet

研究生：韓忠諭

Student：Chung-Yu Han

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



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

Jun. 2009

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年六月

複合金屬板材板液壓成形之有限元素分析

學生：韓忠諭

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究利用有限元素軟體 ABAQUS 針對應用於 Ti /Al 複合金屬板材之板液壓成形進行有限元素分析，藉由模擬板件在成形過程中之厚度分佈與減薄率，深入探討各項製程參數如：壓板力、液壓力、模具間隙、料片尺寸等，對於複合金屬板件的成形性影響。

為了模擬與實驗的共同性與真實性，本研究首先藉由材料試驗取得金屬板材之基本材料性質與方向性，之後建構出板液壓製程之有限元素模型，並利用創新之虛擬薄膜模擬液壓缸壓力之作用，確實趨近現實之壓力狀態。最後將有限元素分析的結果與實驗相互驗證，檢視有限元素分析的準確性後，針對各種不同製程參數對成形結果的影響進行探討。本研究同時也利用實驗初步證明以 Ti /Al 複合金屬板材取代 Ti 單一金屬板材之適用性。

關鍵字：有限元素分析、複合金屬、板液壓成形、製程參數、虛擬薄

膜

Finite Element Analysis on Hydroforming of Clad Metal Sheet

Student: Chung-Yu Han

Advisors: Dr. Ching-Hua Hung

Department of Mechanical Engineering National Chiao Tung University

Abstract

This research used ABAQUS to analyze the hydroforming process for Ti-cp1/A1050 clad metal sheet, and also examined the formability of clad metal sheet by measuring the thickness distribution and thinning ratio. These two indications will be influenced by important factors like holding force, internal pressure, tooling gap and blank size.

For the authenticity of simulation, the material properties were first obtained through experiments, and then the concept of a virtual film was used to realistically mimic the pressure loading in the finite element model. After comparing the results of simulation and experiment for verifying the finite element model, this research also focused on the formability of clad metal sheets during hydroforming process which influenced by various process parameters. This research also verified the possibility of using Ti /Al clad metal sheet to substitute for traditional Ti single metal sheet.

Keywords : Finite Element Analysis, Clad Metal, Hydroforming, Process Parameters, Virtual Film

誌謝

求學階段的最後一年光陰就這樣飛逝了。回頭看看，很幸運的一路上堪稱平順，不過也常困惑於這樣的旅程真的是自己規劃的嗎？看著有人埋頭苦讀研究所考試想要轉換跑道，也有人從托福考試開始一步步為出國求學的計畫做足準備。我羨慕他們。不是羨慕他們最後圓滿的達成目標，而是憧憬著那種努力不懈之後終於實現夢想的心情，我也想要體會看到榜上有名或是收到 Admission 時的激動。或許，我是說或許，路途上多了點波折，才能更加激勵自己立下目標，踏實的去努力實踐。不過就我懶散跟三分鐘熱度的個性的，我想能夠像現在這樣已經很完美了！

雖說順遂，其實也是在眾多幫助之下才能度過重重關卡。首先當然要感謝指導教授洪景華老師，願意收我進實驗室，更讓我有機會盡力嘗試提早畢業，在研究過程中，除了專業知識的指導以外，更讓我學習如何細心的分析以及邏輯的判斷。而能夠順利的完成論文，都要歸功於煌棊學長，從幫我建立基礎能力開始，一步步耐心的帶我完成計畫及論文的進度。麒禎學長則在模擬方法上給了我許多寶貴的意見。實驗的部份也仰賴金大仁老師實驗室的崧任學長才得以完成。此外，有了實驗室其他學長（宇中、政成、正展、銘傑、彥彬、志嘉、黃詠、

聖平、時恆、建榮、麒翔)和同學(正一、力釗、筱偉、宗錚)的陪伴與幫助，更讓我的研究生生活增添了多采多姿的一頁。同時也感謝國家高速網路與計算中心及國家高速網路與計算中心提供各項軟硬體設備。謝謝大家！

希望自己在踏入社會的下一個階段，可以再次幸運地遇到這麼多貴人相挺，更期許自己能夠繼續成長茁壯，努力踏實的走好每一步，同時在性格上可以更加成熟，深思熟慮的做出每個讓自己不會後悔的決定。至於最後的目標到底在哪呢？不好意思，請再給我一點時間、機會慢慢去摸索吧。



目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	v
表目錄.....	viii
圖目錄.....	ix
第一章 緒論.....	1
1.1 簡介.....	1
1.1.1 複合金屬.....	2
1.1.2 液壓成形.....	3
1.2 文獻回顧.....	5
1.3 研究動機與目的.....	10
1.4 研究方法.....	11
1.5 論文內容介紹.....	12
第二章 材料性質與試驗.....	13
2.1 拉伸試驗.....	13
2.1.1 試驗目的.....	13
2.1.2 彈性係數與指數定律.....	14

2.1.3 異向性	14
2.1.4 實驗方法及結果	15
2.2 等效彈性係數	18
2.2.1 推導過程	19
2.2.2 實驗驗證	21
2.3 降伏點.....	24
2.4 材料性質整理	26
第三章 有限元素分析	27
3.1 有限元素分析系統	27
3.2 軟體介紹—ABAQUS.....	30
3.3 有限元素模型之基本假設	32
3.4 建立模型	32
3.4.1 取得模具幾何外型	32
3.4.2 網格劃分	36
3.4.3 材料及元素性質給定	37
3.4.4 接觸設定	37
3.4.5 邊界條件及分析設定	38
3.4.6 後處理	44
3.5 網格收斂性測試	45

第四章 板液壓成形實驗與模擬	47
4.1 實驗驗證	47
4.2 有限元素模擬	53
4.2.1 摩擦係數的影響	53
4.2.2 液壓力的影響	60
4.2.3 壓板力的影響	63
4.2.4 模具間隙的影響	65
4.2.5 板件尺寸的影響	68
4.3 複合板材之適用性	70
第五章 結論與未來工作	72
參考文獻	76
附錄 A 載具二（手機背蓋）之實驗與模擬	80
附錄 B 不同材料接觸面之沖頭反力	86

表目錄

表 1.1 液壓成形的各式類別[3].....	3
表 2.1 Ti/Al 複合材料之彈性區性質.....	20
表 2.2 Ti/Al 複合材料之材料性質.....	26
表 3.1 網格收斂性測試結果.....	46
表 4.1 製程參數設定.....	53
表 4.2 摩擦係數設定.....	54
表 4.3 尺寸參數變動表.....	69
表 A.1 SUS 單一板材之機械性質.....	82
表 A.2 各項製程參數設定表.....	83



圖目錄

圖 1.1 應用鈦金屬於殼件製造的 3C 產品[1].....	1
圖 1.2 複合金屬板材輥軋示意圖[2].....	2
圖 1.3 管液壓成形流程示意圖[4].....	3
圖 1.4 板液壓成形流程示意圖[5].....	4
圖 1.5 品質不良的板液壓產品：(a) 皺摺、(b) 破裂 [5、6].....	5
圖 1.6 WBH 料片成形時的皺摺型態[3]	6
圖 1.7 多階段製程的模擬與實驗比對[6].....	6
圖 1.8 單一階段製程的模擬與實驗比對[6].....	7
圖 1.9 可動式母模[8].....	7
圖 1.10 主動彈性式模具[9].....	8
圖 1.11 板件與母模成形時在圓角處的接觸情況[10]	9
圖 1.12 不同的板件幾何外型[11].....	9
圖 1.13 成形過程中板件受液壓力作用示意圖[12].....	10
圖 1.14 手機電池背蓋	11
圖 2.1 MTS-810 拉伸試驗機.....	16
圖 2.2 拉伸試驗試片尺寸圖	17
圖 2.3 Ti/Al 拉伸試驗試片配置圖.....	17

圖 2.4 Ti/Al 真實應力/真實應變曲線.....	18
圖 2.5 複合材料示意圖	19
圖 2.6 Ti/Al 複合金屬板材之厚度比.....	20
圖 2.7 三點彎折示意圖	21
圖 2.8 電腦伺服控制材料試驗機	22
圖 2.9 三點彎折模具	22
圖 2.10 三點彎折模具配置及尺寸圖	23
圖 2.11 Ti/Al 複合材料實驗 E 值	23
圖 2.12 不同降伏應力之成形結果厚度分佈圖	25
圖 2.13 不同降伏應力之回彈結果位移分佈圖	25
圖 3.1 有限元素軟體之分析流程圖[21].....	28
圖 3.2 手機背蓋與其模具、沖頭幾何外型圖	33
圖 3.3 板液壓成形機台模具配置圖	33
圖 3.4 下模具上之溝槽尺寸圖	34
圖 3.5 下模具 a 及其板件成形結果有效應變分佈圖	35
圖 3.6 下模具 b 及其板件成形結果有效應變分佈圖	35
圖 3.7 下模具 c 及其板件成形結果有效應變分佈圖	36
圖 3.8 有限元素模型	37
圖 3.9 下模具之內、外部示意圖	38

圖 3.10 板液壓成形製程圖	39
圖 3.11 板液壓製程板件變形受力示意圖	40
圖 3.12 邊界條件設定示意	41
圖 3.13 不同液壓力施加方式之成形結果厚度分佈圖	42
圖 3.14 板液壓成形實驗液壓力歷程圖	42
圖 3.15 液壓力平均歷程及趨近曲線圖	43
圖 3.16 金屬板件最低階模態頻率分析圖	44
圖 3.17 元素數目與板件厚度之關係圖	46
圖 4.1 板液壓成形實驗設備	48
圖 4.2 板液壓成形實驗模具與金屬板件之尺寸圖	49
圖 4.3 下模具與沖頭間隙示意圖	50
圖 4.4 板液壓成形實驗液壓力歷程圖	50
圖 4.5 板件成形結果	51
圖 4.6 實驗與模擬結果厚度分佈比較圖	51
圖 4.7 實驗與模擬結果沖頭反力比較圖	52
圖 4.8 分析歷程中之動能與內能變化圖	52
圖 4.9 改變摩擦係數之接觸對示意圖	54
圖 4.10 第一組摩擦係數設定之板件厚度分佈圖	56
圖 4.11 第一組摩擦係數設定之板件減薄率	56

圖 4.12 第二組摩擦係數設定之板件厚度分佈圖	57
圖 4.13 第二組摩擦係數設定之板件減薄率	57
圖 4.14 D 點處板件滑移量	58
圖 4.15 C 點處板件滑移量	59
圖 4.16 液壓力施加歷程	60
圖 4.17 不同液壓力之板件厚度分佈圖	61
圖 4.18 不同液壓力之板件減薄率	61
圖 4.19 液壓力施加歷程	62
圖 4.20 不同液壓力之板件減薄率	62
圖 4.21 沖頭行程 11mm 時之液壓力大小示意圖	63
圖 4.22 不同壓板力之模擬結果板件厚度分佈圖	64
圖 4.23 不同壓板力之板件減薄率	65
圖 4.24 不同模具間隙之板件厚度分佈圖	66
圖 4.25 不同模具間隙之板件減薄率	67
圖 4.26 板件成形合模性比較圖	67
圖 4.27 板件尺寸定義示意圖	68
圖 4.28 不同板件尺寸之板件厚度分佈圖	69
圖 4.29 不同板件尺寸之板件減薄率	70
圖 4.30 不同材料之實驗結果板件減薄率	71

圖 5.1 手機背蓋之板液壓成形成品	73
圖 A.1 載具二模具之幾何外型	80
圖 A.2 載具二之有限元素模型	81
圖 A.3 SUS 真實應力/真實應變曲線	82
圖 A.4 SUS 之真實應力/塑性應變曲線與指數定律曲線圖	82
圖 A.5 板件成形結果量測部位示意圖	83
圖 A.6 SUS 實驗與模擬結果厚度分佈比較圖	84
圖 A.7 不同壓板力之 Ti/Al 板件厚度分佈圖	84
圖 A.8 不同壓板力之 Ti/Al 板件減薄率	85
圖 A.9 Ti/Al 板材板液壓成形實驗結果 (1 ton)	85
圖 B.1 U-bending 實驗之沖頭反力差異[32]	87
圖 B.2 深引伸製程中之成形性差異[33]	87
圖 B.3 V-bending 實驗之沖頭反力差異	88

第一章 緒論

1.1 簡介

現今 3C 產品為了使產品外殼擁有更優異的機械性質，往往採用如鈦等貴重金屬作為材料（如圖 1.1），但同時也因此提高產品的製造成本，且因為單一金屬材料往往無法滿足產品的多功能之要求，因此結合兩種以上金屬材料的複合金屬，已然成為現今材料的一個新的發展方向。由於一般複合金屬的成形性相較之下表現較不優異，而液壓成形技術正能有效解決此一困難，因此若能有效結合複合金屬與液壓成形製程，相信定能成功展現出複合金屬在 3C 產品運用上的彈性及優勢。



圖1.1 應用鈦金屬於殼件製造的3C產品[1]

1.1.1 複合金屬

由於3C產品除了材料機械性質的需求之外，也常要求具有特殊的表面光澤與抗腐蝕、耐磨耗性等性質，隨著時代日新月異的進步與市場需求的不斷改變，材料的需求會越來越多樣化，舉例來說，複合金屬，一般又稱為包覆金屬（clad metal），是透過軋軋（如圖1.2）等製程，利用壓擠作用產生的壓力，以及接觸面間之摩擦，使不同材質的二種或二種以上金屬材料合而為一，並且使工件厚度壓縮、寬度與長度增加，進而達到板件晶粒密度緻密、減少材料內部間隙、增加材料抗拉強度等效果。其具備兩種或多種金屬物理和機械特性，又能夠增加複合後的功能性及減少材料的厚度和減輕部份重量並降低高單價金屬之使用率。因此選用複合金屬板材不僅在表面可以有優異的機械特性與金屬光澤表現，更能達到減輕重量及材料成本等目的。

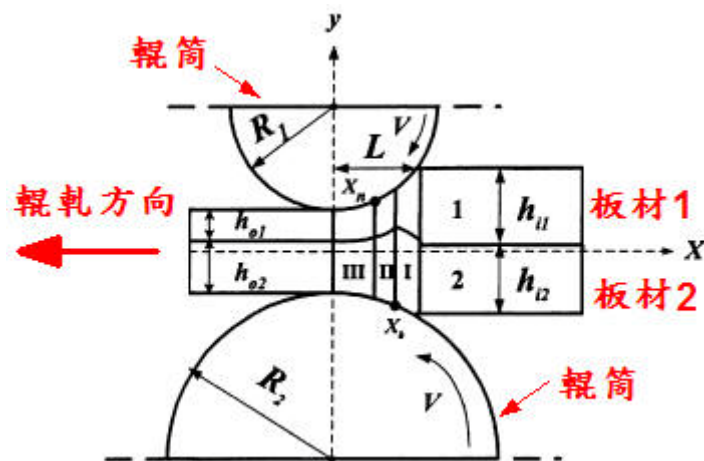


圖1.2 複合金屬板材軋軋示意圖[2]

1.1.2 液壓成形

液壓成形一般可依照加工產品的外型區分為管液壓成形 (tube hydroforming) 與板液壓成形 (sheet hydroforming) (見表 1.1)。

表 1.1 液壓成形的各式類別[3]

Classification of hydroforming	
Tube hydroforming (管液壓成形)	Low pressure hydroforming
	High pressure hydroforming
	Sequenced pressure hydroforming
Sheet hydroforming (板液壓成形)	Hydraulic stretch forming of single blank
	Hydraulic stretch forming of double blank
	Hydromechanical deep drawing

管液壓成形主要為將欲成形之管件放置於上、下模具之中，藉由兩端的夾具進行夾持並固定管件的動作，隨後由夾具中的孔洞充填液壓油加壓，利用液壓使得管件變形並緊密貼附於模具表面，進而成形為所需之幾何外型 (如圖 1.3)。

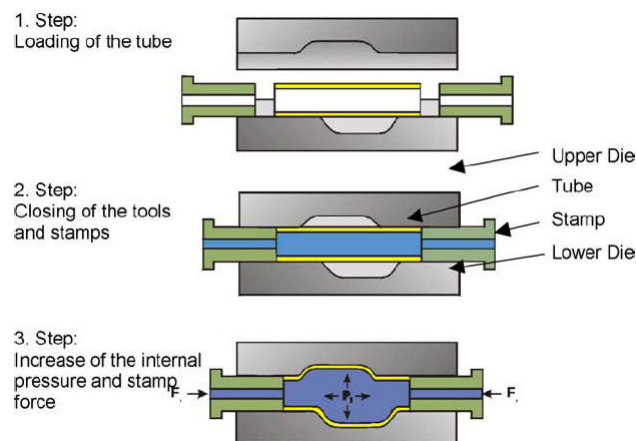


圖 1.3 管液壓成形流程示意圖[4]

板液壓成形則是將板件放置於下模具的液壓室之上，由上方壓料板給予板件一壓板力以夾持並固定板件，隨後當沖頭向下移動至接觸板件時，液壓室經由調節閥提供壓力作用，壓力持續作用使板件受到液體擠壓達到成形的目的（如圖 1.4）。

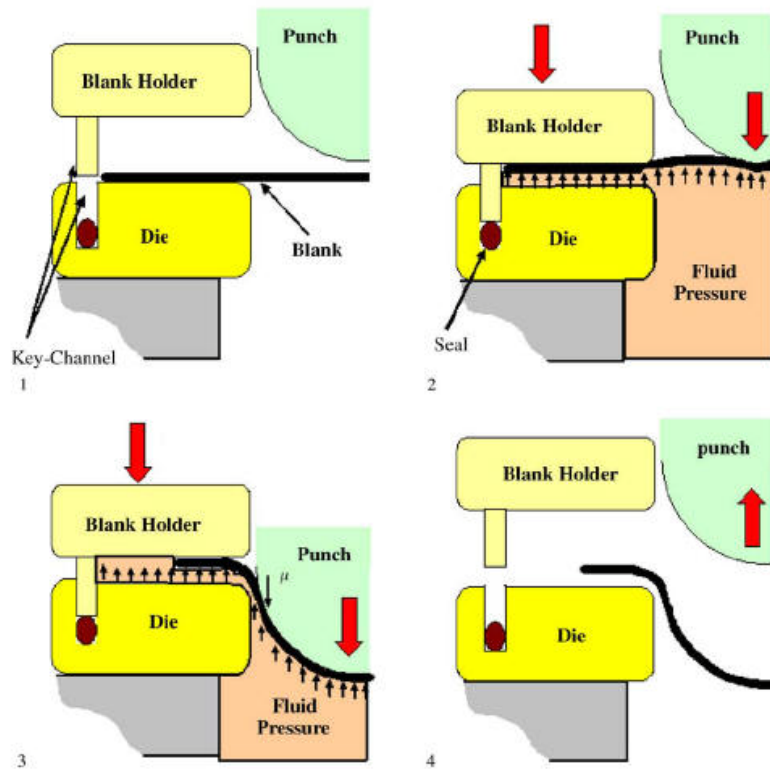


圖1.4 板液壓成形流程示意圖[5]

由於在板液壓製程中液壓力是維持一定的均壓情況，因此可使板件相較於沖壓更貼附模具外形，進而形成正確並理想的加工外形，且使得板件成形厚度更為均一。但是不適當的材料選用、模具尺寸設計不佳或是不當的製程參數，將有可能造成液壓成形過程中材料表面發生部分缺陷的情況，例如：皺摺、破裂（如圖.5）等產品不良品質。

本研究主要將探討複合金屬之板液壓成形加工，故後續的內容將以板液壓製程所產生的問題進行討論。

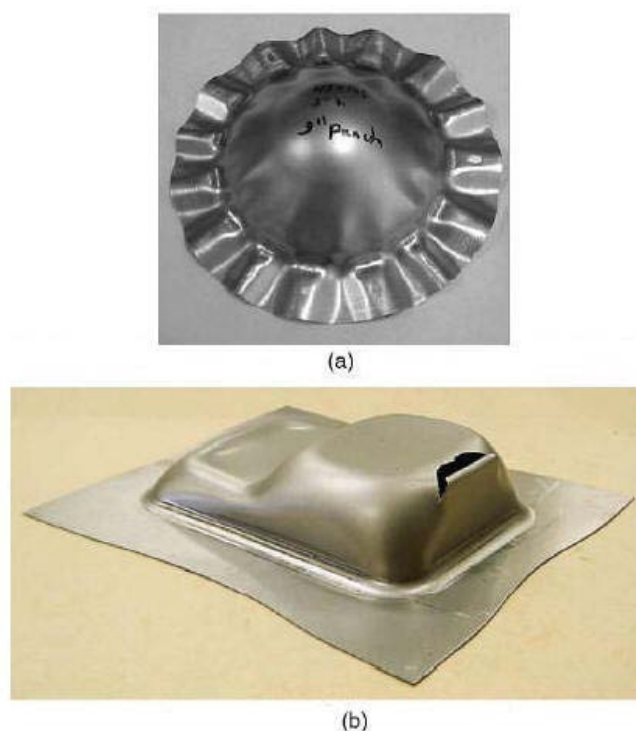
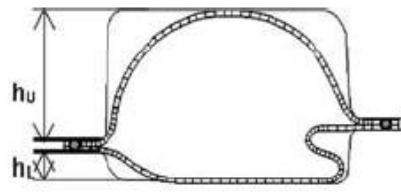


圖1.5 品質不良的板液壓產品：(a) 皺摺、(b) 破裂 [5、6]

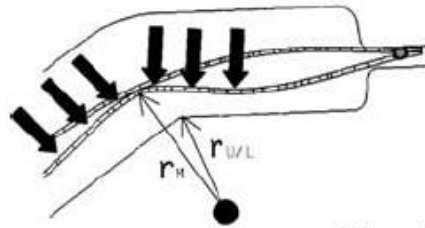
1.2 文獻回顧

近年來，液壓成形憑藉著可加工複雜並具高強度同時兼具輕量化之零組件，逐漸應用於汽車與航太工業中[7]。

Shin[3]等人利用WBH (welded blank hydroforming)進行汽車零件的成形加工，認為模具圓角設計及上、下模引伸深度的對稱性將影響料片皺摺的發生與否（如圖1.6）。



(a) wrinkling type 1



(b) wrinkling type 2

圖1.6 WBH料片成形時的皺摺型態[3]

Keigler[4]等人利用提昇液壓成形時之工作溫度來增進管件的成形性，同時也可以減低成形所需的能量消耗。

Kim[6]等人比較了單一階段製程與多階段製程板液壓成形之差異，並利用LS-DYNA進行數值分析與實驗比對（如圖1.7、圖1.8）。

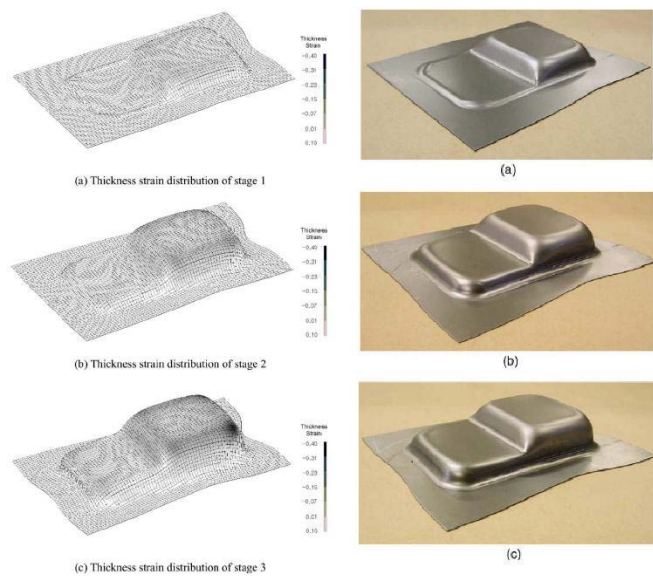


圖1.7 多階段製程的模擬與實驗比對[6]

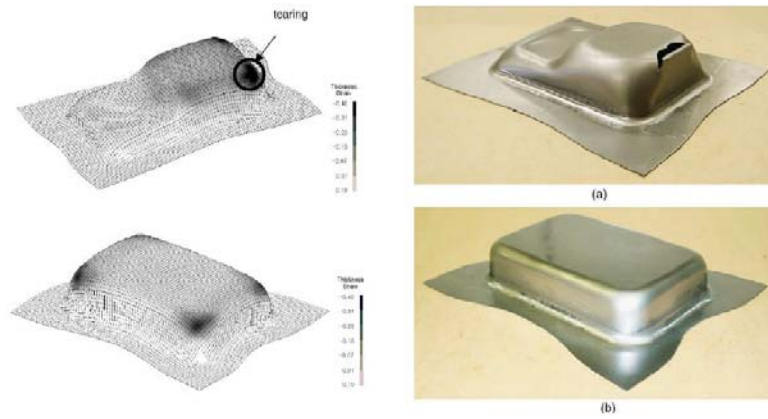


圖1.8 單一階段製程的模擬與實驗比對[6]

Zhang[8]等人設計了可以移動的母模（如圖1.9），藉此減小金屬板件在成形過程中的變形面積，已達到減小板件薄化並提昇成形極限的目的。

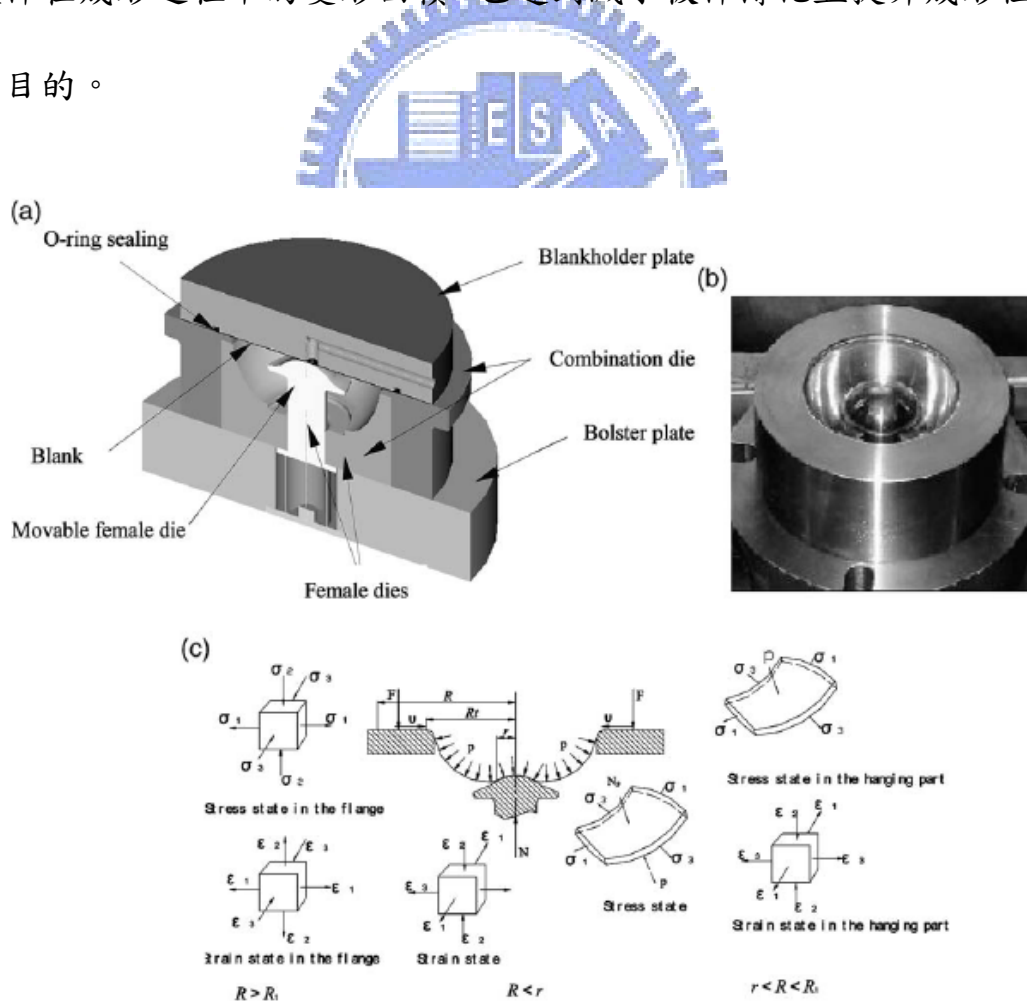


圖1.9 可動式母模[8]

Groche和Metz [9]提出主動彈性式(active-elastic)的模具設計（如圖1.10），給予板液壓成形適當的夾持力藉由提升板件邊緣的流動性以達到較理想的引伸率，減小板件厚度變薄的趨勢。文中利用PAM-STAMP 模擬1/4 對稱的模型成形，並觀察截面厚度的分佈行為。

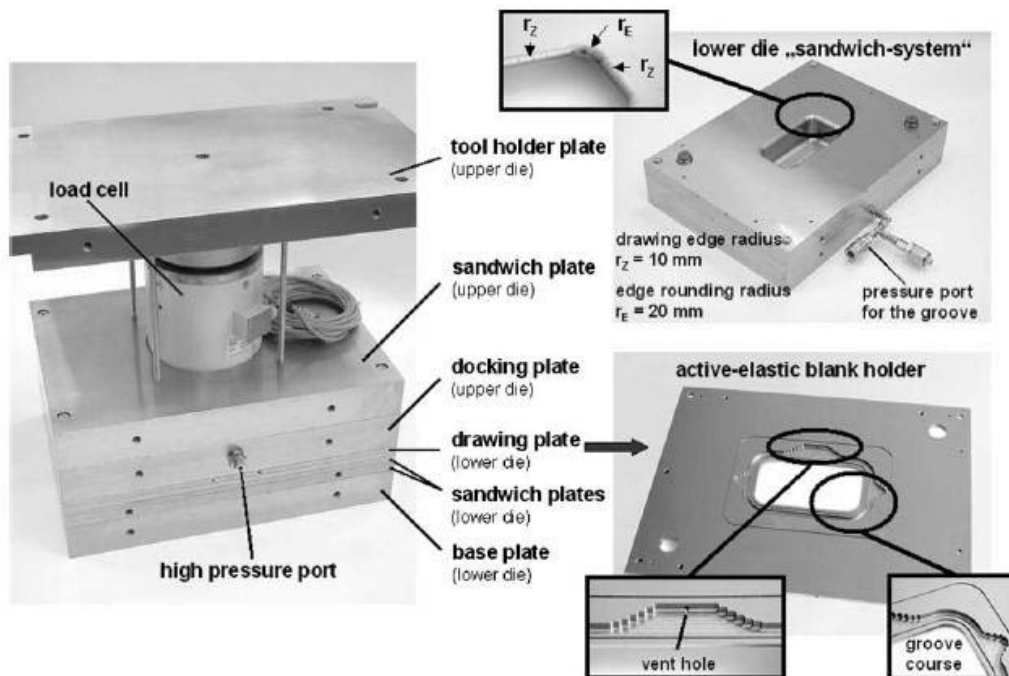


圖1.10 主動彈性式模具[9]

蔡[10]利用MARC針對板靜壓引伸加工之成形參數進行有限元素分析，認為板件若在成形過程中與母模在圓角處接觸，則表示液壓力的不足，將會無法確切達到成功的液靜壓引伸成形（如圖1.11）。

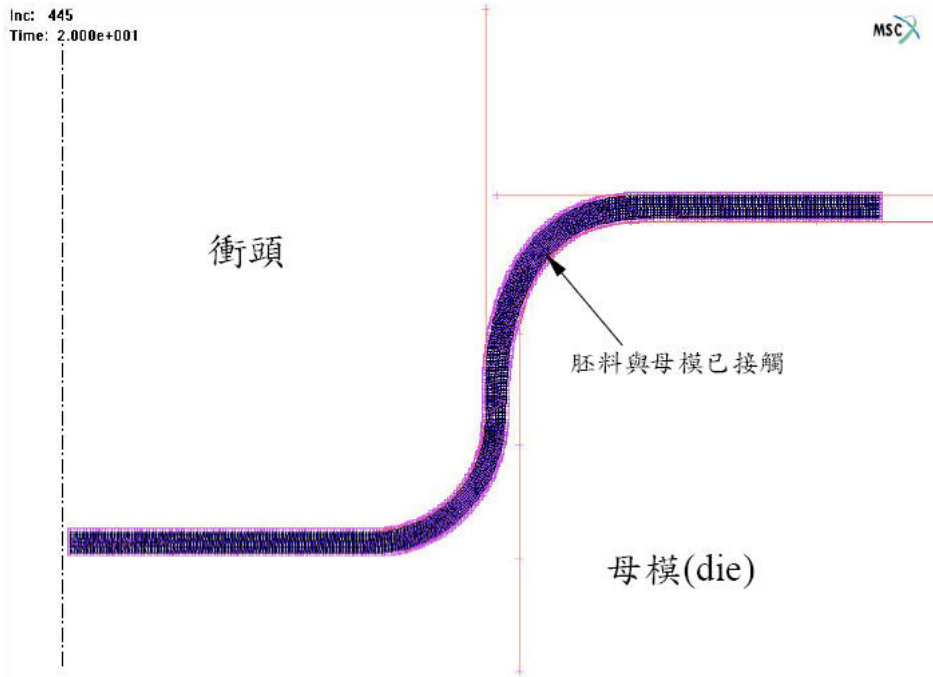


圖1.11 板件與母模成形時在圓角處的接觸情況[10]

Onder和Tekkaya[11]希望透過板件幾何外型的選擇增進板件的成形性，其分析了包括圓形、橢圓形、長方形、正方形.....等等的幾何外型（如圖1.12）。

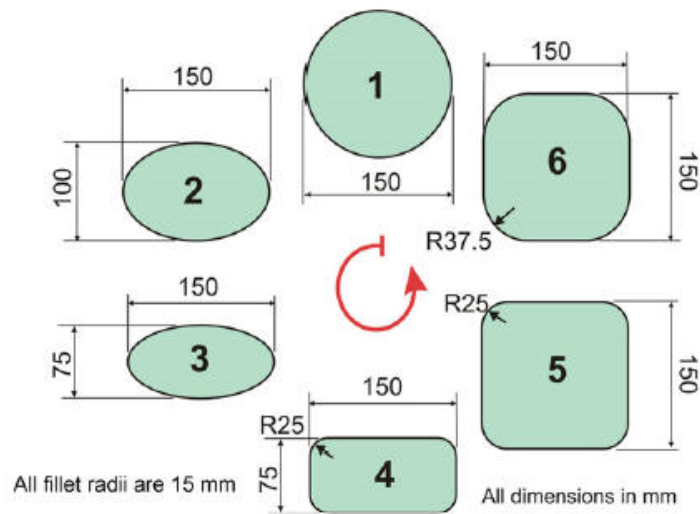


圖1.12 不同的板件幾何外型[11]

Thiruvarduchelvan和Tan [12]從理論推導液壓力大小在成形過程中對於板件的影響（如圖1.13），其認為適當的控制液壓力不僅可以幫助料件進給，更能抑制皺褶、破裂等缺陷發生。

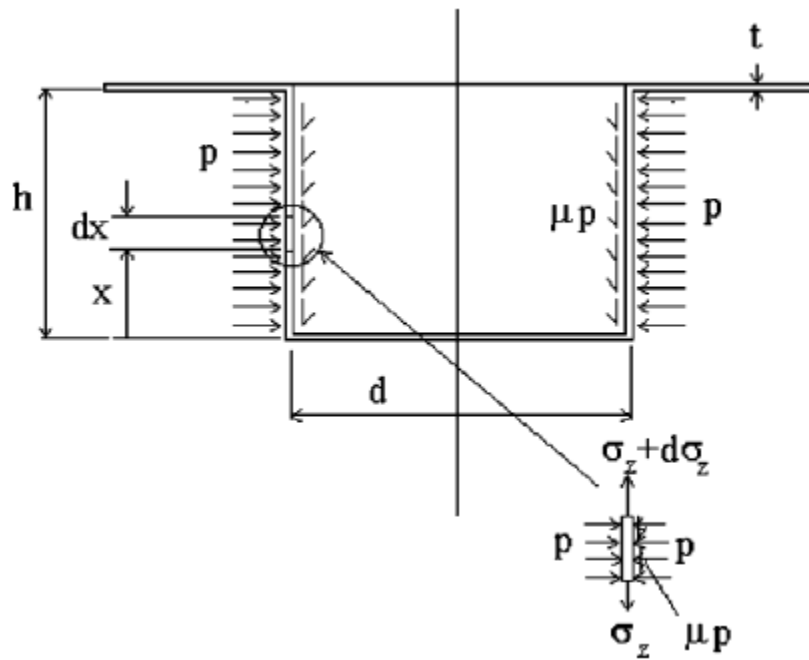


圖1.13 成形過程中板件受液壓力作用示意圖[12]

1.3 研究動機與目的

在目前金屬成型之材料選用上，複合板材的多功能性逐漸受到重視，單一道次之板液壓成形技術，也廣泛應用於不同領域的產品製程中，對於3C殼件製品中，兩者（複合板材與板液壓成形）的優點，將可以突破傳統單一材料與多道次製程的困難點。然而，複合板材在板液壓成形過程中，不適當的成形參數如：壓板力（holding force），液壓室壓力（internal pressure），模具曲率變化，板件初始尺寸等等，

將會造成不良的材料流動性，產生相當程度的成形困難性甚至產生皺摺、破裂等情況。

因此本研究將以手機電池背蓋作為載具（圖 1.14），針對複合金屬板材應用於板液壓成形時之各項製程參數進行有限元素的模擬分析，並與實驗相互驗證，進而達到改善製程的目的，以提供未來製程與模具設計的參考。

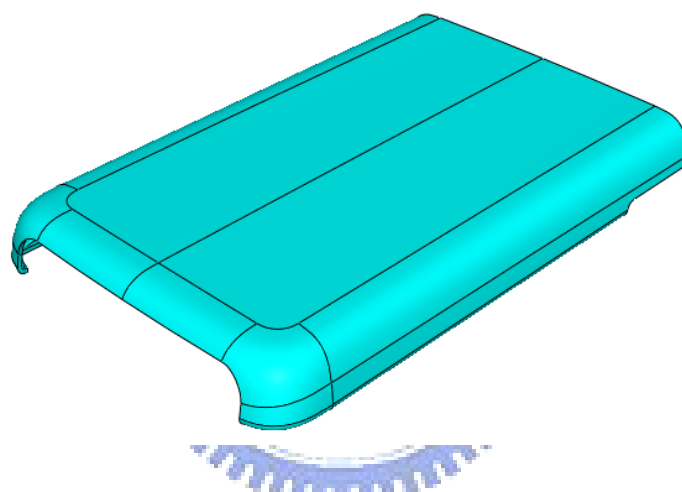


圖1.14 手機電池背蓋

1.4 研究方法

本研究將選用 Ti /Al (Ti-cp1/A1050)複合金屬板材作為板液壓成形之板件進行有限元素分析，並利用實驗與 Ti 單一板材相互比較，以驗證複合金屬板材確實可以有效取代目前所使用之單一板材。

首先由材料試驗取得板件之機械性質，而後搭配有限元素軟體 ABAQUS 模擬分析利用複合金屬製造 3C 產品外殼之板液壓成形，並

經由觀察量測板液壓成形實驗的實際產品各部位之成形品質及厚度，確認模擬結果是否與實際實驗相吻合。

研究進行中希望藉由模具設計及模擬分析上的參數設定進行修改，觀察在板液壓成形過程中板件之厚度分佈，以瞭解不同製程參數下，板件之變形與薄化趨勢之差異。預期可以找出一組較佳的製程參數提供實際製程設計之參考，使得板件在板液壓成形後的厚度適當且均勻分佈，並貼近最初模具設計的幾何外型。

1.5 論文內容介紹

本研究中所使用的 Ti 單一板材、Ti/Al 複合板材與板液壓成形機台、模具，均由財團法人金屬發展研究中心（以下簡稱金屬中心）所提供。在接續第一章之介紹後，本論文中將分：材料性質與試驗（第二章）、有限元素分析（第三章）、板液壓成形實驗與模擬（第四章）、結論與未來工作（第五章）進行詳細介紹。

第二章 材料性質與試驗

在瞭解金屬板材的成形性之前，首先需要針對板件之機械性質進行實驗，後續的有限元素分析模擬，亦需要相關的機械性質與特性，包括彈性係數、真實應力/真實應變曲線等，因此在本研究中，將先針對Ti/Al複合板材進行材料試驗。

2.1 拉伸試驗

2.1.1 試驗目的

為求模擬分析與實驗真實條件的共同性，本計畫將先針對Ti/Al複合板材進行拉伸試驗以取得其基本機械性質，如：彈性係數、塑性性質及異向性材料之塑性應變比值等。本研究中所使用之Ti/Al複合板材為將初始厚度0.3mm/0.5mm的兩種材料經由一次冷軋軋至所需厚度0.45mm。

由於Ti的退火溫度約為650~760°C [13]，而Al的熔點卻只有約為660°C [14]，所以冷軋完成後無法做到完全退火，只能選擇在500°C下退火1小時，之後自然爐冷（空冷）。在無法有效取得軋軋後Ti及Al兩層材料分別材料性質的情況下，本研究考慮將Ti/Al複合板材視為一等效且均質（homogeneous）之材料進行後續的有限元素分析。

2.1.2 彈性係數與指數定律

由拉伸試驗取得之拉伸數據可換算得到工程應力/真實應變，但後續在模擬過程中，則是需要真實應力/真實應變數據，故可由式2.1換算求得，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，所量測得的數據將不具意義。

$$\sigma_T = \frac{F}{A} e^{\epsilon_T} \quad (2.1)$$

其中 σ_T ：真實應力 (MPa)、 ϵ_T ：真實應變、 F ：荷重值 (N)、

A ：原截面積 (mm^2)、 e ：工程應變

利用真實應力/真實應變曲線取其應變值小於0.2%之範圍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/真實應變曲線利用式2.2扣除前段彈性部份，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) (式2.3) 與其趨近，可利用此指數定律有效表示材料的機械性質[15]。

$$\epsilon_T^p = \epsilon_T - \frac{\sigma_T}{E} \quad (2.2)$$

$$\sigma_T = K(\epsilon_T^p)^n \quad (2.3)$$

其中， ϵ_T^p ：真實塑性應變、 K, n ：常數

2.1.3 異向性

由於本研究所使用之Ti/Al複合板材為冷軋軋所得，且並未為達

到完全退火，因此將其視為異向性（anisotropic）的材料並探討其方向性。

在考慮Ti/Al為異向性材料的情況下，需求得其塑性應變比值r（plastic strain ratio）。r定義為拉伸試驗中試片之側向應變與厚度方向應變之比值（式2.4），其物理意義為材料變薄之阻抗，可反映成形時厚度變形的難易程度。r值越大，在厚度方向的材料越不容易變形；反之亦然[16]。

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.4)$$

其中， ε_w ：側向應變、 ε_t ：厚度方向應變

在體積不變的假設下，令

$$S = \frac{-d\varepsilon_w}{d\varepsilon_l} = \frac{-d\varepsilon_w}{-(d\varepsilon_t + d\varepsilon_w)} = \frac{r}{1+r} \quad (2.5)$$

其中， $d\varepsilon_l$ ：軸向應變增量

獲得軸向及側向方向之應變後，取 $-\varepsilon_w$ 為縱座標及 ε_l 為橫座標作圖，利用線性迴歸以求得斜率S，再由式2.7換算求得r值。

$$r = \frac{S}{1-S} \quad (2.6)$$

2.1.4 實驗方法及結果

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），並在試片兩面貼上應變規（strain gage）以量測其應變。實驗所用之應變規為惠達公司（VisHay）所生產之一般常溫型單軸拉伸應

變規EP-08-125BT-120。



圖2.1 MTS-810拉伸試驗機

拉伸試驗之試片尺寸由ASTM-E8之拉伸試驗規範決定[17]，然而考慮原始試片取得的因素，故將試片大小依原始試片尺寸作等比例縮小，拉伸試片尺寸如圖2.2所示。另外，由於考慮Ti/Al複合板材為異向性的材料，因此需要與軋軋方向夾 0° 、 45° 、 90° 的拉伸試片，其配置如圖2.3所示。此外，拉伸試驗所得之應力/應變曲線會因為實驗條件不同而有所差異，本實驗將在常溫下進行，並設定拉伸速率為 0.1mm/s 進行實驗，設定擷取器之擷取速率為 10times/s 以紀錄拉伸試驗機上荷重元（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。

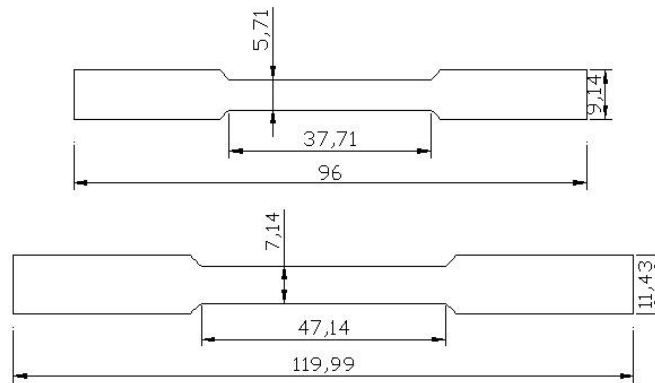


圖2.2 拉伸試驗試片尺寸圖

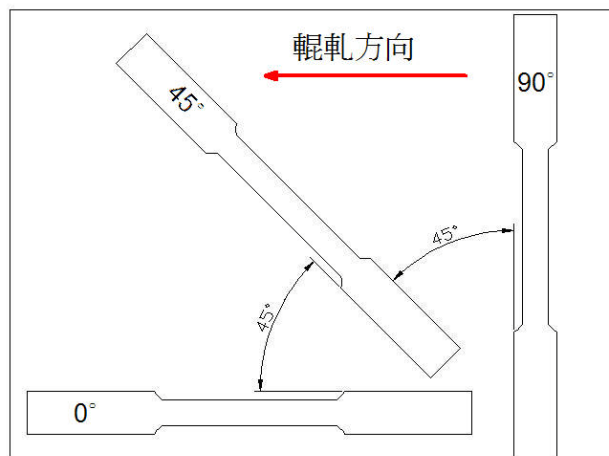


圖2.3 Ti/Al拉伸試驗試片配置圖

圖2.4為拉伸試驗所求得之Ti/Al複合板材真實應力/真實應變曲線。不過由於材料過薄且軟，加上拉伸試驗機之油壓夾頭控制夾持時之困難，使得夾持後板材有些許彎折變形，所以由拉伸試驗曲線無法清楚明確觀察出前端彈性區之材料性質及其降伏點(yielding point)，但此資料仍已足以提供取得材料之塑性區性質。至於彈性係數及降伏點之取得則會在下一章節中詳細介紹。

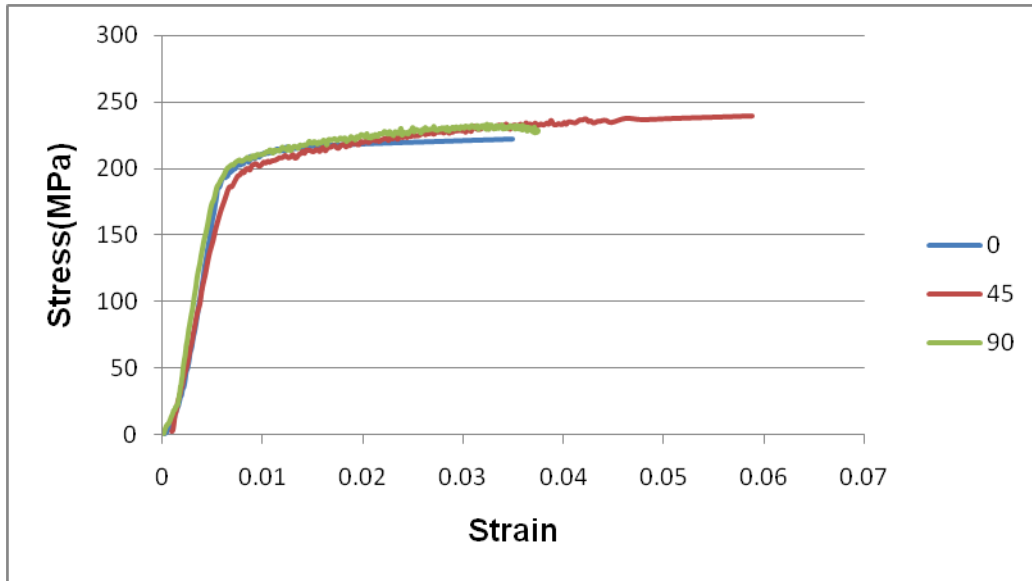


圖2.4 Ti/Al真實應力/真實應變曲線

2.2 等效彈性係數

回彈量的預測及控制一直是板金成形中一個相當重要的課題，其取決於產品是否能夠確切吻合設計之尺寸，而回彈發生的原因為在成形完成後負荷卸載，材料發生應力釋放的情況，因此回彈量的大小與材料之彈性係數及降伏點息息相關。有鑑於上一章節所介紹之拉伸試驗並無法準確取得複合材料之彈性區性質，為了後續板液壓成形回彈分析之可信度與真實性，本研究將推導出一等效的複合金屬板材機械性質，希望可利用此材料模型準確的預測板件回彈行為，並利用三點彎折試驗（3-points bending）進行驗證。

2.2.1 推導過程

假設滾軋前之 Ti 及 Al 兩層金屬為均值且等向性的材料，所以在經滾軋製程之後，因為僅發生塑性變形，其彈性區性質仍保有此一特性，並假設其滾軋後之接合面為完美接合，軸向應變均勻且等量分佈於 Ti 及 Al 材上，因此如圖 2.5 所示，根據混合定律(rule of mixtures) [18]，沿 1 及 2 軸向兩層材料以並聯方式連接，其等效 E 值如式 2.7 所示。

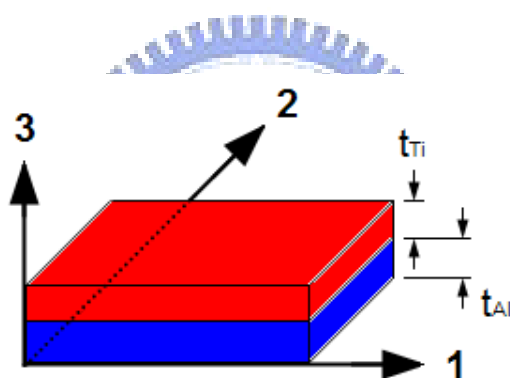


圖2.5 複合材料示意圖

$$E_1 = E_2 = V_{Ti} E_{Ti} + V_{Al} E_{Al} \quad (2.7)$$

$$\text{其中， } V_{Ti} = \frac{\text{volume of Ti}}{\text{volume of composite}} = \frac{t_{Ti}}{t_{total}},$$

$$V_{Al} = \frac{\text{volume of Al}}{\text{volume of composite}} = \frac{t_{Al}}{t_{total}}$$

而沿 3 軸向則以串聯方式連接，其等效 E 值如式 2.8 所示。

$$\frac{1}{E_3} = \frac{V_{Ti}}{E_{Ti}} + \frac{V_{Al}}{E_{Al}} \quad (2.8)$$

其餘蒲松比 ν (Poisson's ratio) 及剪力彈性係數 G (shear modulus)

如式 2.9~2.11 所示。

$$v_{13} = v_{23} = V_{Ti} v_{Ti} + V_{Al} v_{Al} \quad (2.9)$$

$$G_{13} = G_{23} = \frac{E_1}{2(1+v_{13})} \quad (2.10)$$

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{V_{Ti}}{G_{Ti}} + \frac{V_{Al}}{G_{Al}} \quad (2.11)$$

因此根據參考資料所查得之 Ti[19]及 Al[20]單一材料機械性質，
 搭配由光學顯微鏡量測所得之 Ti/Al 厚度分佈（圖 2.6），推得複合
 金屬板材之等效機械性質如表 2.1 所示。

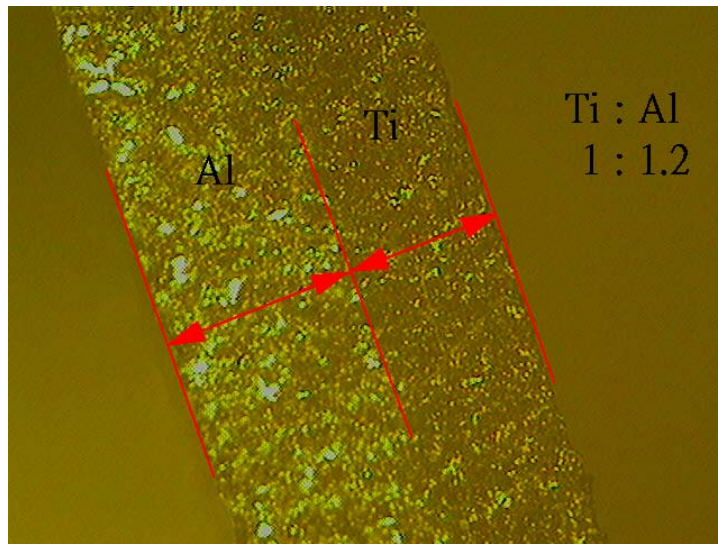


圖2.6 Ti/Al複合金屬板材之厚度比

表 2.1 Ti/Al 複合材料之彈性區性質

	Ti	Al	Composite
Thickness_t(mm)	0.2045	0.2455	0.45
Young's modulus_E(GPa)	107	70	E ₁ =86.8
			E ₂ =86.8
			E ₃ =83.1
Poison's ratio_v	0.34	0.34	0.34
Shear modulus_G(GPa)	39.9	26.1	G ₁₂ =31
			G ₁₃ =32.4
			G ₂₃ =32.4

2.2.2 實驗驗證

由三點彎折試驗（圖 2.7）可以取得板件彎折實之沖頭反力及其位移，其關係如式 2.12 所示，因此可藉此反推材料之彈性係數。

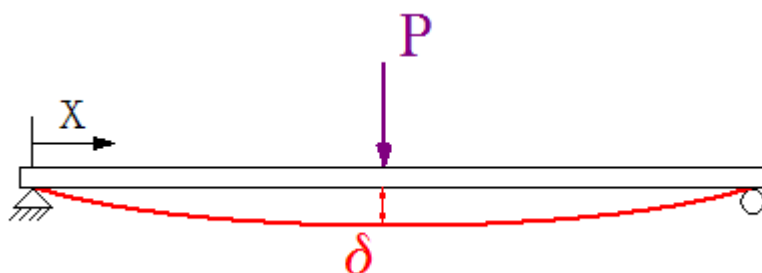


圖2.7 三點彎折示意圖

$$(EIv''(x))'' = P(x) \quad (2.12)$$

其中， $P(x)$ ：x 處之荷重、 $v(x)$ ：x 處之位移、

I ：試片之慣性矩（inertia）

本研究之三點彎折試驗係採用本系實驗室之電腦伺服控制材料試驗機（圖 2.8）搭配其原廠所附之三點彎折模具（圖 2.9）進行實驗。將複合材料試片置於其上，沖頭以 0.1mm/min 的速度下移 0.5mm，以每秒一點的速度紀錄沖頭之荷重變化。模具配置及尺寸如圖 2.10 所示。



圖2.8 電腦伺服控制材料試驗機



圖2.9 三點彎折模具

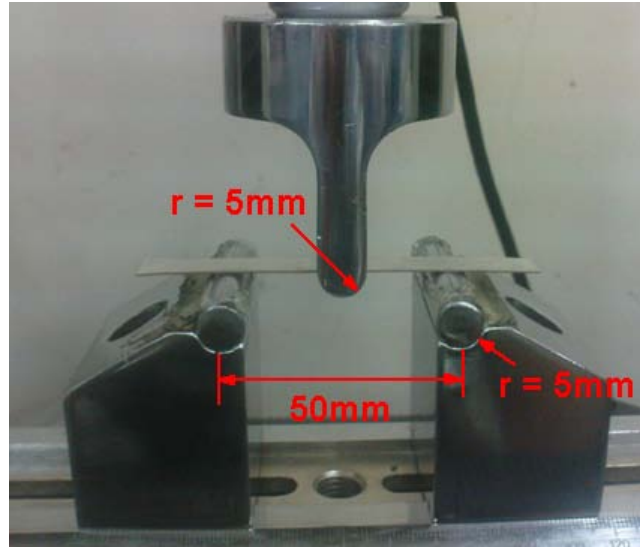


圖2.10 三點彎折模具配置及尺寸圖

實驗結果如圖 2.11 所示，其平均 E 值為 96GPa，在考慮由於經軋製程之材料並不十分平整，再加上實驗誤差的影響，本研究認為此一結果已可驗證上一章節所推導出的等效材料彈性係數 (E_1) 86.8GPa，至於其餘方向之彈性係數，則由於受限於料片的取得及方向，將不再加以驗證。

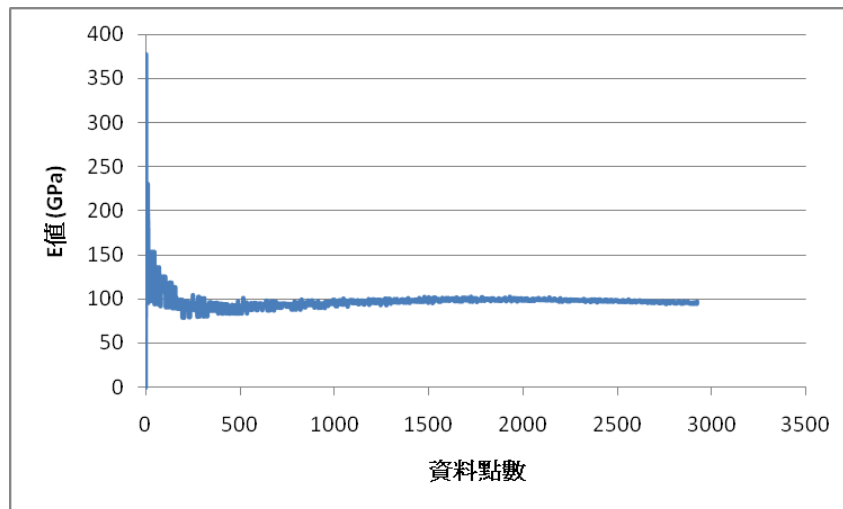


圖2.11 Ti/Al複合材料實驗E值

2.3 降伏點

一般如鋁、銅等非鐵金屬在拉伸試驗所得之真實應力/真實應變曲線上並無明顯的降伏點 Y，因此工程上常以 0.2% 的應變所對應之應力值定義為降伏強度。不過由於本研究所採用之 Ti/Al 複合材料，尚無法由拉伸試驗取得其彈性係數，故也無法利用上述方式取得其降伏點。在無法正確取得降伏點的強況下，本研究首先假設了兩個降伏點進行比較。其一為直接由拉伸曲線觀察得之 185MPa (圖 2.4)，其二則為 Ti/Al 複合材料中降伏應力較小之 Al 的降伏應力 30MPa[21]。利用此兩組降伏應力值代入後續所建構之有限元素模型進行模擬，比較其成形結果及回彈量。

成形結果如圖 2.12 所示，回彈結果如圖 2.13 所示 (論文中所有有限元素模擬結果，厚度分佈圖 (STH) 與位移分佈圖 (U)，其單位均為 mm。)。由圖可見，降伏應力的大小對於模擬結果的厚度分佈影響甚小，而雖然對於回彈結果影響甚劇，不過其回彈量之數值最大處發生在板件成形後餘料之部位，而實際產品所要求之部位，則由於材料間的拘束而使得回彈量減小，其最大值僅約達 0.08mm，兩種材料模型 (185MPa、30MPa) 間的差異也僅約 0.03mm。

由上述結果可見，降伏應力並不會對成形結果之後度分佈造成影響，且由於回彈量過小，因此本研究後續將不再針對板件成形後之回

彈行為進行深入探討，並選用由拉伸試驗直接觀察所得之降伏應力

185MPa 進行後續之有限元素分析。

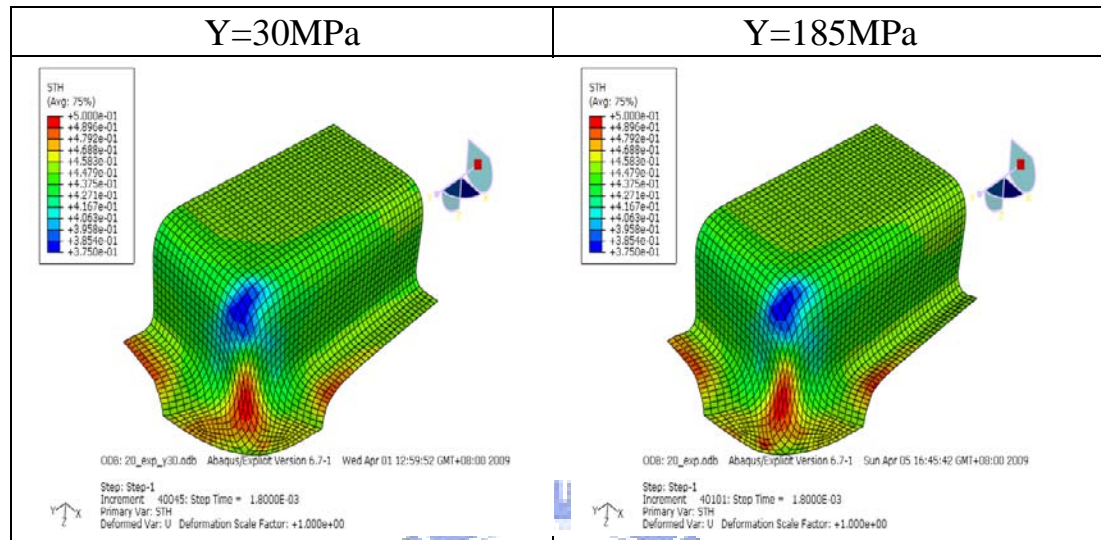


圖2.12 不同降伏應力之成形結果厚度分佈圖

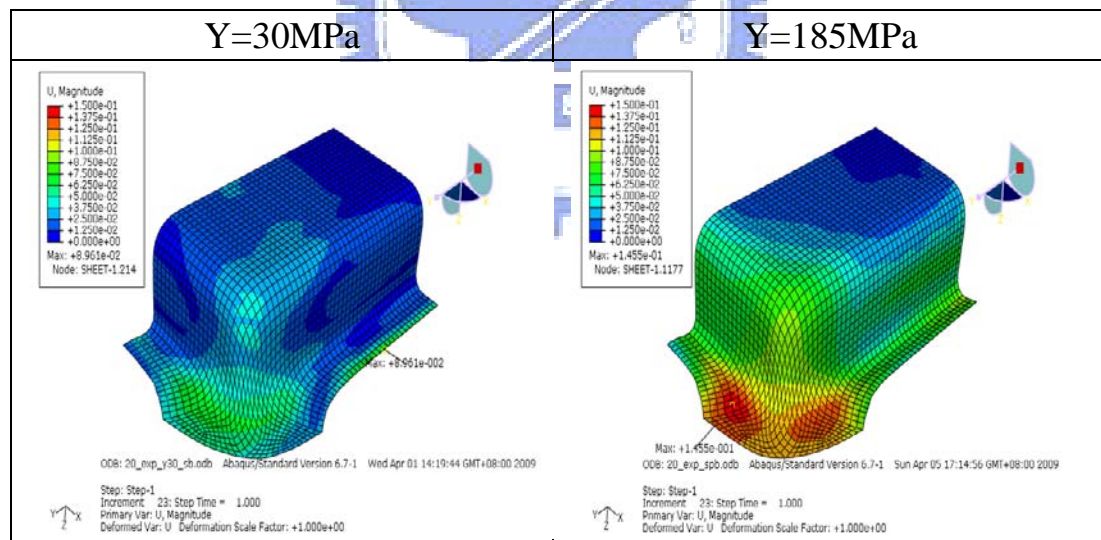


圖2.13 不同降伏應力之回彈結果位移分佈圖

2.4 材料性質整理

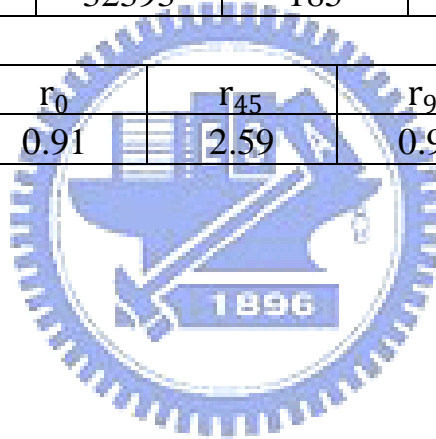
在上述章節中以針對各項材料性質進行討論，綜合以上章節整理出後續有限元素模擬所需之材料參數，如表 2.2 所示。

表 2.2 Ti/Al 複合材料之材料性質

E_1 (MPa)	E_2 (MPa)	E_3 (MPa)	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}
86814	86814	83051	0.34	0.34	0.34

G_{12} (MPa)	G_{13} (MPa)	G_{23} (MPa)	Y(MPa)	K	n
30989	32393	32393	185	1/250	1/0.03

r_0	r_{45}	r_{90}
0.91	2.59	0.94



第三章 有限元素分析

由於科技的快速發展，設計物件趨於複雜、精密的同時，生產的技術必須隨之提升，若以傳統的試誤法 (trial and error) 來累積經驗，所要付出的設計分析成本相當高，並不符合經濟效益，加上某些產品的生產時程相當緊促，在研發時間上並不容許採用試誤法來設計分析。

有限元素法 (finite element method) 在工業界的應用以超過一百年的歷史。發展上從矩陣結構分析 (matrix structural analysis) 的方法發展開始，首先應用於梁 (beam) 及桁架 (truss) 為主的鋼構上，而後將理論引用至各個物理領域，例如熱傳等。目前利用有限元素分析 (finite element analysis) 來進行產品的模擬分析研究的技術，已經有非常多的學者投入相關的研究發展，其理論背景可說是相當純熟。運用電腦輔助工程分析 (computer-aided engineering) 可以免除一般實驗分析所可能發生或是無法達成的問題，因此本章將針對複合金屬板材板液壓成形製程進行有限元素分析，並與實際實驗相互比對驗證。

3.1 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 3.1。

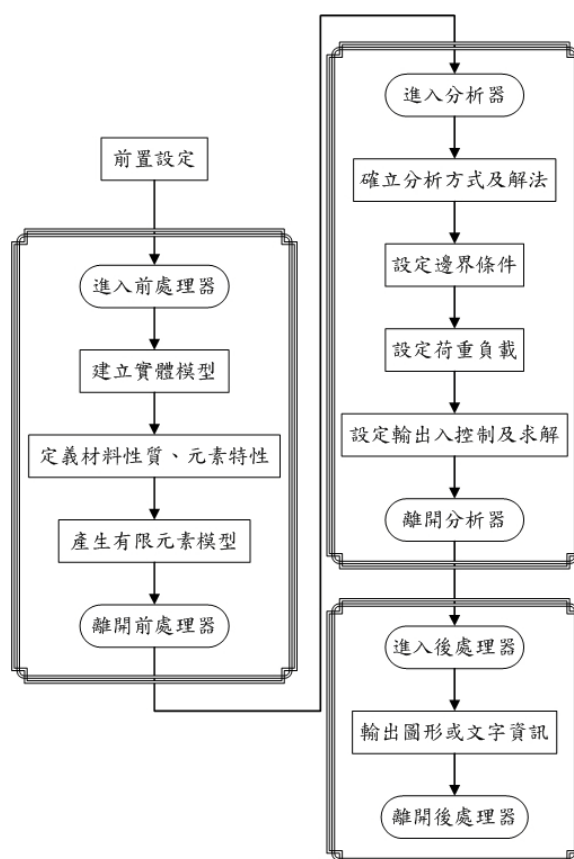


圖3.1 有限元素軟體之分析流程圖[21]

(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特定資料庫中，不同模組間可任意呼叫並修改幾何參數。
- c. 幾何模型轉換 (geometry translation)：可與 IGES 等標準檔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，主要是按照模具及工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：

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作為分析結果的呈現。

考慮到板液壓過程板件將發生大變形，在模擬過程中容易產生收斂性的問題，造成錯誤的結果與分析時間的耗費，因此本研究採用有限元素軟體 ABAQUS 進行有限元素分析。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，提供一非常直覺的介面，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，讓模擬結果更為準確及效率。

3.2 軟體介紹－ABAQUS

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。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，是一個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產生接觸問題為代表。



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。在求解器的部分，由於本研究之變形屬於非線性大變形問題，故在此將採用 ABAQUS/Explicit來進行求解，其高效處理接觸問題和其它非線性的能力使其成為求解許多非線性準靜態問題的有效工具，如製造過程（高溫金屬軋製、板金沖壓）和能量吸收裝置緩慢擠壓過程的模擬。而自我調整網格功能更使之能模擬大量的材料發生嚴重變形的問題，例如金屬成型的問題[22]。

3.3 有限元素模型之基本假設

本研究之有限元素分析，將建立在以下幾個基本假設之上進行設定：

- (1) 假設Ti/Al複合板材之接合面為完美接合，並視其為一均質且具異向性性質之彈塑性（elasto-plastic）材料。
- (2) 不考慮模具（包括：壓料板、下模具及沖頭）的變形，將其定義為剛體（rigid body）。
- (3) 不考慮液壓成形機台之機械耗功。
- (4) 液壓室壓力考慮為均壓作用於板件。
- (5) 不考慮液壓油洩漏問題所造成的液壓室壓力變化。

3.4 建立模型

3.4.1 取得模具幾何外型

本研究將以3C產品殼件—手機背蓋作為載具，由於其幾何外型較為複雜，因此沖頭與模具的設計也非一般常見之簡單幾何外型。在無法取得其原始設計圖檔的情況之下，針對沖頭及模具進行逆向工程（reversed engineering），即針對一現有工件利用3D數位化量測儀器

準確、快速的將輪廓座標量得，並加以建構曲面、編輯、修改後，傳至一般的CAD (computer-aided design) 軟體，繪製出其幾何外型(如圖3.2)。將CAD軟體所匯出的圖檔匯入ABAQUS，以建立模具各部件之模型，而後參照板液壓成形機台模具配置(如圖3.3)組合將之在一起。

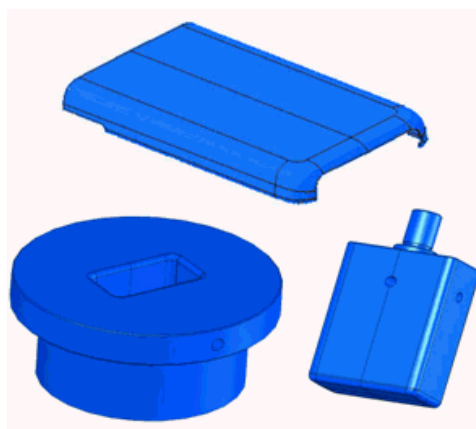


圖3.2 手機背蓋與其模具、沖頭幾何外型圖

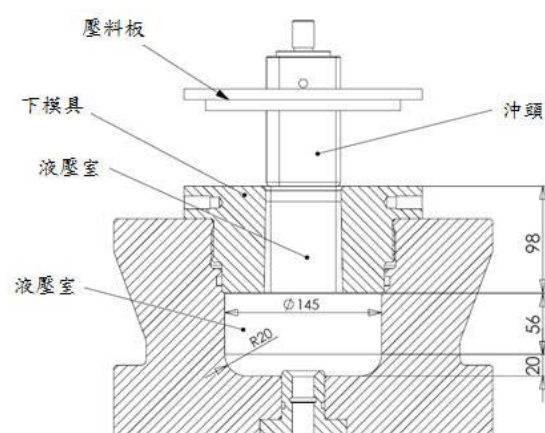


圖3.3 板液壓成形機台模具配置圖

實際上，本研究所使用的下模具模型已經過簡化。真實模具上有

一溝槽用來放置橡膠環（o-ring）以防止液壓油的洩漏（如圖3.4）。但是過於複雜的模型幾何外型往往會減低模擬分析時的效率，因此將合理簡化不會影響板件成形結果的部份。本研究首先建立了三種模型進行比較簡化之合理性，分別為：

- a. 有溝槽、有橡膠環
- b. 有溝槽、無橡膠環
- c. 無溝槽

假設橡膠材料為接近不可壓縮的彈性材料，彈性係數為1.08GPa、浦松比為0.475，比較在其餘參數皆相同的三種模型下，金屬板件成形後的有效應變分佈，如圖3.5~3.7所示，由結果可見，無論下模具上是否有建構溝槽或橡膠環，皆對其結果沒有明顯影響。因此本研究將採用最簡化，即為沒有建構溝槽的模型（C）進行模擬分析。

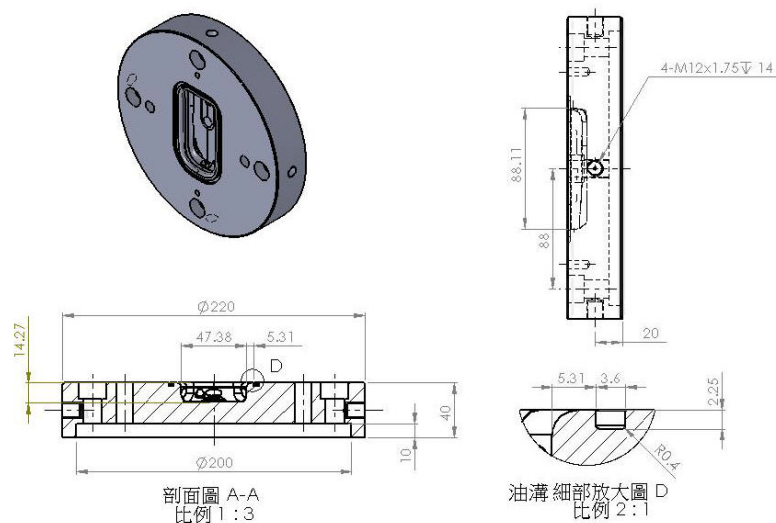


圖3.4 下模具上之溝槽尺寸圖

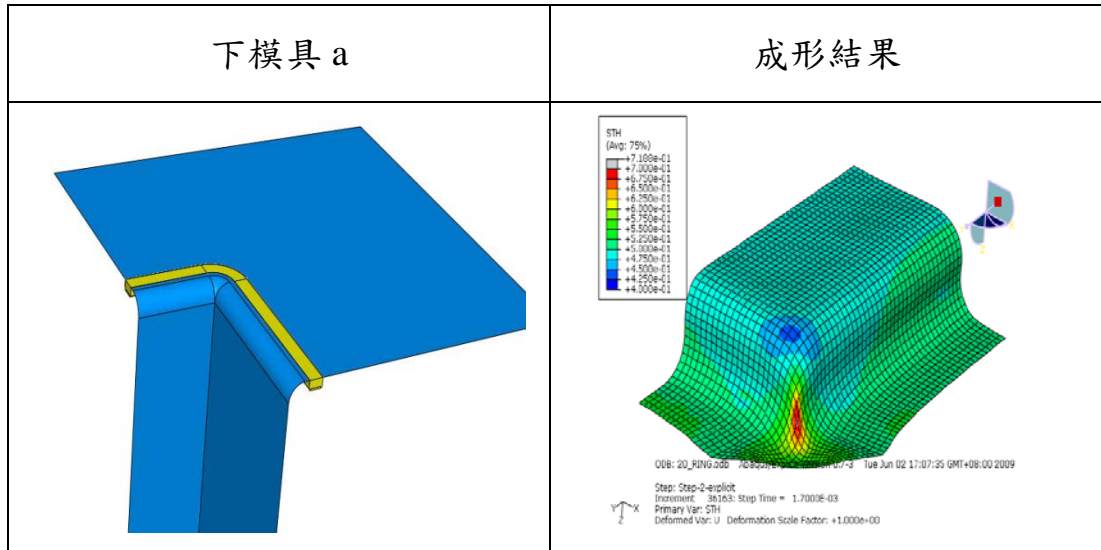


圖3.5 下模具a及其板件成形結果有效應變分佈圖

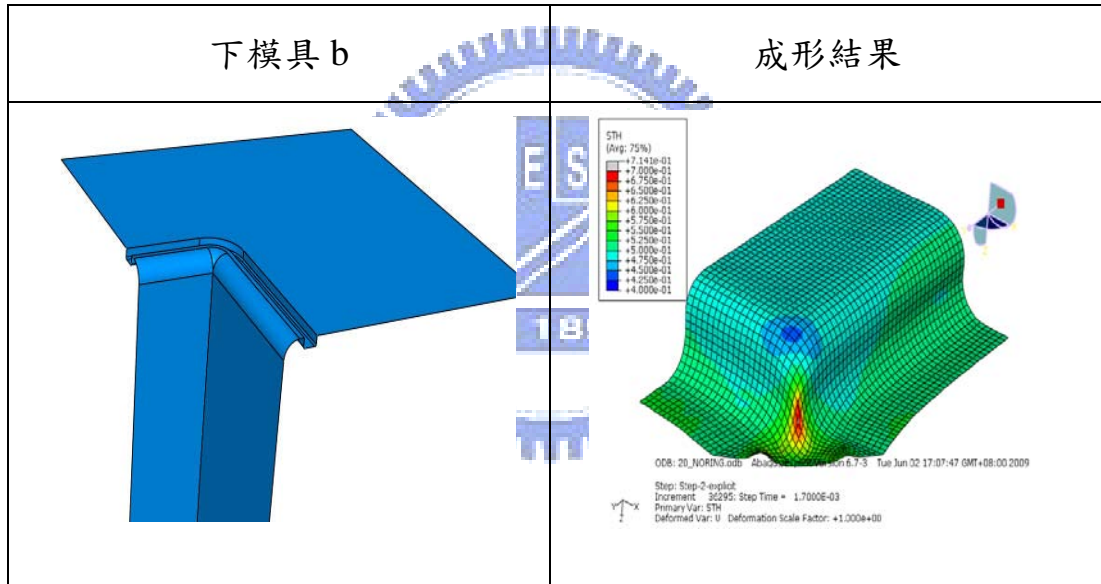


圖3.6 下模具b及其板件成形結果有效應變分佈圖

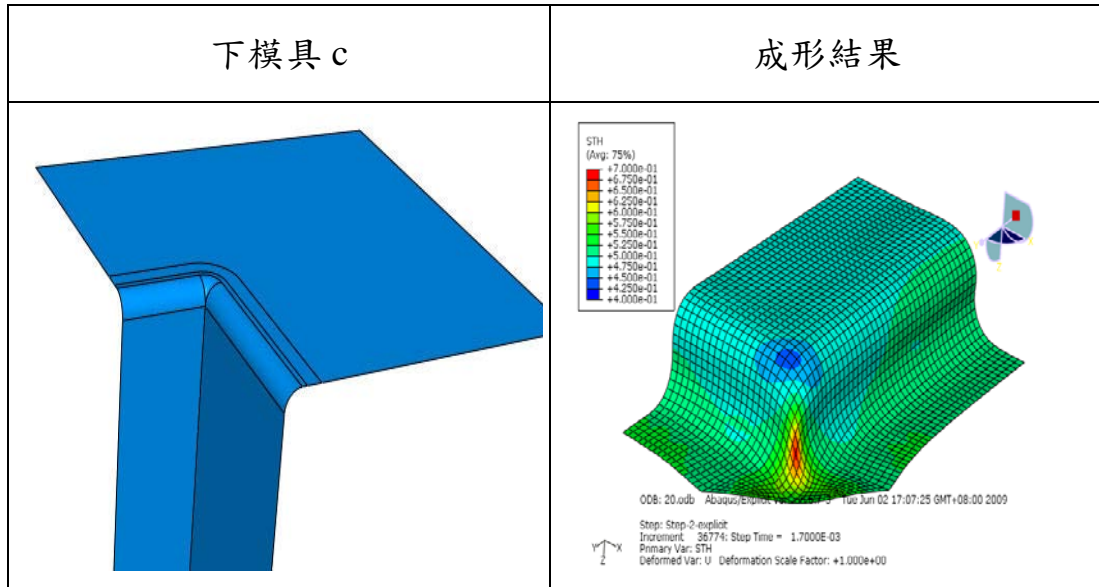


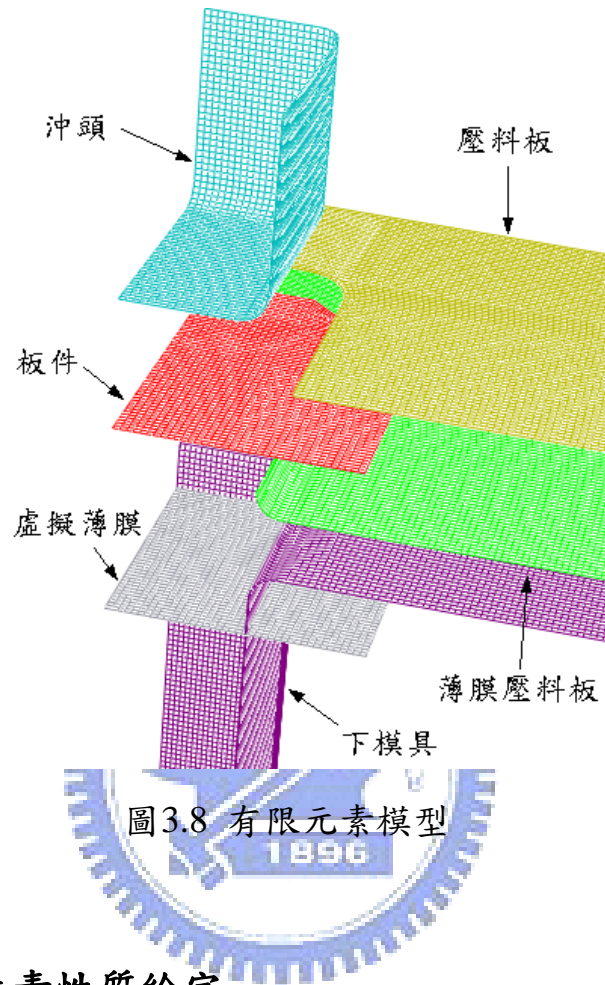
圖3.7 下模具c及其板件成形結果有效應變分佈圖

3.4.2 網格劃分

首先在分析前，必須先建立模具與複合金屬板件之有限元素模型，由於考慮的是三維外型，因此建構了三維的模型。由於本研究之板液壓模型本身具對稱性，故在模型建構時採用1/4對稱之模型，有限元素模型如圖3.8所示。

本研究使用了在厚度方向有5個積分點的殼元素 (shell element) 來進行模擬分析，用來模擬厚度遠小於其他方向尺寸，且沿厚度方向的應力可以忽略的結構。在金屬板件的部份，採用的是S4四邊形殼元素，其為一般目的 (general-purpose) 的殼元素，考慮了有限的膜應變 (大應變) 和任意大轉動，並且允許厚度隨著元素的變形而改變。而在剛體模具的部份則採用R3D4三維四邊型剛體元素，用來模擬三

維剛體的二維表面[23]。



3.4.3 材料及元素性質給定

利用第二章材料試驗所取得之機械性質帶入有限元素模型進行模擬，並定義材料為均質性。

3.4.4 接觸設定

由於本研究預期模擬液壓過程中板件受壓料板夾持之情況，故在邊界條件的設定中，需要分別定義各接觸物件之組合，分別為：

- a. 板件與壓料板
- b. 板件與沖頭
- c. 板件與下模具外部 (圖3.9)
- d. 板件與下模具內部 (圖3.9)

假設機台液壓油之密封性為完美密封，因此液壓油僅存在於下模具之橡膠環範圍內。摩擦係數設定將參照參考資料[6、9]進行設定：不存在液壓油之接觸面 (a、b、c) 設其庫倫摩擦係數為0.1，存在液壓油之接觸面 (d) 設其庫倫摩擦係數為0.05。

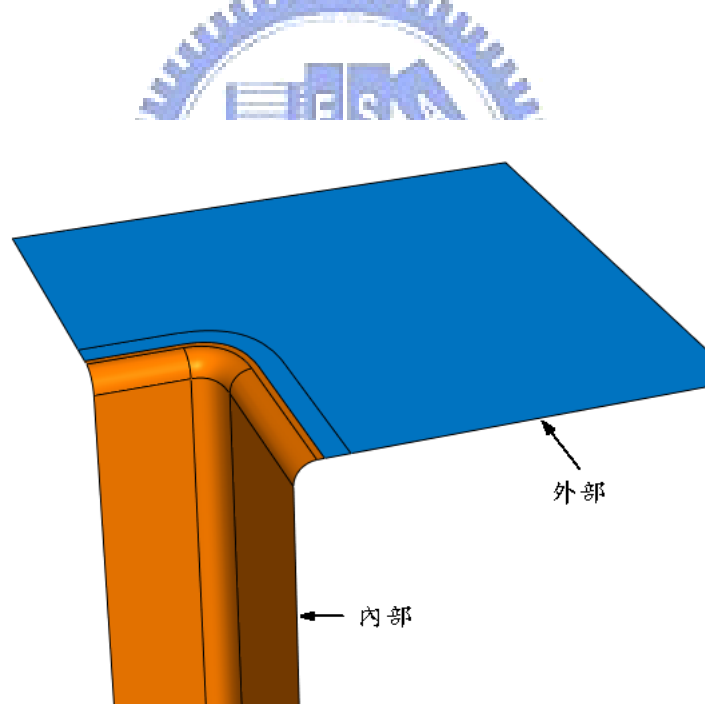


圖3.9 下模具之內、外部示意圖

3.4.5 邊界條件及分析設定

建構完有限元素模型、材料參數及接觸設定後，接續需要設定包

括：外力負載、分析步歷程及相關非線性疊代收斂設定等。板液壓成形製程如圖3.10所示，目前設定給予沖頭自接觸板件表面後向下位移13.5mm，並給定壓料板一作用力作為夾持試片之用。

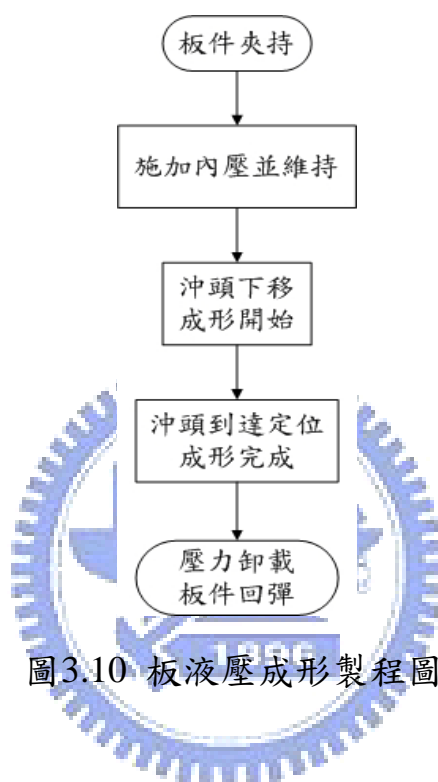


圖3.10 板液壓成形製程圖

一般文獻參考資料施加液壓力於板件的方式大多是以均壓施加於板件表面[24~26]，或是以均壓施於液壓腔開口處之板件，並向外線性遞減[27、28]。但在實際板液壓成形時，液壓室的壓力雖作用於板件上，卻會因為板件在成形過程中隨著沖頭下移而進入液壓室，其受到液壓力作用的面積因此而逐漸擴大。如圖3.11所示，當成形開始時，A點受到液壓室的壓力作用，而B點則無；而當沖頭下移後板件開始變形後，A、B點則皆會受到液壓室的壓力作用。

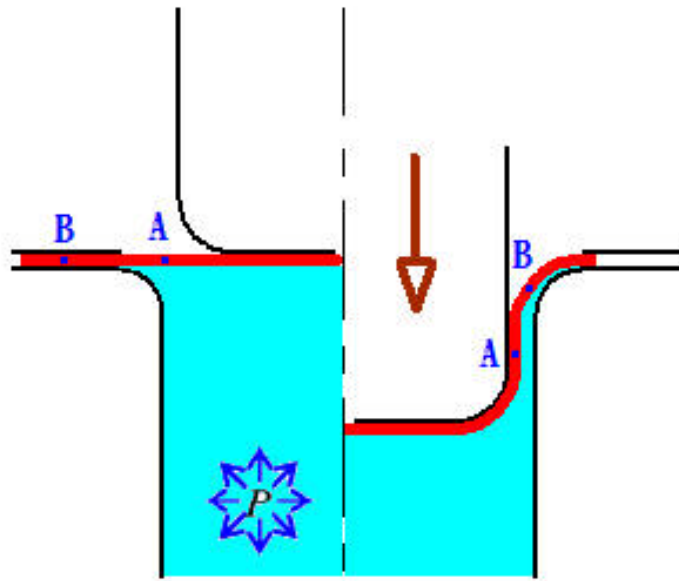


圖3.11 板液壓製程板件變形受力示意圖

因此，本研究將利用一虛擬薄膜作為液壓力的施加面，並建構一固定之薄膜壓料板以限制其變形範圍，避免液壓力過大時在其拘束邊界產生變形過大等數值問題。隨著沖頭下移、板件變形，薄膜將會跟著變形並貼附於板件表面，如此便可解決板件外型變化時壓力給定困難之問題。設此虛擬薄膜材料為彈性材料， E 值為 8GPa （ Ti/Al 複合板材之 E 值約為 87GPa ），厚度 0.01mm ，其與板件及模具間的接觸皆設為零摩擦。圖3.12為邊界條件施加示意圖。

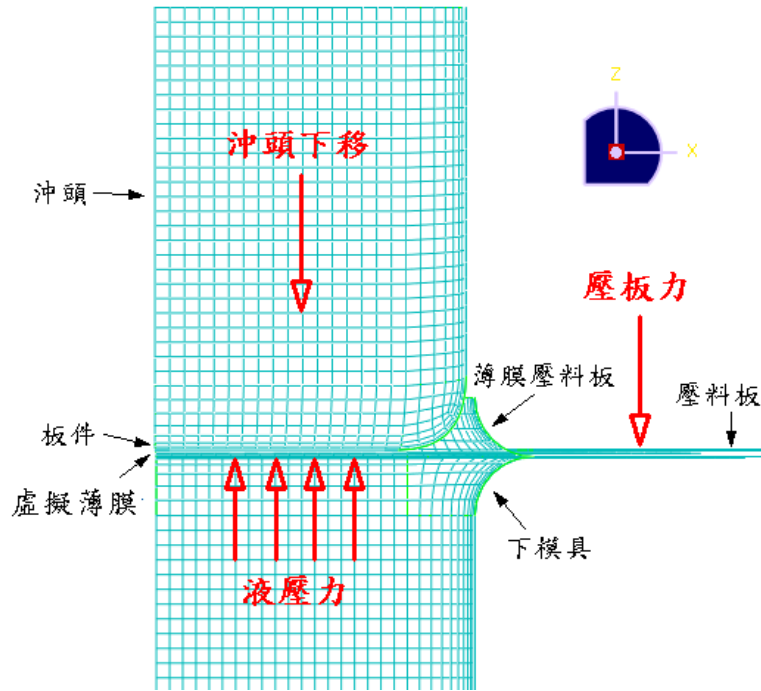


圖3.12 邊界條件設定示意

比較直接施加液壓力於板件表面與利用薄膜施加兩種方式，由結果可見（圖3.13），由於板件表面大於液壓室開口，因此若施加均壓於其上，則在板件邊緣受壓料板及下模具夾持之部位，會因為同樣受到液壓力的作用而造成壓板力不足、壓料板夾持不易的情況，在成行過程中板件會有翹起之現象。而若利用薄膜作為液壓力的施加面，則無此情況發生。因此本研究認為利用薄膜施加液壓力，在探討板液壓成形之各項製程參數重要性時，是一較佳的選擇。

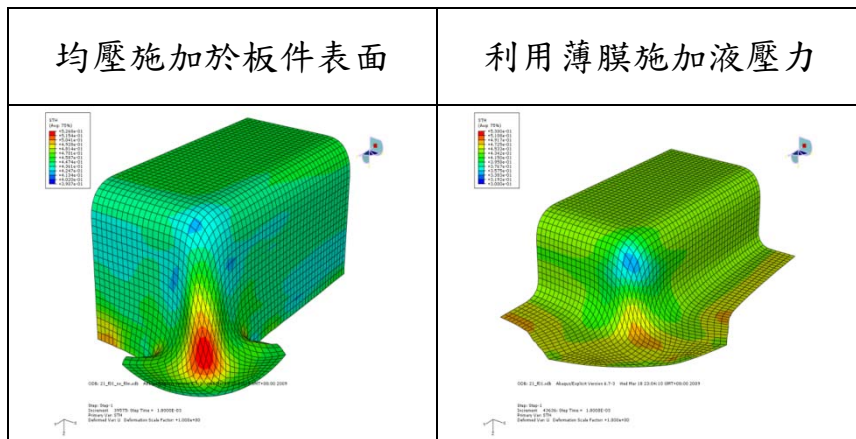


圖3.13 不同液壓力施加方式之成形結果厚度分佈圖

由於實驗機台的設計為利用洩壓閥控制液壓腔壓力，其原理為在板液壓成形的過程中，由於沖頭的下移液壓腔體積逐漸減小，使得液壓力逐漸上升，待達到設定的壓力時，洩壓閥即打開並開始洩漏，此後液壓力便保持定值。不過由於此機台設備較為老舊且會受到板件皺摺影響而在其他地方會發生液壓油的洩漏問題，因此可以由圖 3.14 看出，實際製程時，達到設定壓力之後，液壓油並非保持定值，而會有逐漸下滑的趨勢。

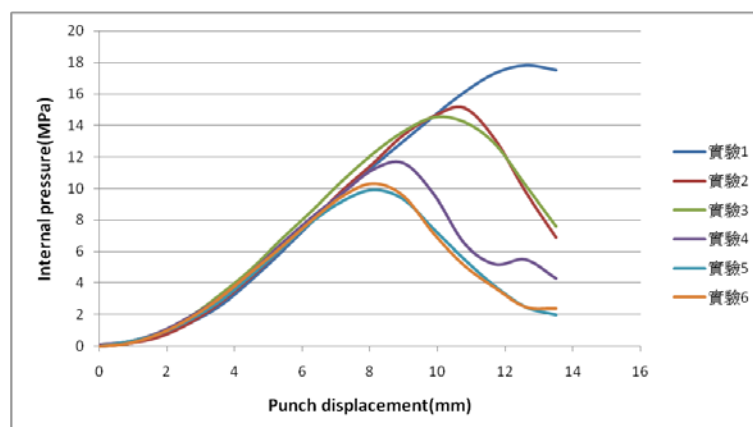


圖3.14 板液壓成形實驗液壓力歷程圖

不過在不考慮洩漏的條件下，為了使模擬時液壓力的上升歷程較接近實際板液壓製程的情況，本研究將實驗所得每次達到設定壓力前的壓力歷程平均，其方法為：在液壓力到達10MPa前，取全部六條實驗數據平均；12MPa前，取實驗數據1~4平均；15MPa前，取實驗數據1~3平均；18MPa則採用實驗1之數據。完整的平均數據如圖3.15所示，之後再利用一三次曲線趨近。後續模擬分析採用之液壓歷程，即採用此一壓力上升曲線，待壓力上升至設定值後則恆為定值。

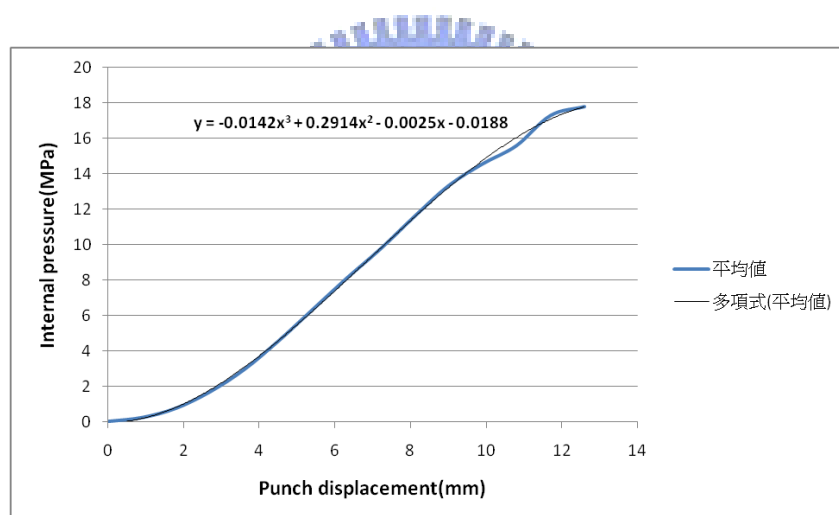


圖3.15 液壓力平均歷程及趨近曲線圖

由於本研究採用ABAQUS/Explicit進行模擬，將顯式動態過程應用於準靜態問題需要有一些特殊的考量。根據定義，由於一個靜態求解是一個長時間的求解過程，所以在其固有的時間尺度上模擬分析往往在計算上是不切合實際的，需要大量且小的時間增量。因此為了獲得更有效率的解答，必須採取一些方式加速問題的模擬分析[24]。在

靜態分析中，結構的基階模態通常控制著結構的響應，因此本研究將先求得板件的最低模態頻率及其週期（如圖3.16），用以決定得到適當的靜態響應所需要的時間（step time = $1/613.2 = 0.0016s$ ）。

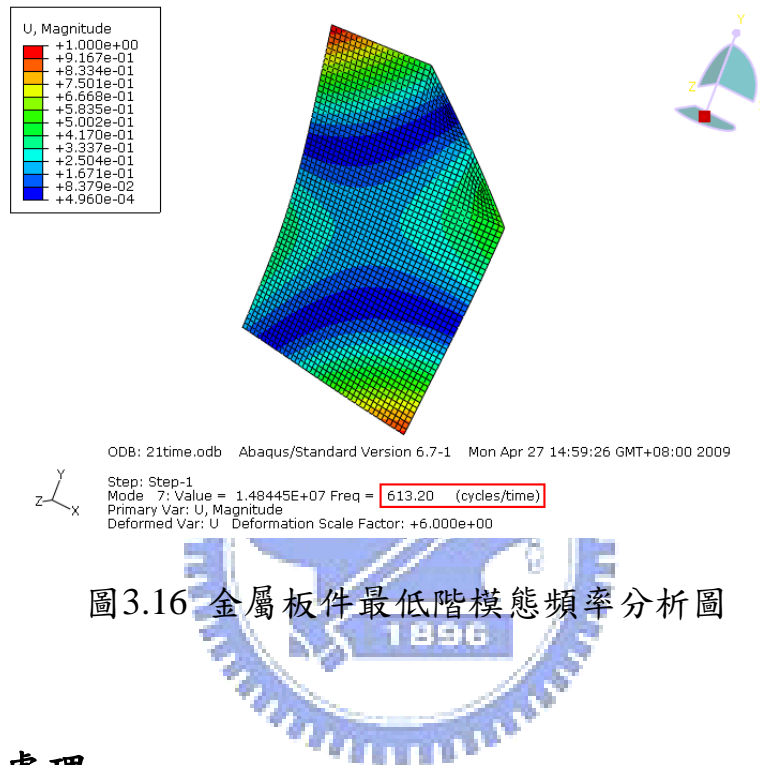


圖3.16 金屬板件最低階模態頻率分析圖

3.4.6 後處理

經由分析收斂結果，在後處理器中可以將程式運算結果，對於模具成形力、複合金屬變形量、材料應變及等效應力等數據，以圖形、曲線或表格的方式顯示。本研究主要將觀察局部區域板件厚度的變化情況，以了解板件在成形之後的厚度分佈，藉以了解金屬板件的成形品質，並利用模擬結果的金屬板件厚度分佈及沖頭反力與實驗結果相互比較，驗證模型的正確性。而由於本研究採用 ABAQUS/Explicit

來模擬分析，因此也關心在分析歷程中模型的動能及內能變化，用以評估模擬是否產生了正確的準靜態響應。分析結果將在 4.1 節實驗驗證中加以觀察，後續所有模擬結果也將同時關注其分析歷程中之動能與內能比。若分析為準靜態的，則其外力所做的功將幾乎等於系統內部的能量；而由於材料的速度很小，再加上以經忽略慣性力，因此動能也應該很小。

3.5 網格收斂性測試

由於有限元素法原理為將變形體的無限自由度利用網格的劃分，簡化為有限的自由度進行求解，因此若網格劃分的越細，元素數量越多，則模擬分析的結果將更準確，但也可能因此累積出數值誤差，且過多的網格往往將增加硬體的運算時間。所以為了兼顧模擬結果的準確性及效率，需要針對有限元素模型進行收斂性的測試。

測試結果如表 3.1 所示，可以發現網格邊長為 1mm 時所需的計算時間比網格邊長為 0.8mm 時快了 2.07 倍，而板件厚度誤差卻只有 1.7%。圖 3.17 為元素數目與板件厚度之關係圖。可以看到在網格邊長為 1mm 之後，量測到的板件厚度趨近一致。因此，為了有效的縮短計算時間並得到具足夠準確性的模擬結果，後續之有限元素模擬將採用網格邊長為 1mm 之網格尺寸進行模型之劃分。

表 3.1 網格收斂性測試結果

網格尺寸 (mm)	計算時間 (s)	板件厚度 (mm)
0.8	3579	0.3889
0.9	2404	0.3809
1	1731	0.3824
1.1	1403	0.357
1.2	900	0.3403

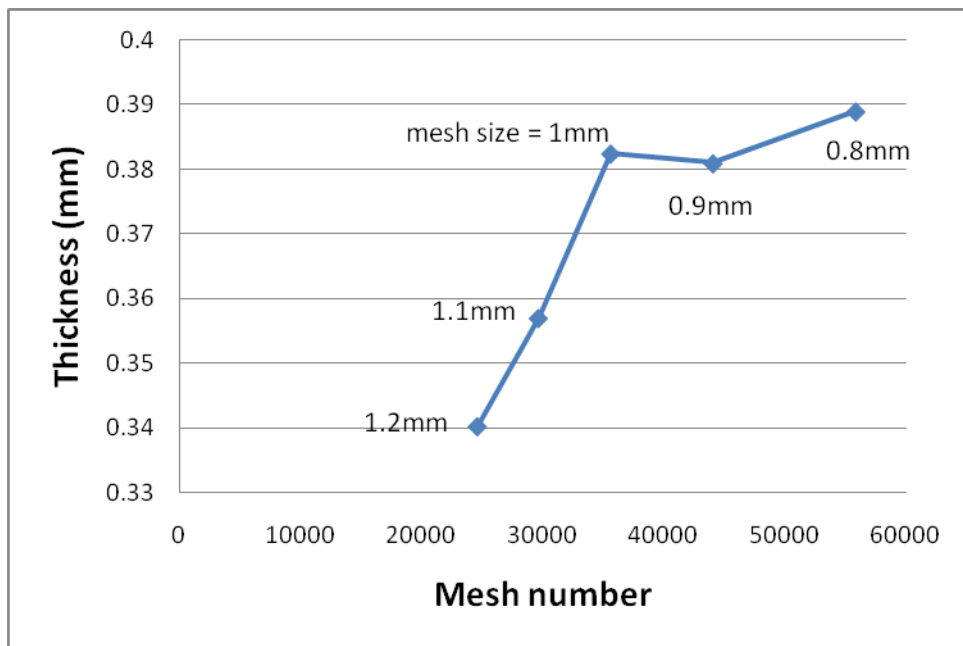


圖3.17 元素數目與板件厚度之關係圖

第四章 板液壓成形實驗與模擬

由於在板液壓成形製程中，製程參數對於成形效率及成形品質影響相當大，然而對於增進板件成形性而言，主要方法在於改善金屬板件在成形時的流動性，因此本章將針對幾項可能影響板件流動性的製程參數分別進行調整，並深入探討其對於 Ti/Al 板件成形性所造成的影響，同時也利用板液壓實驗探討 Ti/Al 複合板件相較於 Ti 單一板材是否更加適用於板液壓成形以製造 3C 產品殼件。

4.1 實驗驗證



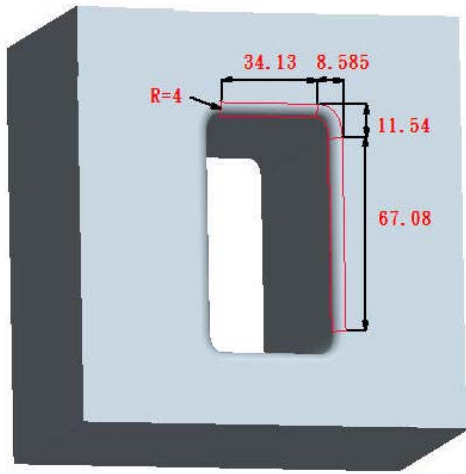
本章節將藉由有限元素軟體 ABAQUS 所模擬之結果與板液壓之實驗結果相互比較，驗證有限元素軟體 ABAQUS 模擬板液壓成形結果之可靠性。

金屬中心所提供之板液壓實驗設備（由日本 Amino 公司生產）及手機電池背蓋之模具、板件尺寸如圖 4.1、4.2 所示，由於此模具及沖頭的設計為了 3C 殼件--手機背蓋而設計，因此在圓角的部份幾何形狀較為複雜，模具上的圓角是以雲形線（spline）所組成，而沖頭上的圓角則是由雙重曲面所混成（blend）而成。此外，板件的初始厚度為 0.45mm，且在四個角落以 45° 截角，截角邊長（chamfering

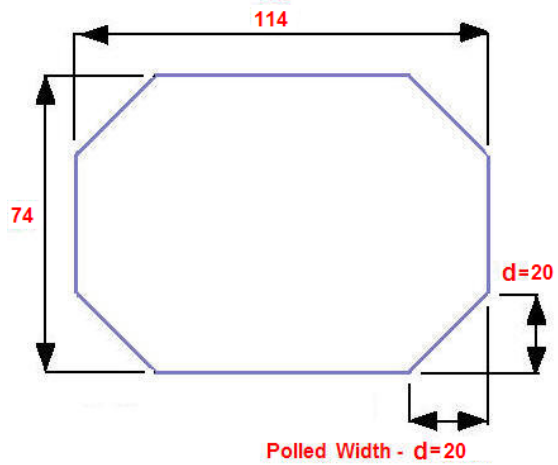
width) 為 20mm，下模具與沖頭的間距 (如圖 4.3) 為 0.6mm，所選用的材料是 Ti/Al 複合金屬板材，沖頭自接觸板件表面後向下位移 13.5mm，壓板力 2 噸、液壓力 20MPa，歷程如圖 4.4 所示，板液壓實驗的板件成形結果如圖 4.5 所示，依據標示的位置測量其厚度分佈。



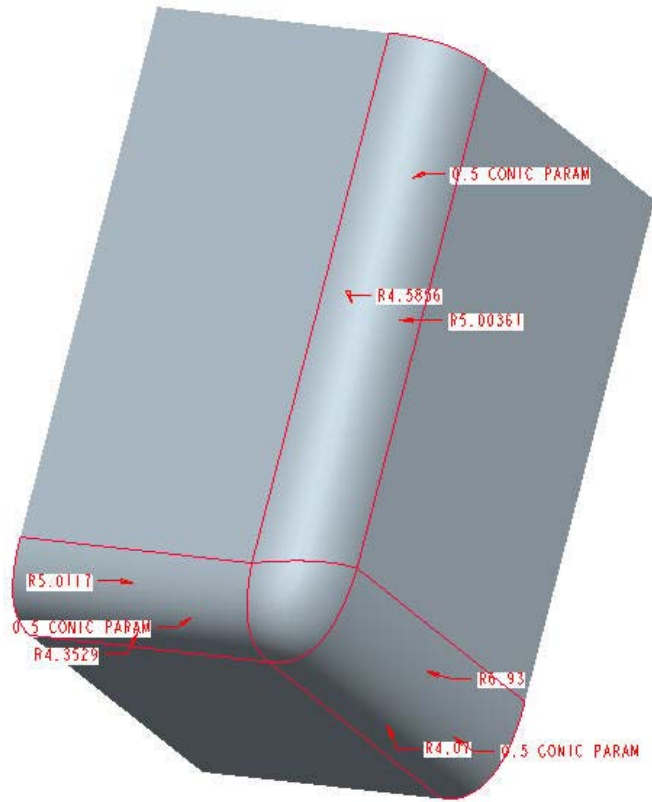
圖4.1 板液壓成形實驗設備



(a) 下模具



(b) 板件



(c) 1/4 對稱之沖頭

圖4.2 板液壓成形實驗模具與金屬板件之尺寸圖

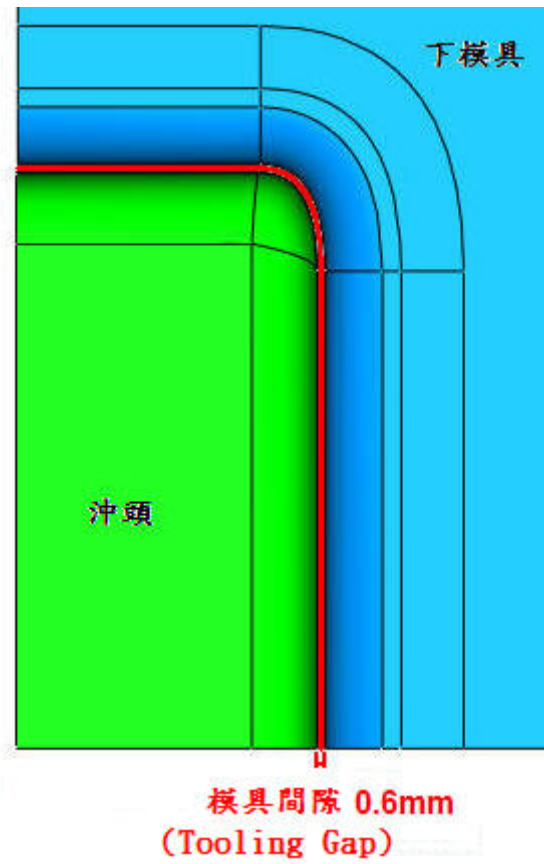


圖4.3 下模具與沖頭間隙示意圖

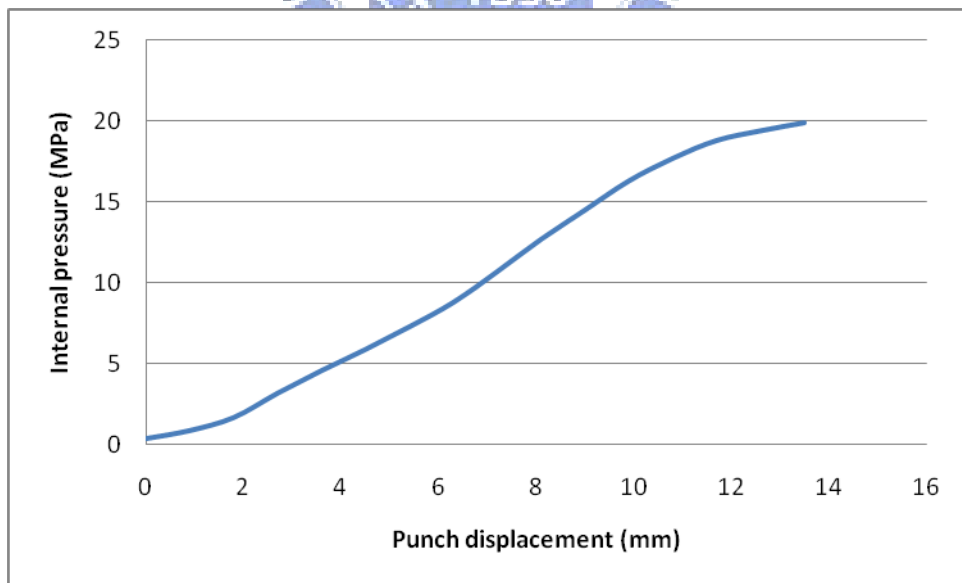


圖4.4 板液壓成形實驗液壓力歷程圖

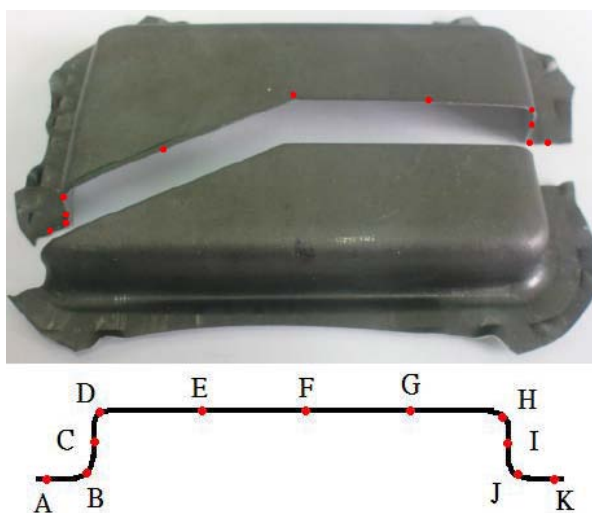


圖4.5 板件成形結果

將上述實驗製程參數帶入有限元素模型中進行模擬分析，實驗與模擬結果厚度分佈比較如圖 4.6 所示、沖頭反力比較如圖 4.7 所示，由以上結果可見，本研究所建構之有限元素模型已具有一定之可信度。此外，分析過程中的動能與內能（圖 4.8）也符合準靜態解的要求。

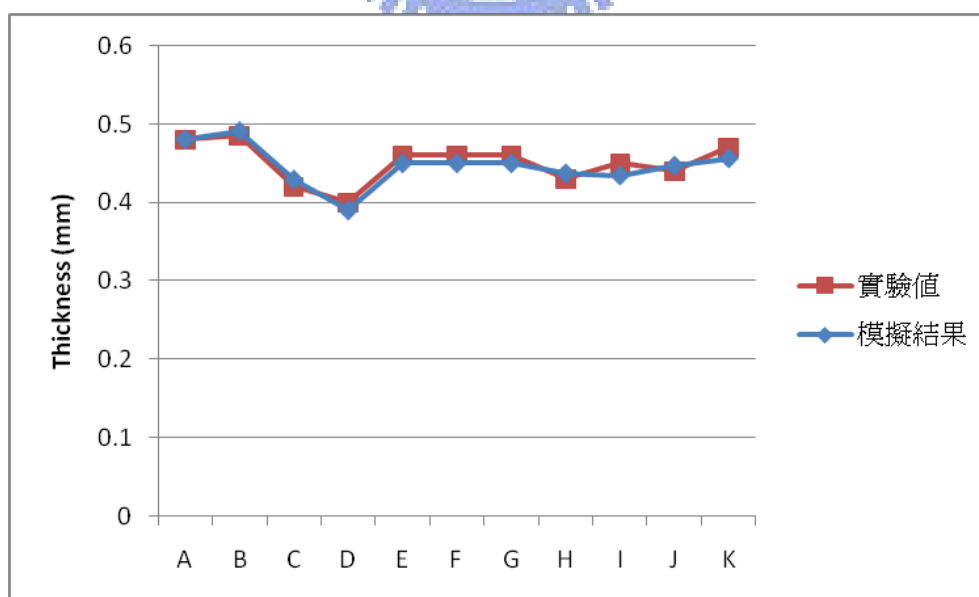


圖4.6 實驗與模擬結果厚度分佈比較圖

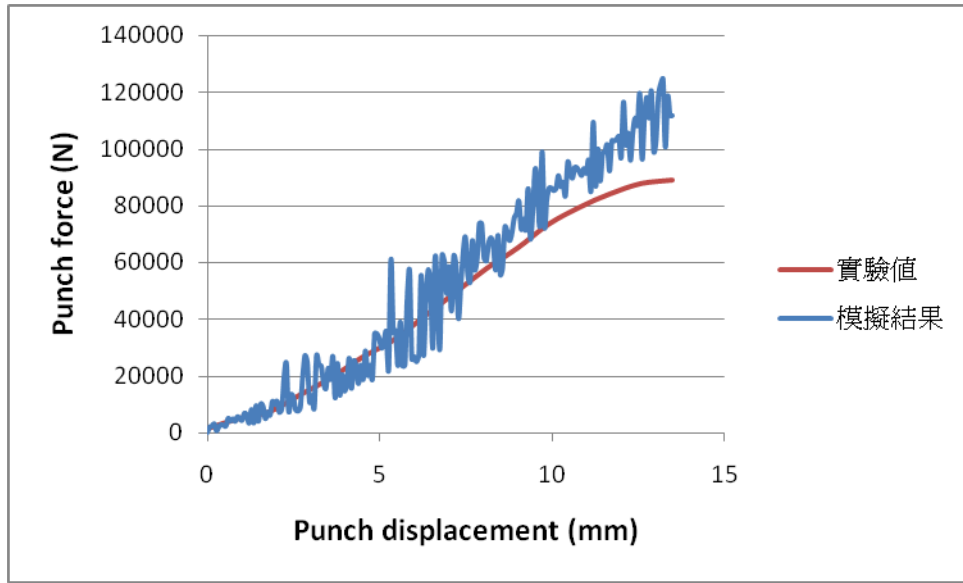


圖4.7 實驗與模擬結果沖頭反力比較圖

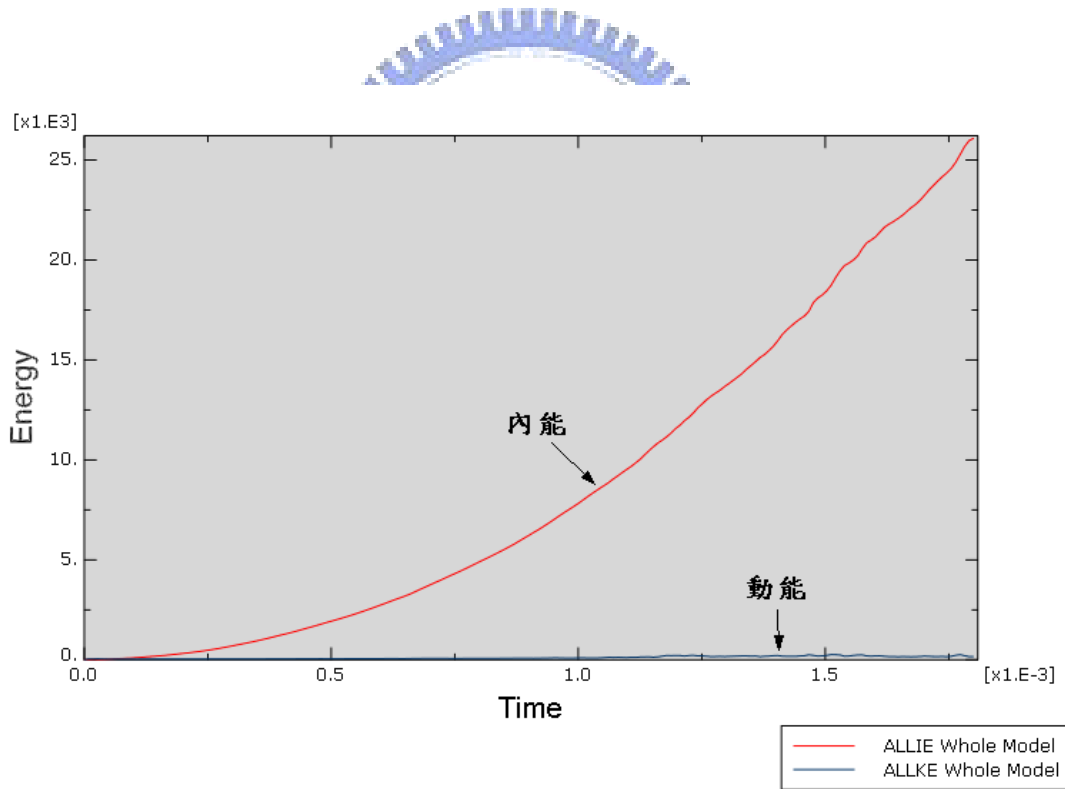


圖4.8 分析歷程中之動能與內能變化圖

4.2 有限元素模擬

在本研究中，預先選用一組合理的製程參數作為參考（金屬中心提供），之後再搭配不同的參數變動來進行分析，製程參數整理如表 4.1，用以深入探討各種不同的製程參數在板液壓成形過程中，對板件成形性的影響及其重要性。板件成形性好壞與否將藉由觀察其局部減薄率（thinning）作為判斷依據，其計算方式如式 4.1。

$$\text{Thinning} = \frac{T_1 - T_0}{T_0} \times 100\% \quad (4.1)$$

其中， T_1 ：成形後板件厚度、 T_0 ：成形前板件厚度

表 4.1 製程參數設定

Parameters of forming process	Original value	Varied values
Holding force – F (ton)	2	0.25 , 1 , 3
Internal pressure – P (MPa)	10	5 , 15 , 18
Tooling gap – D (mm)	0.6	0.3 , 0.45 , 0.8
Polled width – d (mm) (Blank Size)	21.21(120×80)	20(114×74) , 23(120×80) , 25(120×80)

4.2.1 摩擦係數的影響

金屬成形過程中，板料與模具間的摩擦行為，往往直接影響到產品成形的好壞，對於板液壓成形而言，沖頭、壓料板、下模具與板件之間的摩擦係數，自然也是相當重要的參數，直接關係著板料的流動

性。一般認為，過大的摩擦力將會阻礙材料的流動，使其產生破裂；過小的摩擦力則會使得過多的材料流入模具中，進而產生皺摺。但摩擦係數的大小受到許多因素的影響，包括：模具與板件之表面粗度、材料的選擇、磨潤情況...等[29]，且不易經由實驗量測。

由於本研究所使用之材料為 Ti/Al 複合板材，其上下兩面分別與模具接觸之材料不同，其與模具間的摩擦情況也可能因此而有所不同。在此本研究將利用有限元素模擬的方式，在假設有液壓油存在於板件與模具間時，其摩擦係數為 0.05 的情況下，探討不同接觸對間（圖 4.9）其摩擦係數對於板件成形性的影響。摩擦係數設定整理如表 4.2。

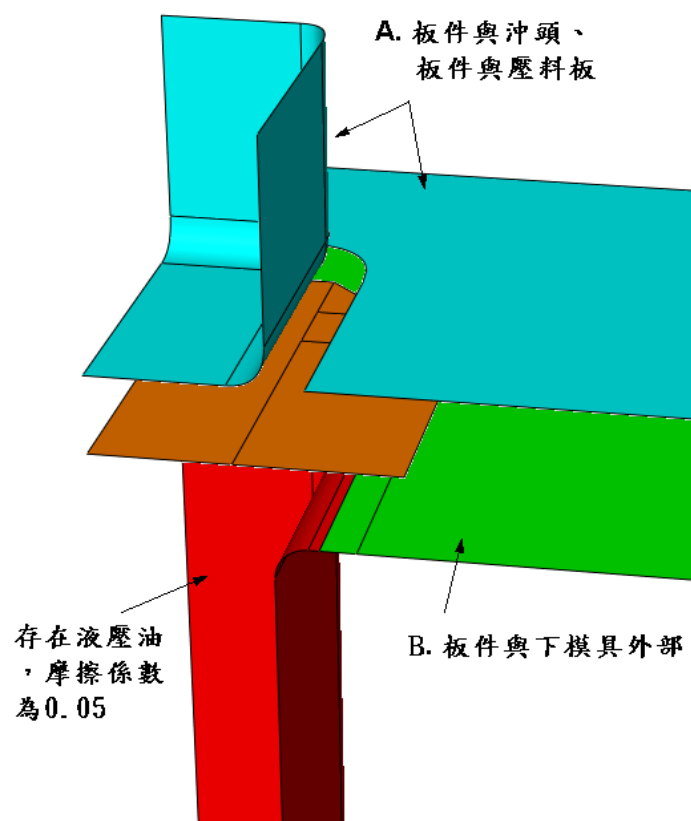


圖4.9 改變摩擦係數之接觸對示意圖

表 4.2 摩擦係數設定

	接觸對 A	接觸對 B
第一組	0.1	0.05、0.1、0.2
第二組	0.05、0.1、0.2	0.1

第一組摩擦係數設定模擬結果如圖 4.10、4.11 所示，可以看到當板件與下模具外部間之摩擦係數變大時，由於摩擦力變大而因此阻礙了材料的流動，使得板件有薄化的趨勢，但此情況並不十分顯著。而第二組摩擦係數設定的模擬結果則如圖 4.12、4.13 所示，可以看到在板件與沖頭、板件與壓料板間之摩擦係數變大時，在板件 C、D 兩點的薄化趨勢正好相反，與參考資料[30]有相同之結果，推測其原因為在板件與沖頭間的摩擦係數較大時，因為液壓力的作用，使其摩擦力較大，造成板件與沖頭間的滑移量較小（圖 4.14），因此在 D 點處（沖頭圓角處）減薄的趨勢將會減緩，同時也可以幫助料片隨著沖頭的下移進到液壓室。但由於板件與壓料板間的摩擦力也因為摩擦係數增大而變大，造成材料的流動困難（圖 4.15），使得在 C 點處（板件側壁處）之減薄情況增劇。由此可見，適當的選擇與不同模具接觸面之材料及摩擦情況，可以有效的幫助改善板件的成形結果。

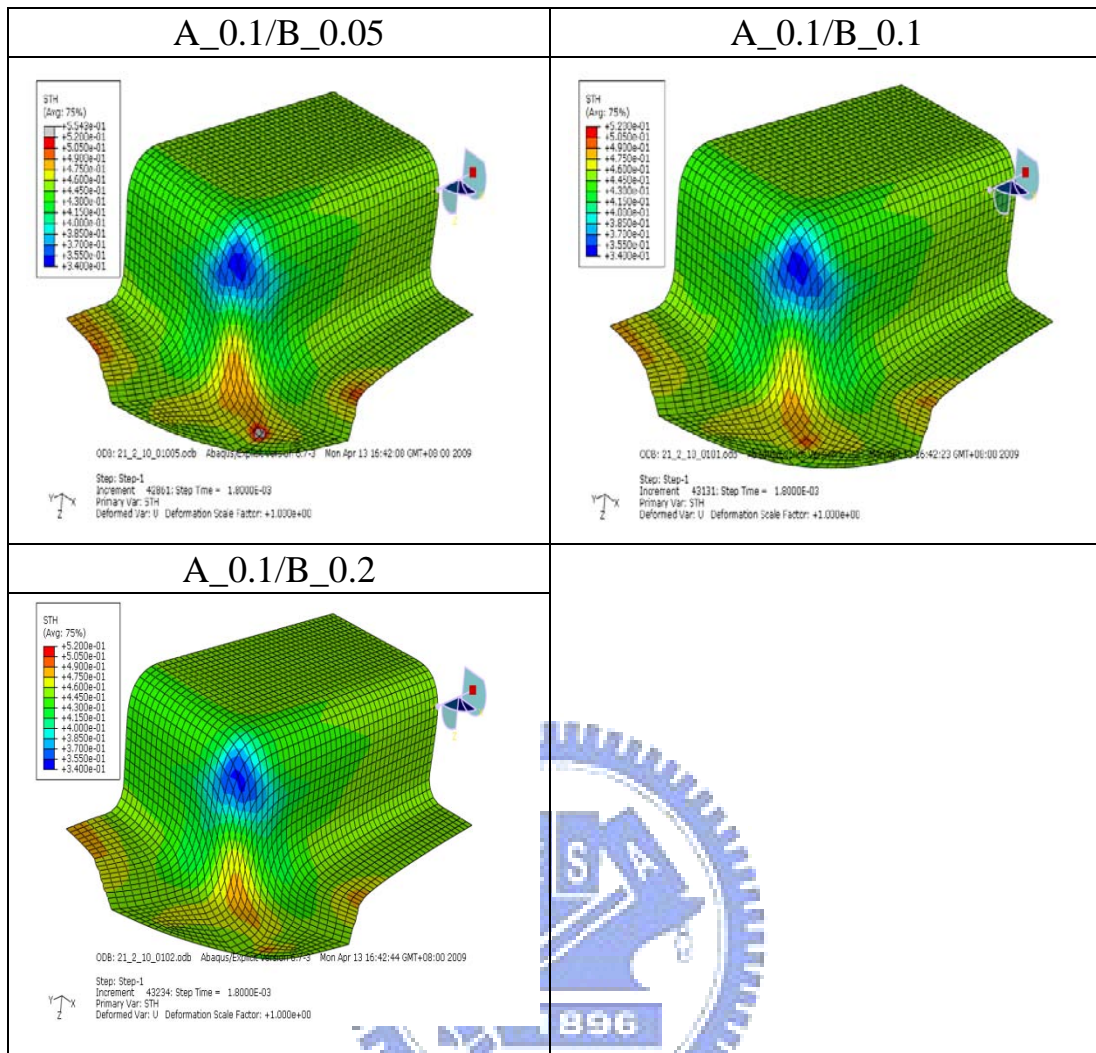


圖4.10 第一組摩擦係數設定之板件厚度分佈圖

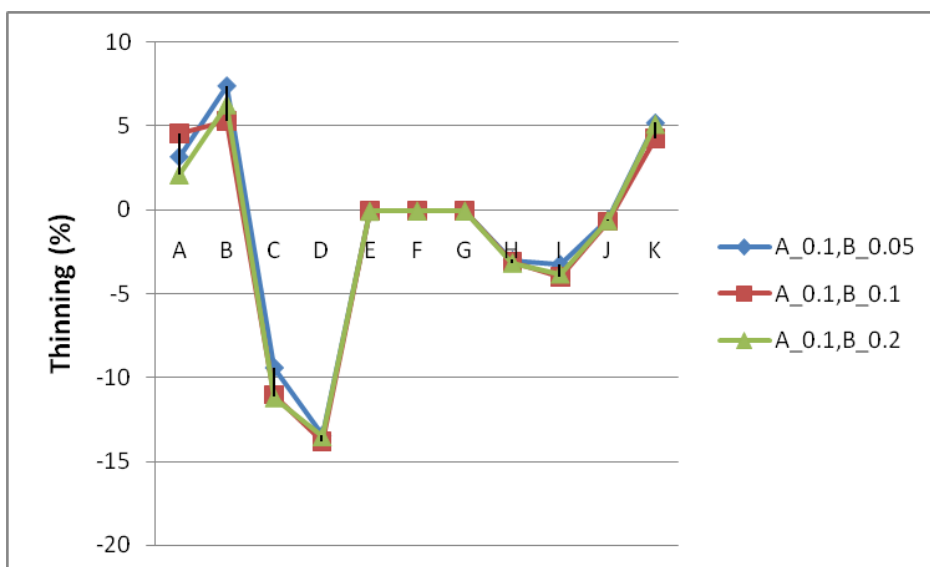


圖4.11 第一組摩擦係數設定之板件減薄率

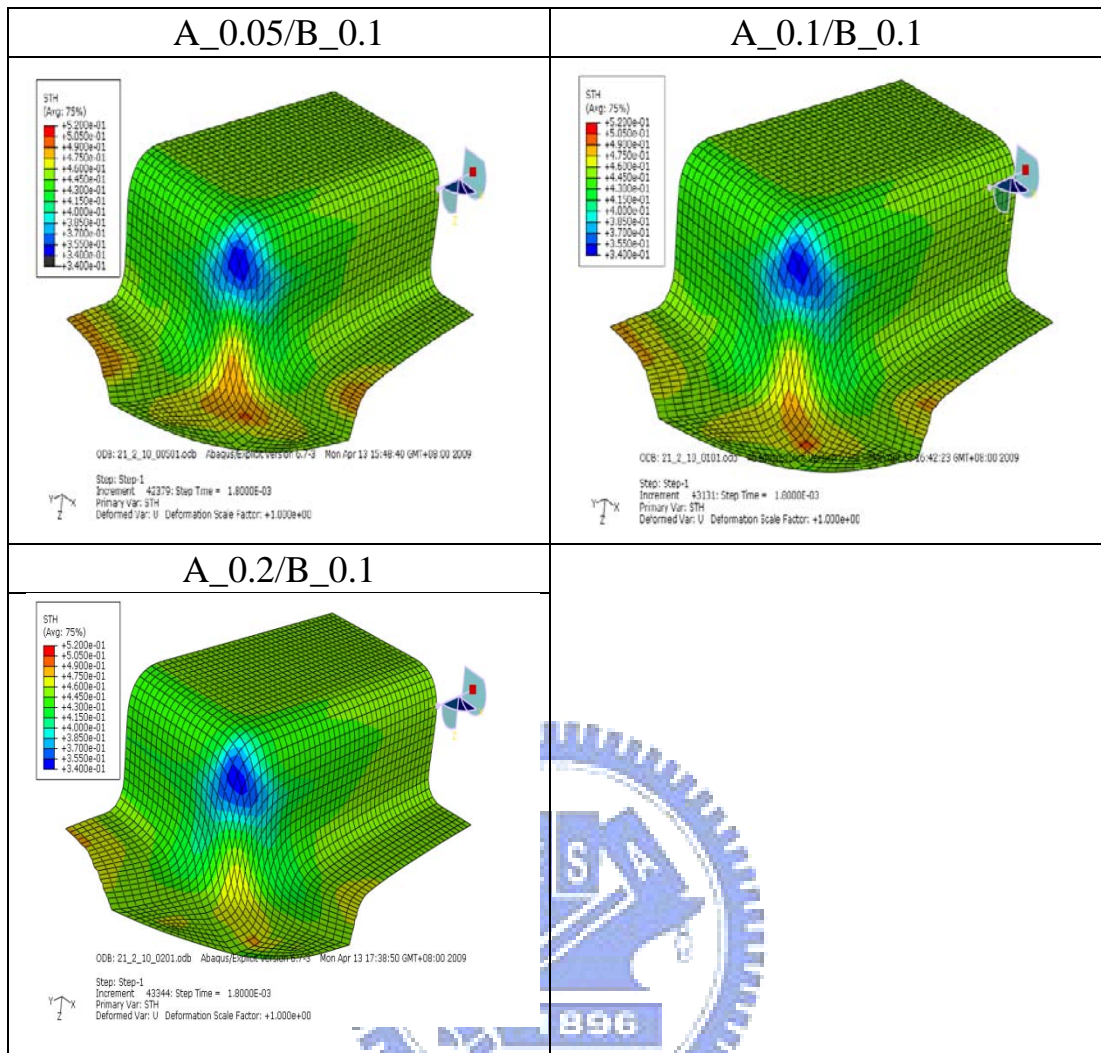


圖4.12 第二組摩擦係數設定之板件厚度分佈圖

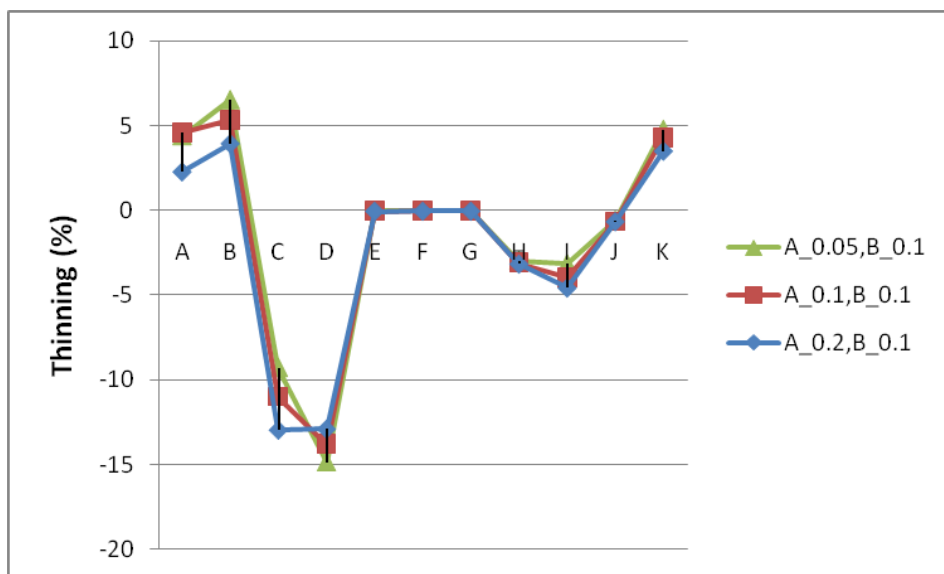


圖4.13 第二組摩擦係數設定之板件減薄率

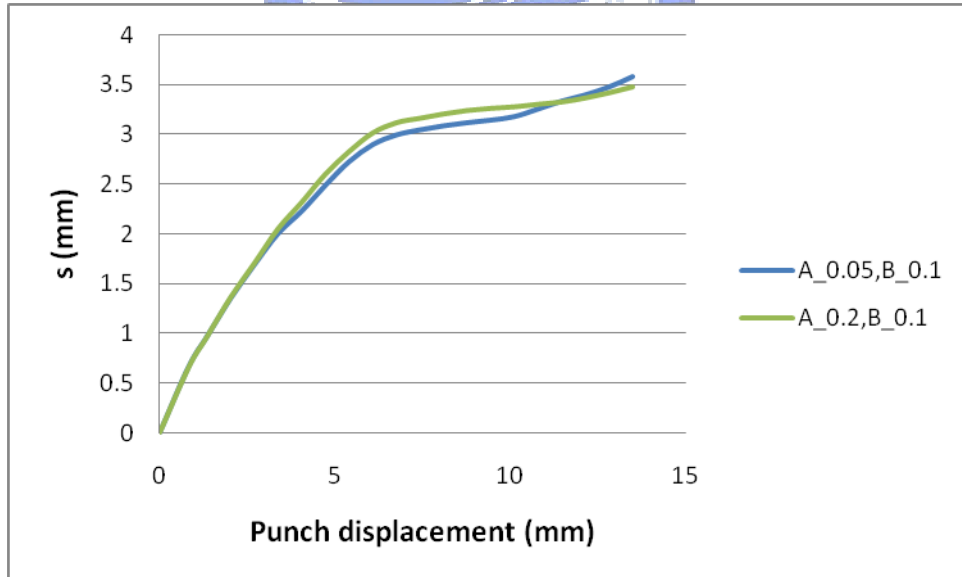
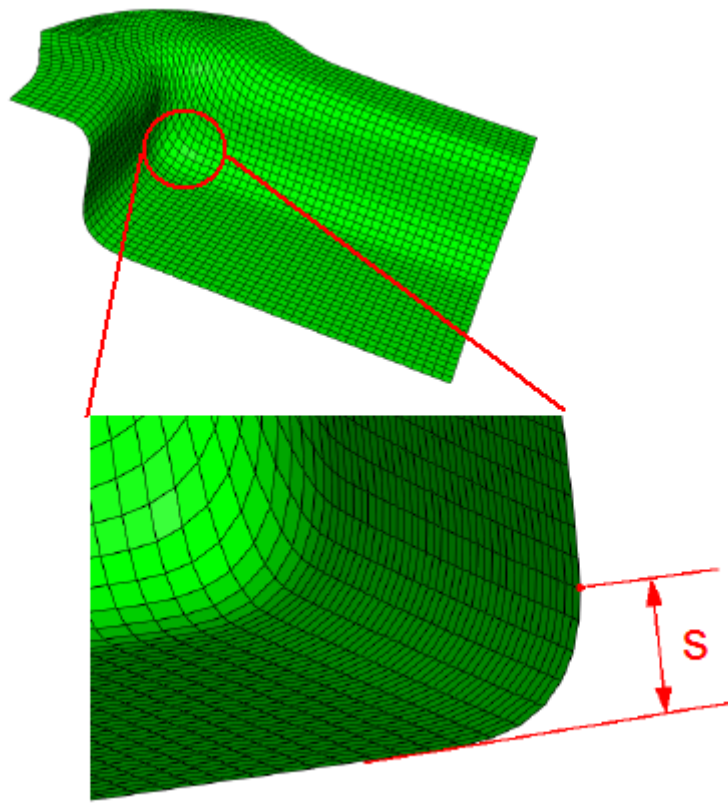


圖4.14 D點處板件滑移量

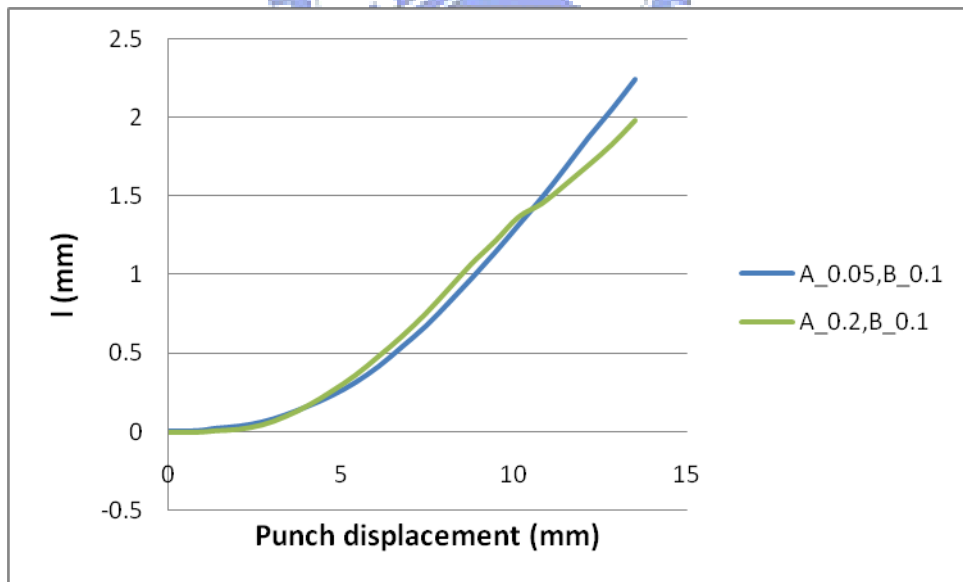
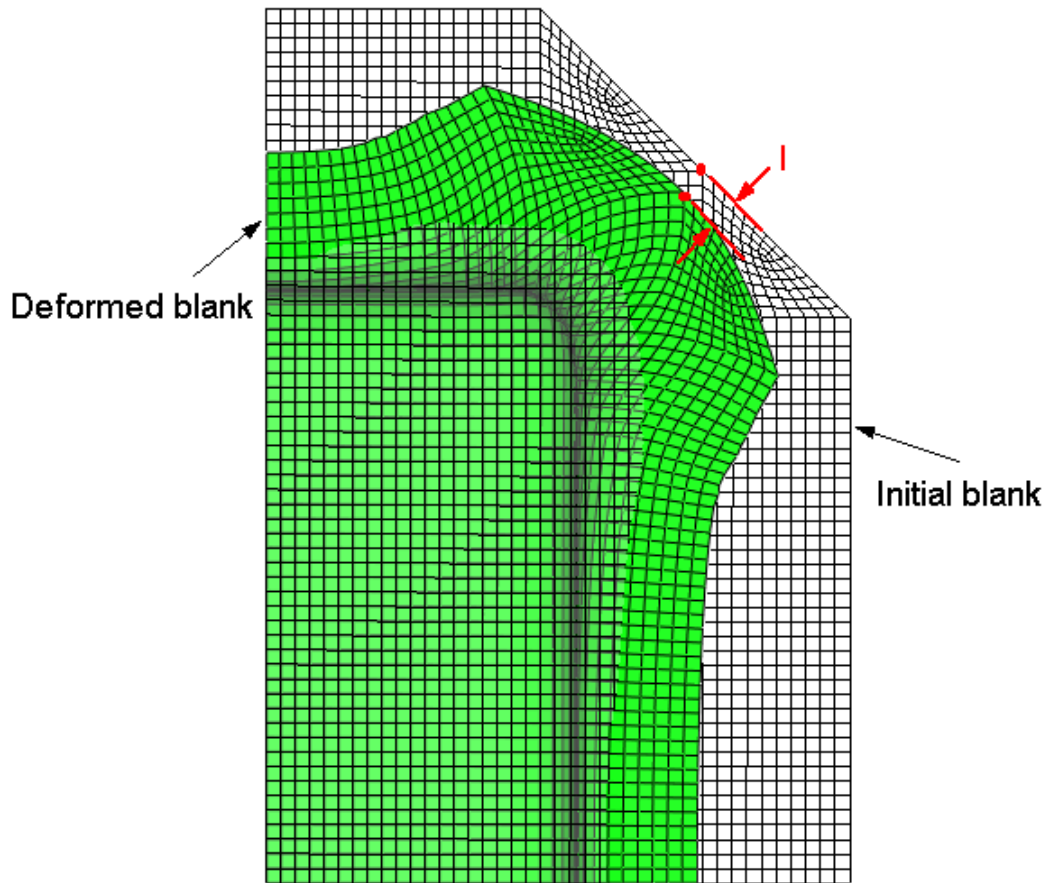


圖4.15 C點處板件滑移量

4.2.2 液壓力的影響

板液壓成形主要目的是為了藉由給予板件一適當的液壓室合模壓力，使得板件成形後的外型更貼合於沖頭的幾何外型及尺寸，同時此一壓力加上板件與沖頭間的摩擦力，還可以幫助板件流動進入液壓室，並透過液壓油使得板件表面不與下模具直接的接觸，降低其間的摩擦，進而得到更好的成形效益。因此選用過小的液壓力將無法達到上述目的。但當採用過大的液壓力時，除了造成液壓室密封性的降低與密封的難度外，也會提高沖頭在成形過程中的負載。因此，在本章節中將會探討不同的液壓力對最終板件成形結果的影響，以作為如何選擇適當的液壓力之參考，參數設定亦如表 4.1 所示，液壓力歷程如圖 4.16 所示。模擬結果如圖 4.17、4.18 所示。

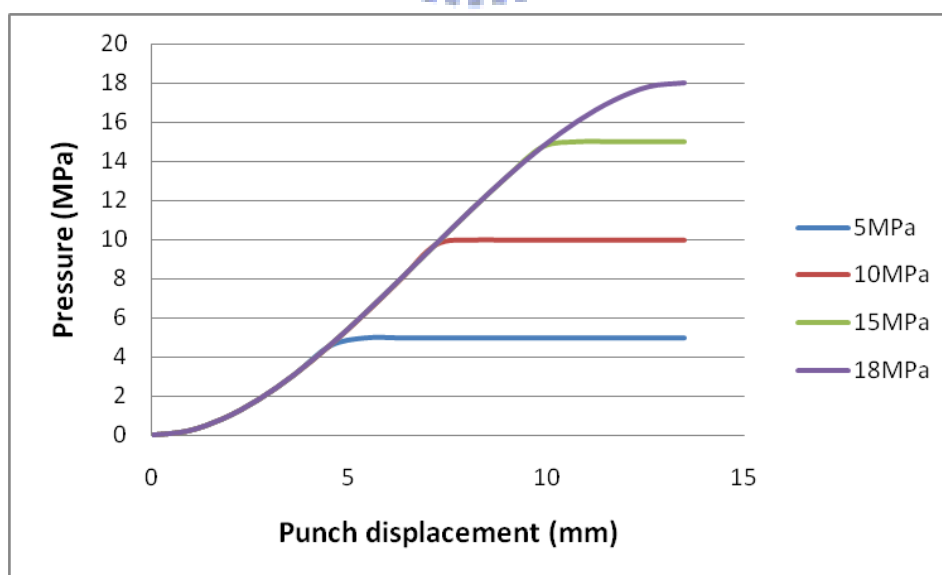


圖4.16 液壓力施加歷程

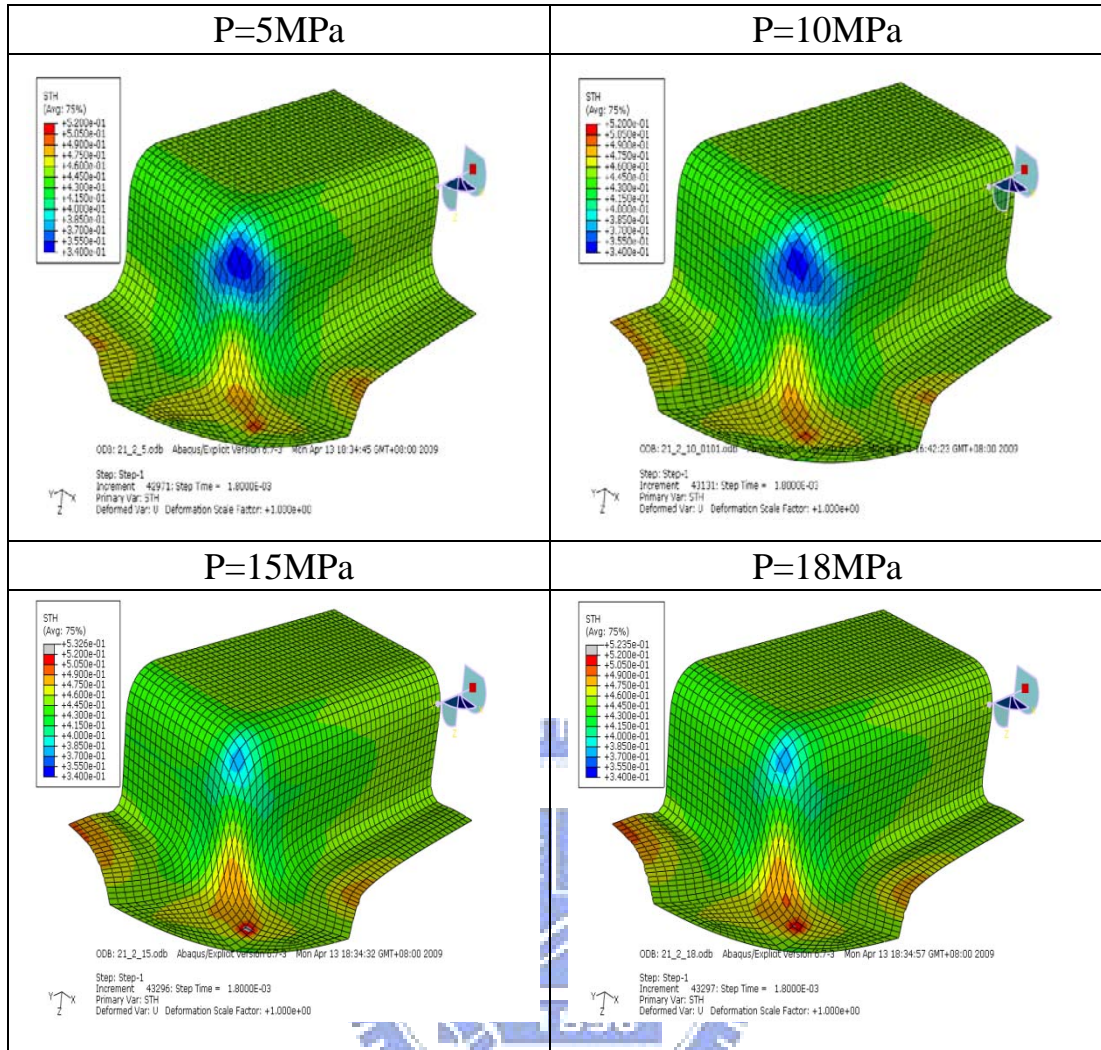


圖4.17 不同液壓力之板件厚度分佈圖

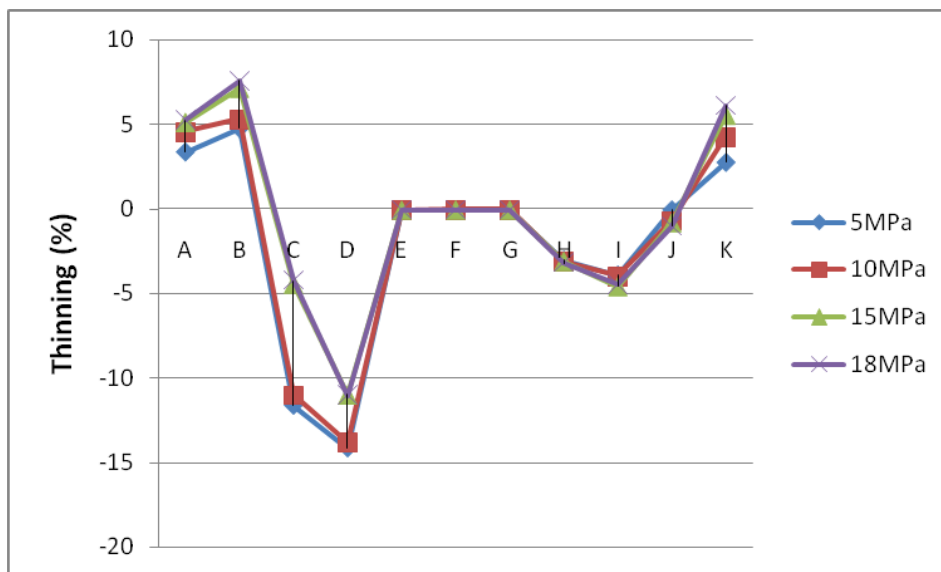


圖4.18 不同液壓力之板件減薄率

由圖可見，板件的薄化現象明顯的隨著液壓力的上升而趨減緩，且在液壓力 5、10MPa 及 15、18MPa 時，幾乎分別有相同的厚度分佈。為了確認液壓力大小對於板件成形性的影響趨勢，本研究再模擬了液壓力 11~14MPa 時之板液壓成形，其液壓力歷程如圖 4.19 所示。由結果可見（圖 4.20），板件的成形性的確隨著液壓力的增加而有改善的趨勢。

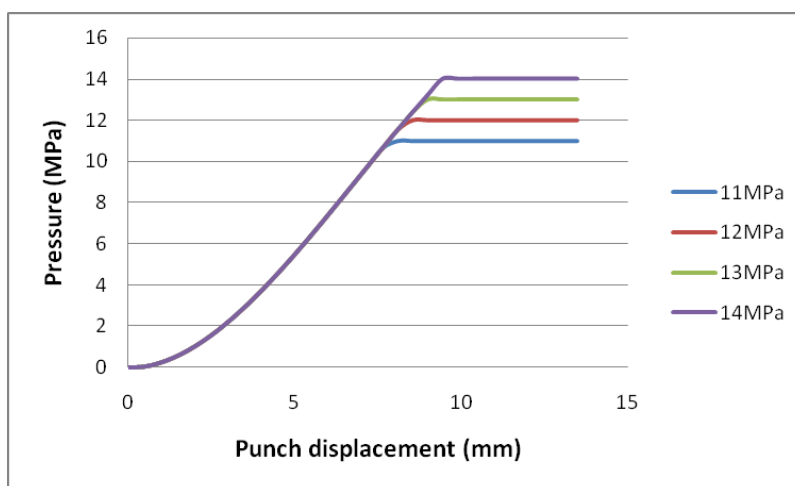


圖4.19 液壓力施加歷程

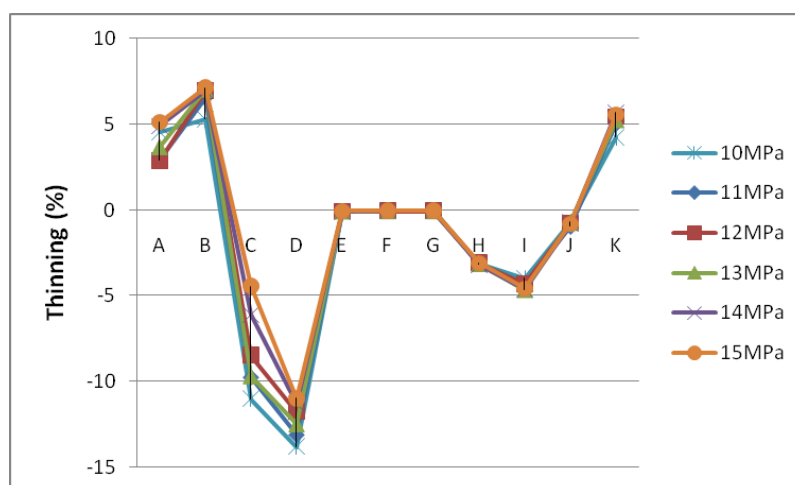


圖4.20 不同液壓力之板件減薄率

搭配上一章節之結論可以推得，在相同的沖頭行程下，由於液壓力大小的不同（如圖 4.21），使得板件在成形過程中更易於貼附於沖頭表面，隨著沖頭的下移流動進入到液壓室中，證實液壓力的確對於板件的流動性有一定的幫助。此外，模擬結果顯示其對於板件成形性的影響在 10~15MPa 間較為顯著，因此本研究認為採用 15MPa 作為成形參數是較佳的選擇，可以在較低的沖頭負載下得到較佳的板件成形性。

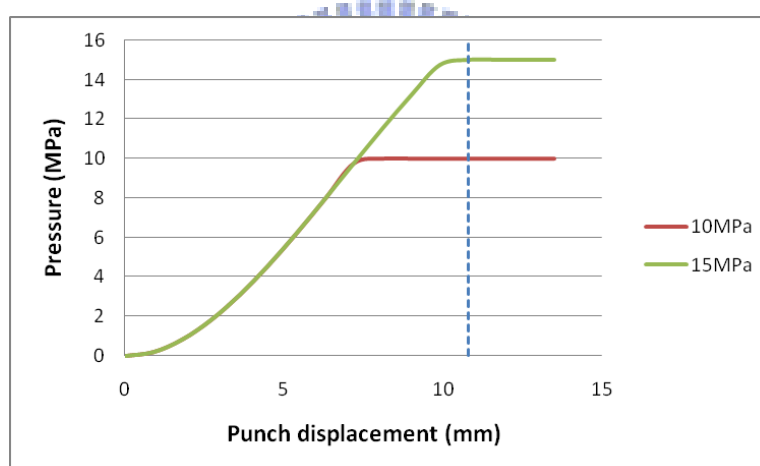


圖4.21 沖頭行程11mm時之液壓力大小示意圖

4.2.3 壓板力的影響

在金屬成形過程中，當料片與壓料板界面發生相對運動時，切線方向之摩擦力與接觸面的正向力（即壓板力）成正比。而較小的壓板力會使得板件邊緣容易起縐，也因此關係著板液壓成形時液壓室的密封性；但過大的壓板力也會造成金屬板件流動時的阻力，因此，對於

不同的板件材料與模具，該如何取得適當的壓板力是達成最佳試片成形的重要參數。在本節中，主要將探討壓板力對於板件成形性所造成的影響，在此將針對 Ti/Al 複合板材進行四組不同壓板力設定的板液壓成形模擬，參數設定如表 4.1 所示。模擬結果如圖 4.22、4.23 所示。

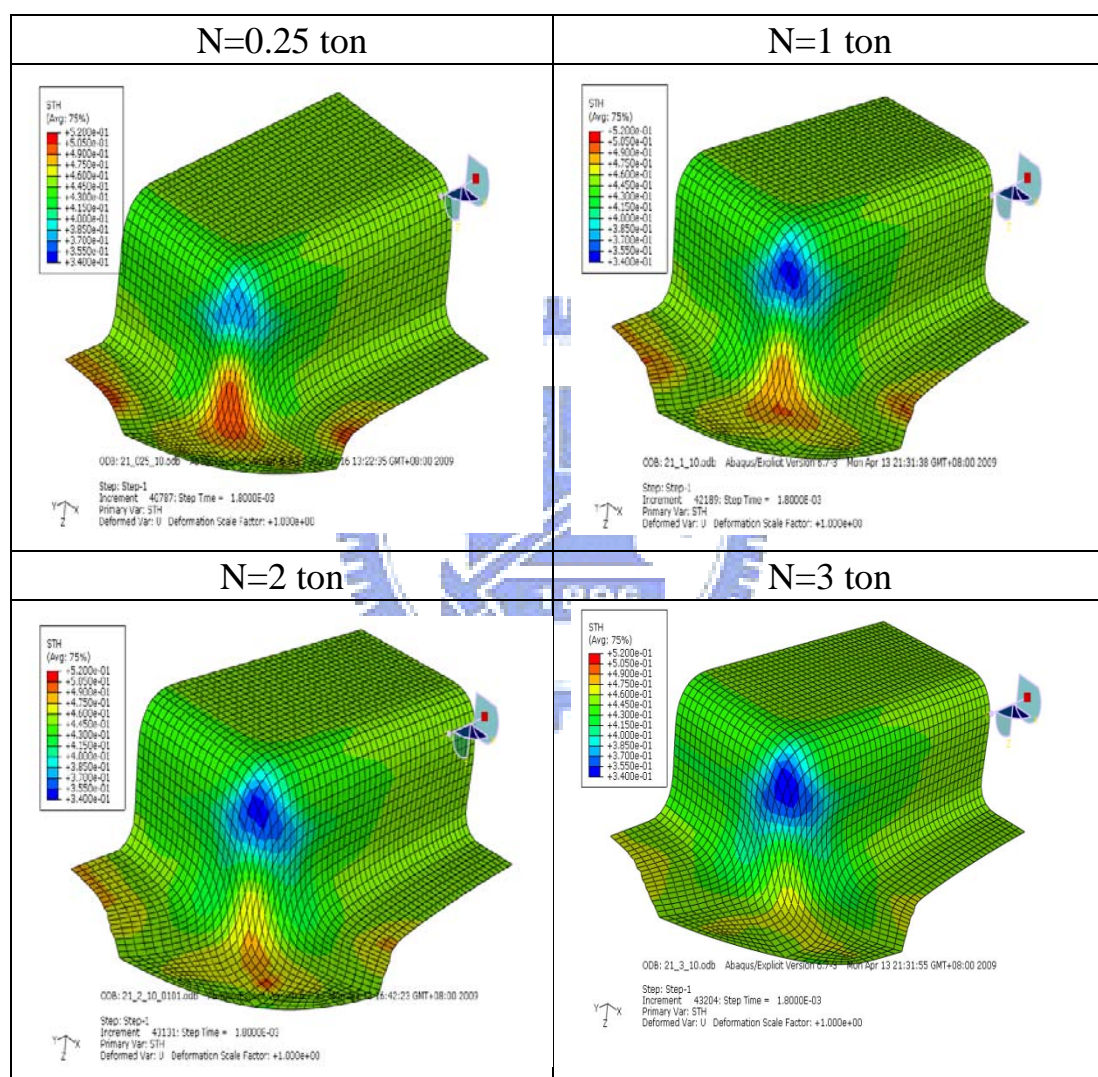


圖4.22 不同壓板力之模擬結果板件厚度分佈圖

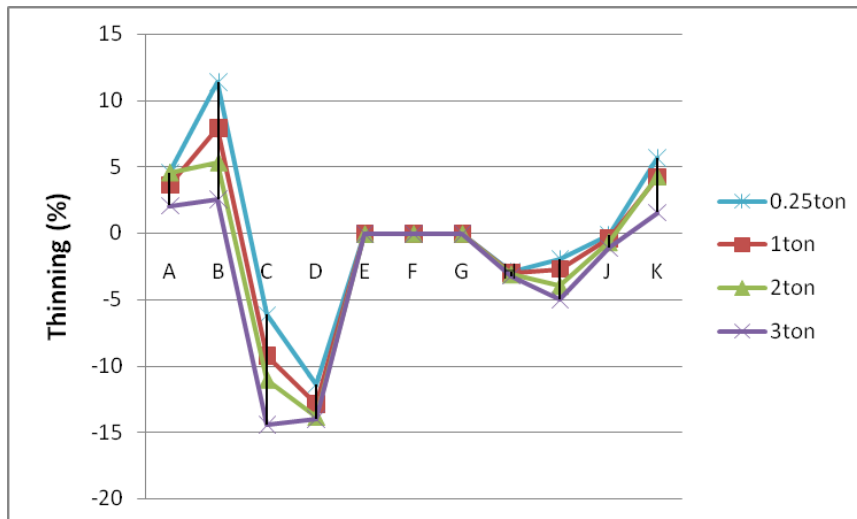


圖4.23 不同壓板力之板件減薄率

由結果明顯可見，採用較大的壓板力會使得整體板件成形後的厚度變薄，此情形十分顯著。且由於本研究所採用之 Ti/Al 複合板材其材料性質較軟，所以即使採用甚小之壓板力（0.25ton）也足以使其在變形時不會起縐。因此本研究認為在選擇壓板力時，可以選擇 0.25ton 作為成形參數，不過同時也應注意成形時之液壓室密封性。

4.2.4 模具間隙的影響

對應 4.2.2 節所探討之液壓力對於板件成形性的影響，本節將藉由改變沖頭與下模具間隙，以探討液壓油是否存在於板件與下模具間會不會對於板件成形性造成影響，甚至當間隙尺寸等於或小於板件初始厚度的情況下，是否能藉此達到較佳的密封性，進而達到均勻的板件厚度分佈。因此本研究將選擇大於板件厚度(0.6mm、0.8mm)、

等於或小於板料厚度(0.45mm、0.3mm)之模具間隙進行模擬，板件初始厚度為 0.45mm，其餘參數設定參考表 4.1。模擬結果如圖 4.24、4.25 所示。

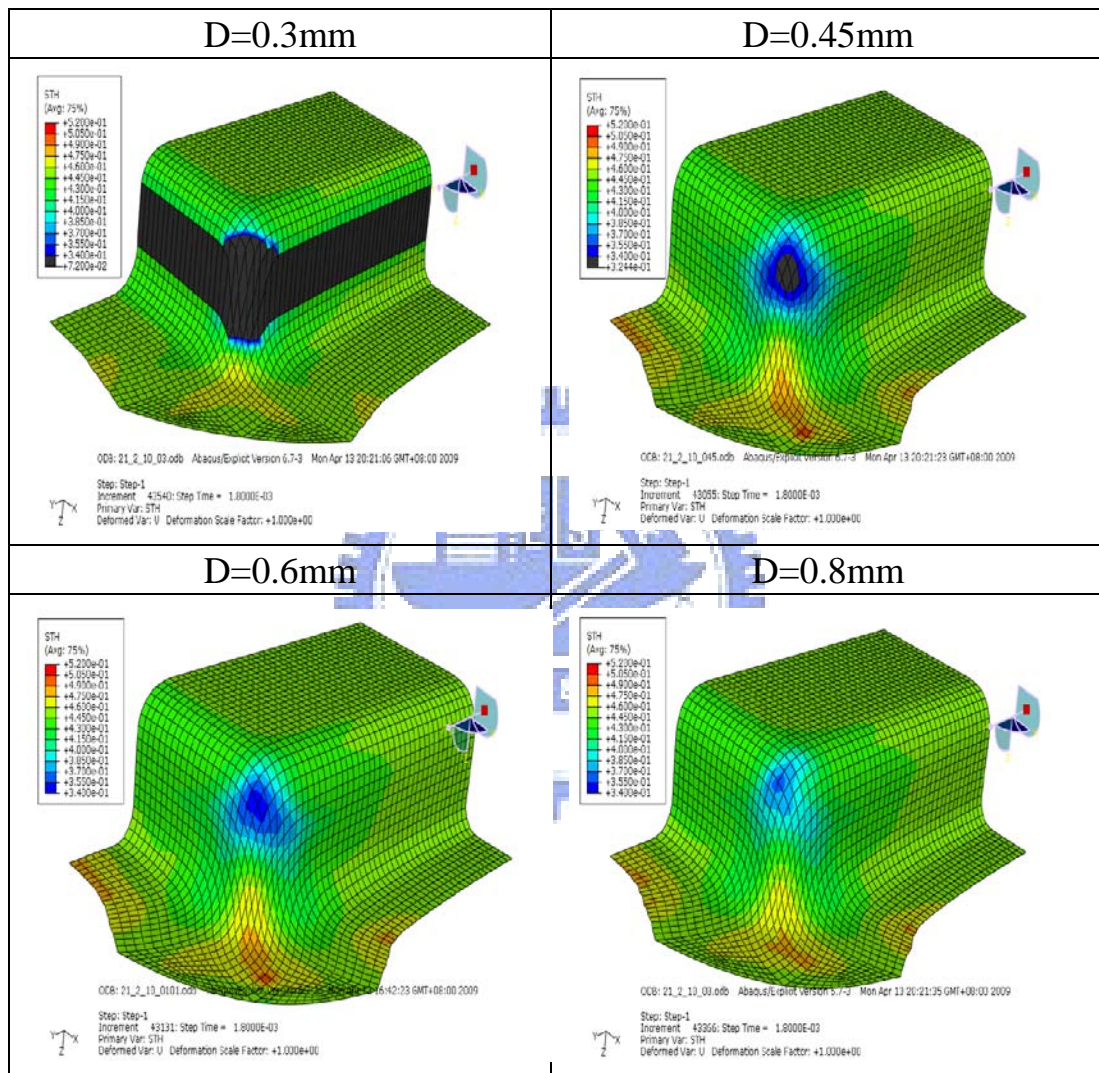


圖4.24 不同模具間隙之板件厚度分佈圖

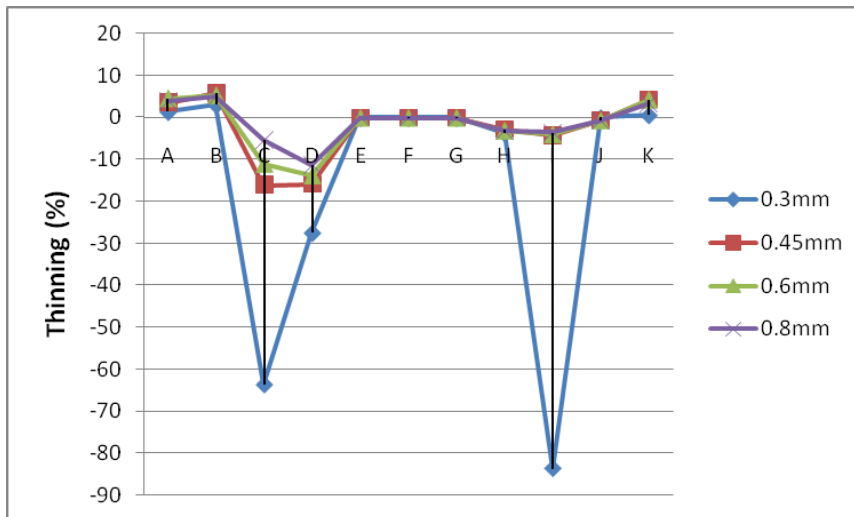


圖4.25 不同模具間隙之板件減薄率

由圖所示，當模具間隙越大時，板件由於受到下模具較少的拘束，使得其在成形性上有較佳的表現，此外因為液壓力的幫助，使得板件在成形後之合模性並不因為模具間隙增加而變差（圖 4.26）。然而，當模具間隙小於板件厚度的時候（0.3mm），可以看到整個板件成形結果的厚度皆較薄，甚至於在側壁的部份更加明顯，最薄的部位已達 0.073mm，板件很有可能在這些部位已經發生破裂。

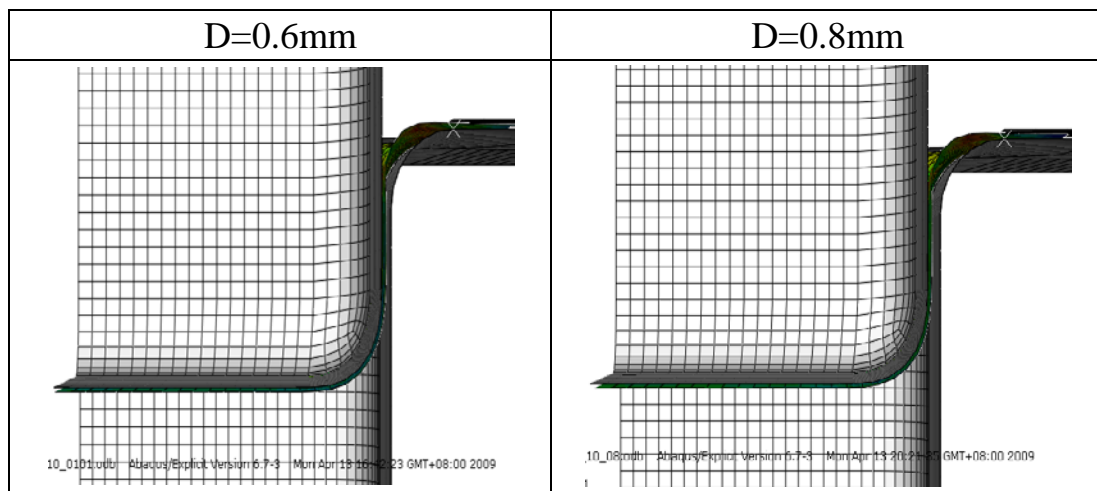


圖4.26 板件成形合模性比較圖

由以上結果可見，過小的模具間隙選擇容易使得板件與模具直接產生的摩擦行為，縱使液壓室的密封性在沖頭行程初期可保持一定值，但板件還是會在成形過程中受到與下模具壁面的剪切力作用而發生破裂的可能。因此本研究認為對於模具間隙的應該選擇較大之模具間隙（0.8mm），但同時也需要注意餘料的控制及成形過程中是否由於間隙過大而有液壓室密封困難之情形產生。

4.2.5 板件尺寸的影響

料件的初始尺寸會關係著液壓成形時的引伸比，且不同形狀的板件在壓料板與下模具之間夾持時，板件各部位的流動性也會對於最後板件的成形品質有一定的影響。在本章節中將設計幾組不同的截角寬度，以作為對板件尺寸的修正，用以比較其成形差異性。圖 4.27 為板件截角及長寬度的定義，本章節所使用的板件尺寸見表 4.3，其餘參數設定參考表 4.1。模擬結果如圖 4.28、4.29 所示。

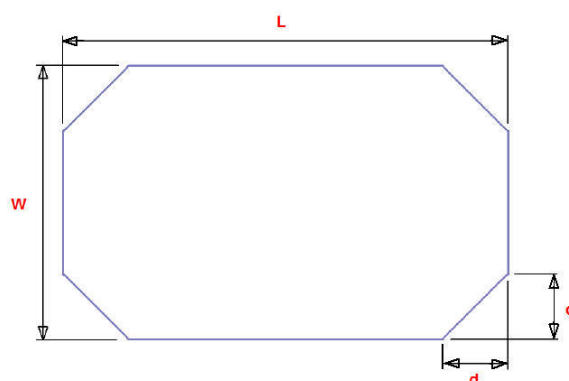


圖4.27 板件尺寸定義示意圖

表 4.3 尺寸參數變動表

d (mm)	20	21.21	23	25
L (mm)	114	120	120	120
W (mm)	74	80	80	80

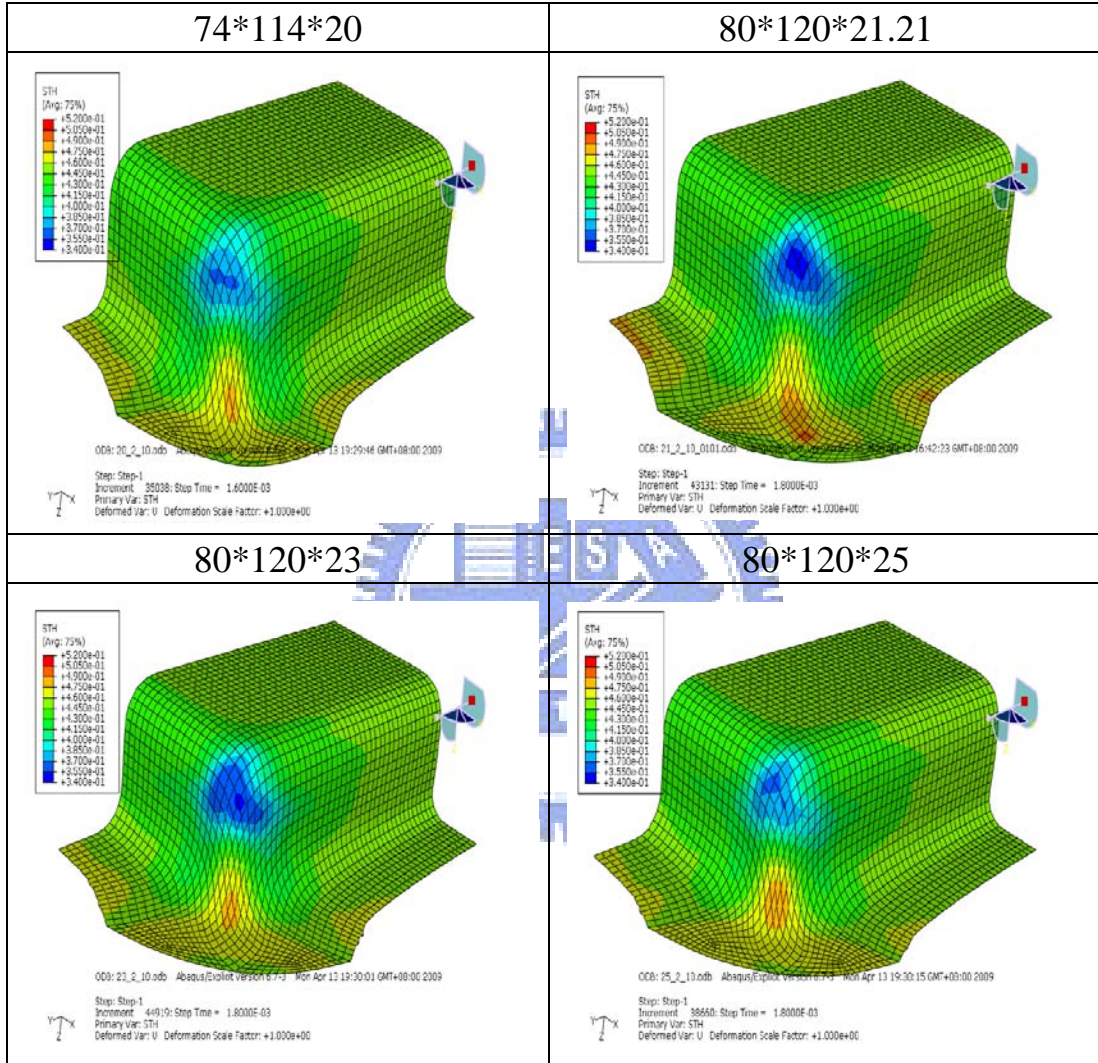


圖4.28 不同板件尺寸之板件厚度分佈圖

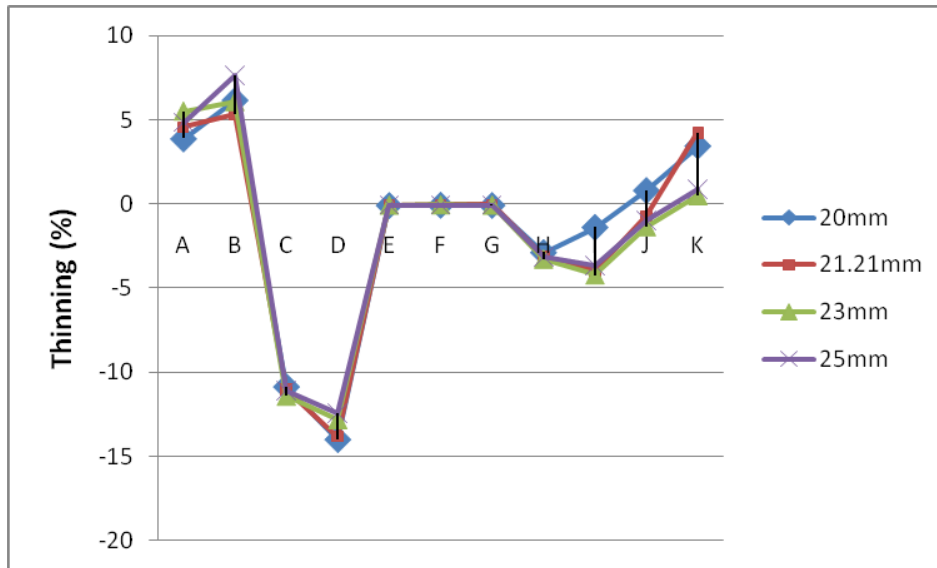


圖4.29 不同板件尺寸之板件減薄率

由圖可見，在沖頭圓角處的厚度薄化現象，隨著截角的寬度增加而有逐漸減緩的趨勢。然而，長寬兩側皆減小的板件尺寸，由於其截角寬度較小，因此在沖頭圓角處其減薄情況較為明顯，但也由於其整體尺寸較小，受到壓料板及下模具夾持之部位較少，因此在其他區域明顯的改善了板件成形性，使得板件的成形結果較為理想。因此未來在選擇初始板件尺寸時，應選擇較小的尺寸並兼顧截角寬度，以使板件成形結果更趨理想。

4.3 複合板材之適用性

目前利用複合板材進行板液壓成形以製造 3C 產品殼件之技術尚在發展當中，包括複合板材之軋軋製程、其材料性質之取得、板液壓

成形製程...等，因此本研究希望可以藉由實驗比較，初步探討 Ti/Al 複合板材在本研究所採用之載具上，是否比 Ti 單一材料板材更加合適。

由於材料取得的問題，本研究將使用厚度為 0.45mm 的 Ti/Al 複合板材及厚度為 0.5mm 的 Ti 單一板材進行板液壓成形實驗比較，製程參數設定與 4.1 節相同，藉此比較其減薄率以觀察其成形性之差異。實驗結果如圖 4.30 所示，由圖可見，雖然 Ti 單一板材會因為受到其模具間隙相對較小的條件影響，但可以明顯見到 Ti/Al 板材在各部位的成形性皆較 Ti 板材出色，即使將模具間隙之影響考慮進去，Ti/Al 板材在此載具上之成形性也是毋庸置疑的，再加上其材料成本的減低及具備多功能性等各項優點，在如此考量之下，Ti/Al 複合金屬板材確實比 Ti 單一材料板材更適合作為 3C 產品殼件的材料。

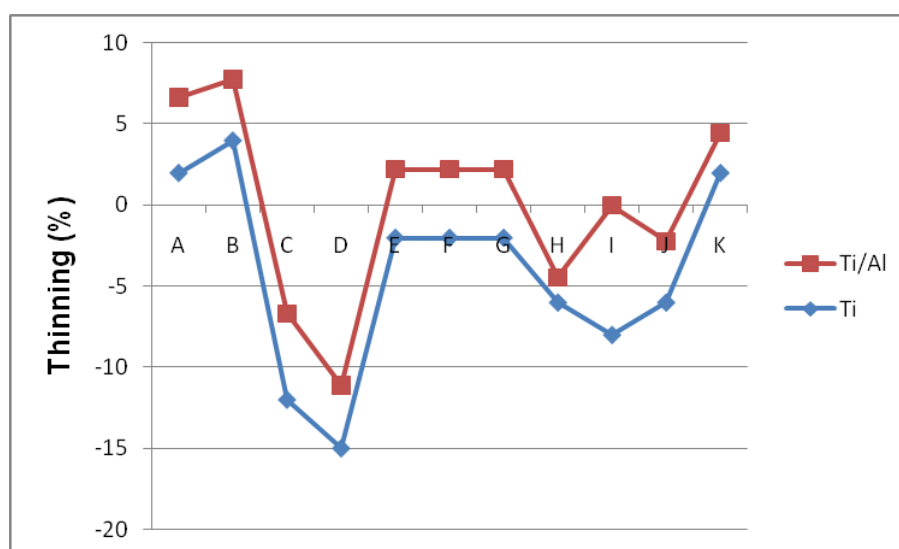


圖4.30不同材料之實驗結果板件減薄率

第五章 結論與未來工作

本研究中，首先針對 Ti/Al 複合金屬板件，進行材料性質試驗，並且建構出板液壓製程之有限元素模型，利用虛擬薄膜模擬液壓缸壓力作用行為，確實趨近於現實之壓力作用，除此之外，更藉由模擬板件在成形過程中之厚度分佈與減薄率，探討各項製程參數對於複合金屬板件的成形性影響。就模擬結果可得以下幾點結論：

1. 摩擦係數：由於板件與模具間的摩擦力直接影響了成形過程中板件的流動性，進而影響其成形性。建議可以降低板件與下模具及壓料板間的摩擦，並適度提高板件與沖頭間的摩擦，以減緩模具圓角處及側壁的薄化現象。
2. 液壓力：就模擬結果而言，在一定範圍內，較大的液壓力確實可以有效的幫助料變進給，因此建議可使用億壓力 15MPa 作為製程參數，以兼顧板件成形性及沖頭負載。
3. 壓板力：由於 Ti/Al 複合金屬材質較軟，成形過程中不易因為壓板力不足而產生皺摺，因此在液壓室密封情況良好之條件下，建議選擇壓板力 0.25ton（約為最大成形力之 0.0275 倍）作為參數設定。
4. 母模間隙：由模擬結果可見，當模具間隙等於或小於板件初

始厚度時，板件的成形性明顯下降；反之當模具間隙增大時，由於下模具對於板件的拘束減小，板件的成形性因此而有所提昇。所以在液壓室密封情況良好之條件下，建議選擇模具間隙 0.8mm（約為板件厚度的 1.78 倍）作為模具設計。

5. 料片初始尺寸：控制截角寬度可以有效的增進板件在模具圓角處的成形性，且當板件整體尺寸減小時，其受到模具夾持的部位減小，使得整體的成形性有所提昇，因此在有足夠材料夾持的情況下，建議選擇長寬尺寸較小而截角尺寸較大之板件進行成形。

實際成品如圖 5.1 所示。本研究同時也利用實驗初步證實 Ti/Al 複合板件在此載具上之適用性。



圖5.1 手機背蓋之板液壓成形成品

未來工作的部份：

1. 進行更精確之材料試驗以取得符合板材之材料性質，且針對材料表面進行實驗以取得其與模具間之真實摩擦係數。
2. 目前本研究採用單一層等效材料的方式來模擬複合金屬板件，若未來材料能達到完全退火的狀況，抑或有適當之實驗方式取得輥軋後兩層材料分別之材料性質，亦可分別建構出兩層材料進行模擬，與目前所使用之模擬方式及實驗結果進行比較。
3. 本研究目前所使用之成形機台尚無法主動控制其液壓力歷程，後續可藉由機台設備的改善及模擬互相比對，了解不同預壓力的施加及液壓力歷程對於板件成形性之影響。
4. 在本研究中，主要是透過厚度變化來大致推斷板件之成形性，但對於其破裂與否較難有定性的判斷依據，目前由於試片數量不足而無法進行複合板件之成形極限試驗，未來若能取得足夠的試片，可以將成形極限數據帶入有限元素分析中，以更準確的評估材料之成形性及破裂趨勢。
5. 本研究以針對各項製程參數的重要性及其影響做了深入的研究與探討，後續可連接最佳化軟體透過有限元素模擬的結果，以求得最適當的製程參數搭配組合，更進一步改善製程

設計。

6. 本研究也針對不同幾何外型之載具進行有限元素模擬（附錄 A），後續可針對如此外型較複雜之載具應用進行二道次以上的加工模擬，期望利用製程參數搭配，提高板件較均勻之厚度分佈並減少板件破裂情況發生。
7. 在附錄 B 中，本研究藉由 V-bending 實驗觀察出當不同材料面接觸模具時，其沖頭反力將有所不同，但由於 3C 產品殼件需要特定板件材料覆蓋於外層，因此論文並未探討此一現象對於實際板液壓製程之影響。後續可再做更深入之研究，或許可藉由改變模具方向等方式達到增進成形性之目的。



參考文獻

- [1] Vertu, <http://www.vertu.com>.
- [2] G.Y. Tzoua, M.N. Huang, “Analytical modified model of the cold bond rolling of unbounded double-layers sheet considering hybrid friction”, *Journal of Materials Processing Technology* 140 (2003) 622–627.
- [3] Y.S. Shin, H.Y. Kim, B.H. Jeon, S.I. Oh, “Prototype tryout and die design for automotive parts using welded blank hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology* 130–131 (2002) 121–127.
- [4] M. Keigler, H. Bauer, D. Harrison, A.K.M.D. Silva, “Enhancing the formability of aluminium components via temperature controlled hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 363–370.
- [5] N. Abedrabbo, M.A. Zampaloni, F. Pourboghrat, “Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology* 151 (2004) 48–53.
- [6] T.J. Kim, D.Y. Yang, S.S. Han, “Numerical modeling of the multi-stage sheet pairhydroforming process”, *Journal of Materials Processing Technology* 151 (2004) 48–53.
- [7] C. Hartl, “Research and advances in fundamentals and industrial applications of hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology* 167 (2005) 383–392.
- [8] S.H. Zhang, L.X. Zhou, Z.T. Wang, Y. Xu, “Technology of sheet hydroforming with a movable female die”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 43 (2003) 781–785.
- [9] P. Groche, C. Metz, “Hydroforming of unwelded metal sheets using active-elastic tools”, *Journal of Materials Processing Technology* 168 (2005) 195–201.

- [10] 蔡岳廷，『MARC 應用於液靜壓引伸加工問題之分析』，國立中央大學機械工程研究所碩士論文，2006。
- [11] E. Onder, A.E. Tekkaya, “Numerical simulation of various cross sectional workpieces using conventional deep drawing and hydroforming technologies”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48 (2008) 532–542.
- [12] S. Thiruvarudchelvan, M.J. Tan, “Fluid-pressure-assisted deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology* 192–193 (2007) 8–12.
- [13] W.H. Cubberly, “Metals handbook”, 9th edition, vol.4, ASM, 1978.
- [14] J.E. Hatch, “Aluminum : properties and physical metallurgy”, 1st edition, ASM, 1984.
- [15] J. Tsai, C.T. Sun, “Constitutive model for high strain rate response of polymeric composites”, *Composites Science and Technology* 62 (2002) 1289–1297.
- [16] 林瑞彰，『管材之成形極限研究』，國立中山大學機械與機電工程研究所碩士論文，2003。
- [17] 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。
- [18] I. M. Daniel, O. Ishai, “Engineering mechanics of composite materials”, Oxford, 2nd ed., 2006.
- [19] G. Hussain, L. Gao, N. Hayat, X. Ziran, “A new formability indicator in single point incremental forming”, *Journal of Materials Processing Technology* (2009).
- [20] M. Goodarzi, T. Kuboki, M. Murata, “Effect of initial thickness on shear bending process of circular tubes”, *Journal of Materials Processing Technology* 191 (2007) 136–140.
- [21] 康淵、陳信吉，『ANSYS 入門』，修訂四版，全華，2007。
- [22] 士盟科技股份有限公司，<http://www.simutech.com.tw>。
- [23] 愛發股份有限公司，『ABAQUS 實務入門引導』，初版，全華，2005。

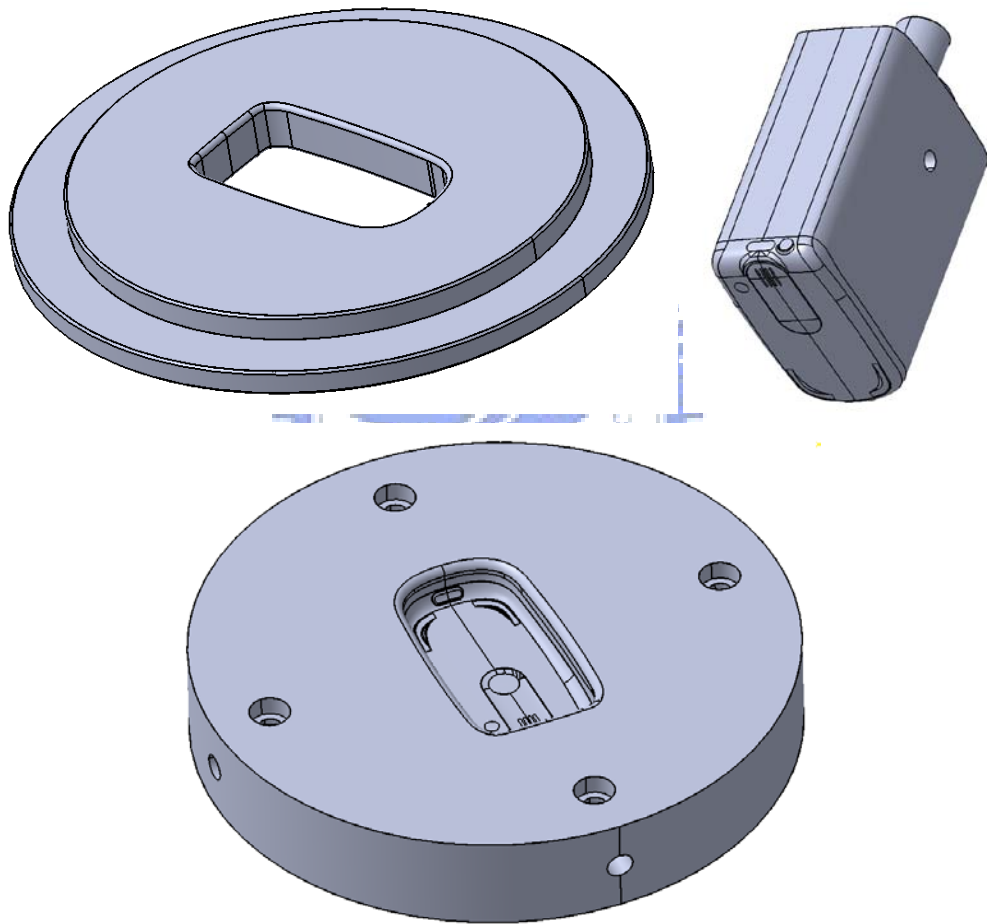
- [24] J. Danckert, K.B. Nielsen, “Hydromechanical deep drawing with uniform pressure on the flange”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49 (2000) 217-220.
- [25] M. Zampaloni, N. Abedrabbo, F. Pourboghrat, “Experimental and numerical study of stamp hydroforming of sheet metals”, *International Journal of Mechanical Sciences* 45 (2003) 1815–1848.
- [26] S.H. Zhang, M.R. Jensen, J. Danckert, K.B. Nielsen, D.C. Kang, L.H. Lang, “Analysis of the hydromechanical deep drawing of cylindrical cups”, *Journal of Materials Processing Technology* 103 (2000) 367-373.
- [27] S.H. Zhang, L.H. Lang, D.C. Kang, J. Danckert, K.B. Nielsen, “Hydromechanical deep-drawing of aluminum parabolic workpieces — experiments and numerical simulation”, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 40 (2000) 1479–1492.
- [28] S.H. Zhang, M.R. Jensen, K.B. Nielsen, J. Danckert, L.H. Lan, D.C. Kang, “Effect of anisotropy and prebulging on hydromechanical deep drawing of mild steel cups”, *Journal of Materials Processing Technology* 142 (2003) 544–550
- [29] 蔡宗志，『汽車後行李箱蓋之板金』，國立臺灣大學機械工程學研究所碩士論文，2002。
- [30] T. Hama, T. Hatakeyama, M. Asakawa, H. Amino, A. Makinouchi, H. Fujimoto, H. Takuda, “Finite-element simulation of the elliptical cup deep drawing process by sheet hydroforming”, *Finite Elements in Analysis and Design* 43 (2007) 234–246.
- [31] S. Kapinski, “Analytical and experimental analysis of deep drawing process for bimetal elements”, *Journal of Materials Processing Technology* 60 (1996) 197–200.
- [32] M.H. Parsa, K. Yamaguchi, N. Takakura, “Redrawing analysis of

aluminum–stainless-steel laminated sheet using FEM simulations and experiments”, International Journal of Mechanical Sciences 43 (2001) 2331–2347.

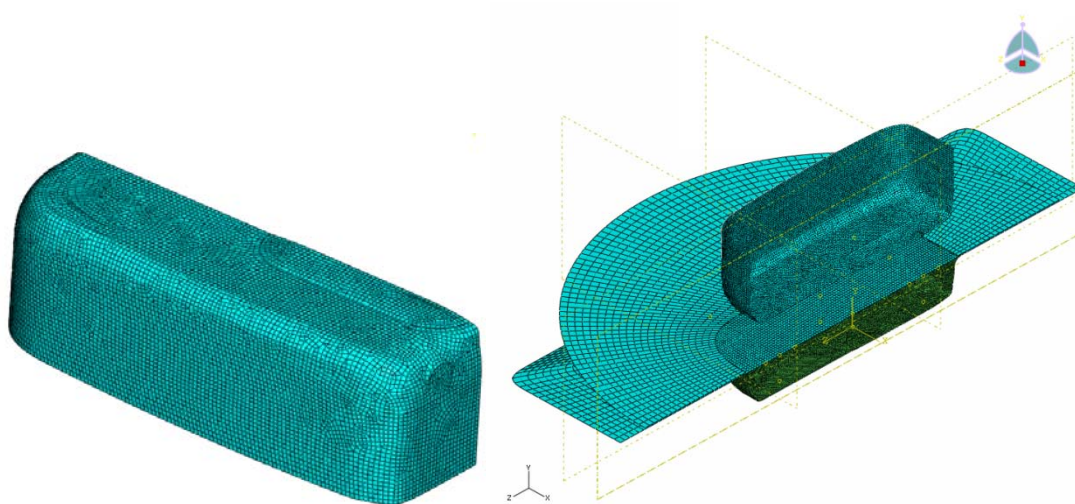


附錄 A 載具二（手機背蓋）之實驗與模擬

本研究也針對另一外型較複雜之手機背蓋載具進行板液壓成形之探討，其模具之幾何外型如圖 A.1 所示，有限元素模型則建構 1/2 對稱之模型，並加上一幫助成形之剛體母模（圖 A.2）。

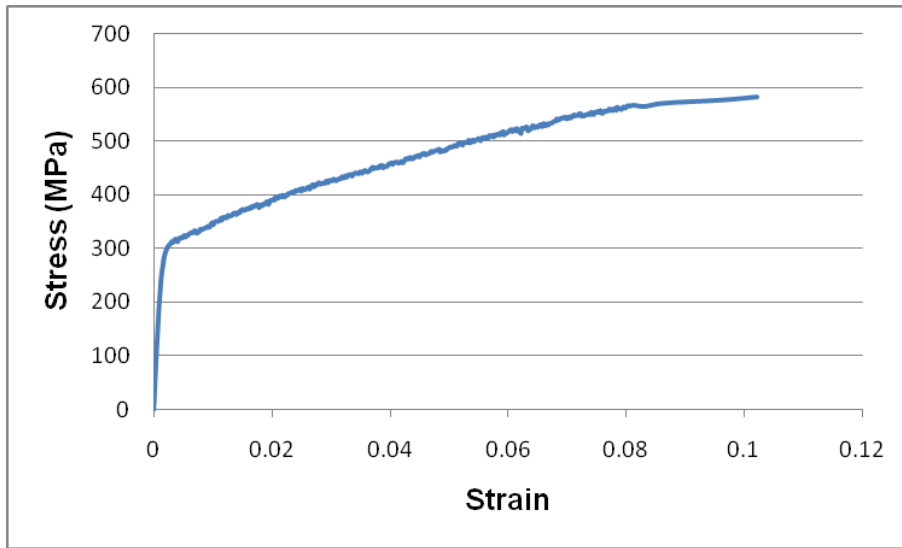


圖A.1 載具二模具之幾何外型

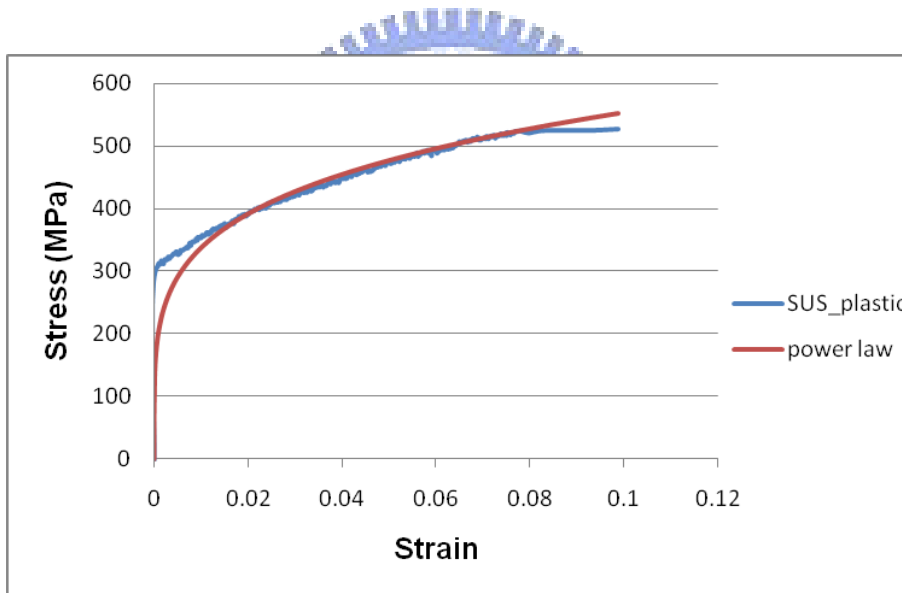


圖A.2 載具二之有限元素模型

由於本研究已討論出不同參數對於成形薄化的影響程度，在本節中，由於受限於 Ti/Al 複合板件試片的數量問題，實驗驗證的部份將利用 SUS304 作為材料進行實驗及模擬，將 SUS 視為等向性(isotropic)之材料，材料性質由拉伸試驗所得，拉伸曲線及指數定律曲線如圖 A.3、A.4 所示，整理其機械性質如表 A.1。此外，由於機台設定參數之穩定變異性，僅利用 Ti/Al 複合板件針對壓板力之不同設定進行模擬，實驗及模擬參數設定如表 A.2 所示。厚度分佈及薄化率之量測部位如圖 A.5 所示。



圖A.3 SUS真實應力/真實應變曲線



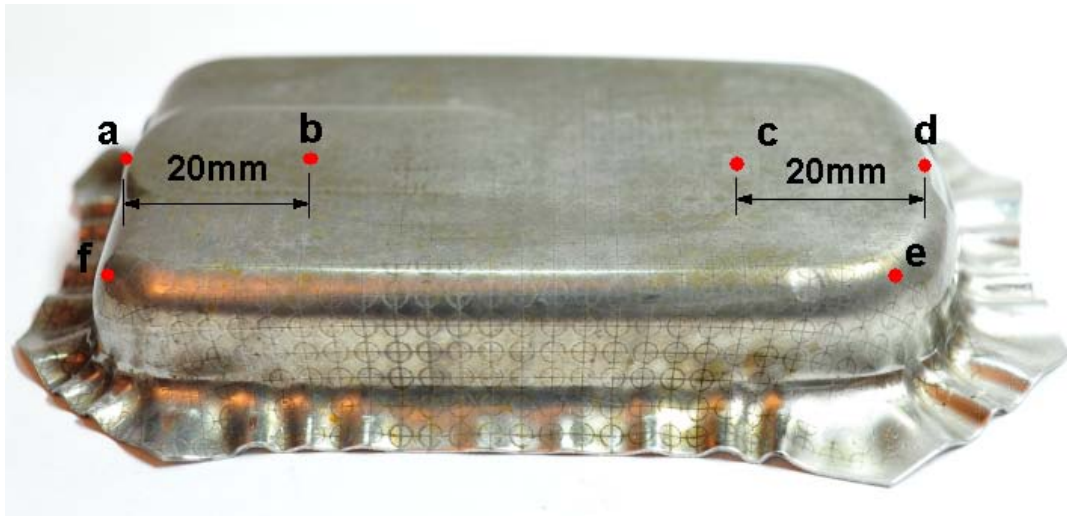
圖A.4 SUS之真實應力/塑性應變曲線與指數定律曲線圖

表 A.1 SUS 單一板材之機械性質

E(GPa)	K	n
149.158	910	0.215

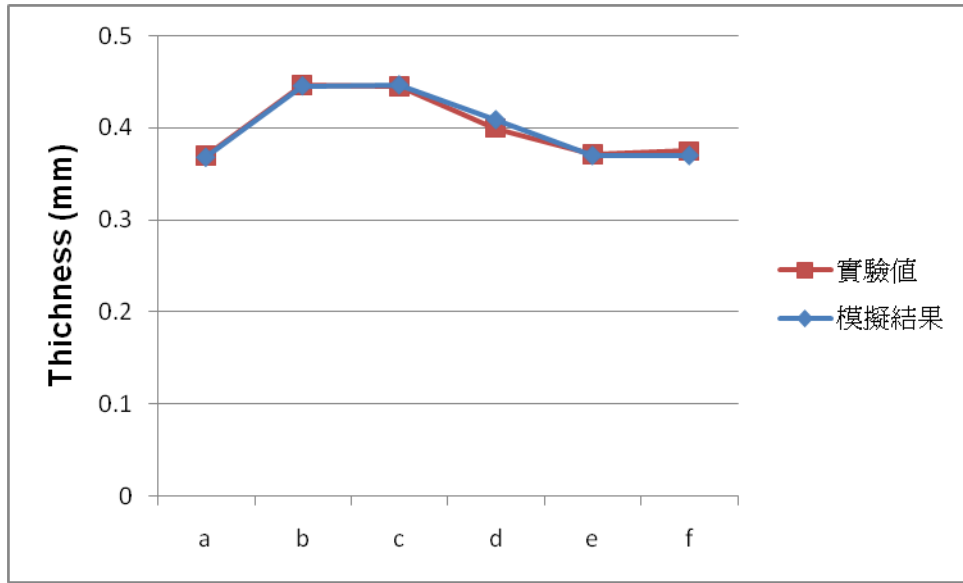
表 A.2 各項製程參數設定表

Material	SUS	Ti/Al
Holding force – F (ton)	2	0.7 , 1
Internal Pressure – P (MPa)	16.6	11
Tooling Gap – D (mm)	0.6	0.6
Polled Width – d (mm) (Blank Size)	20(114×74)	20(114×74) ,

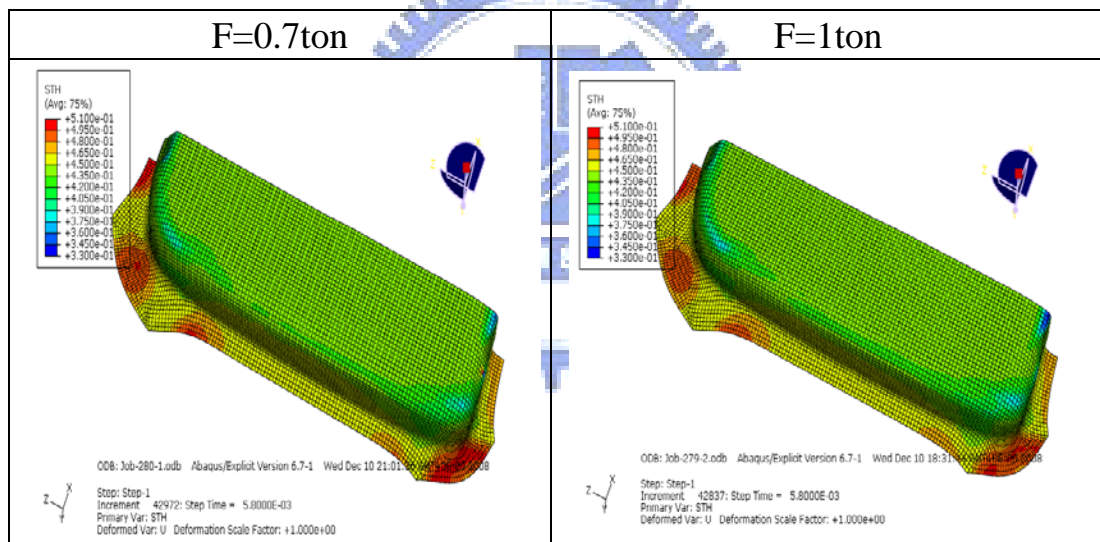


圖A.5 板件成形結果量測部位示意圖

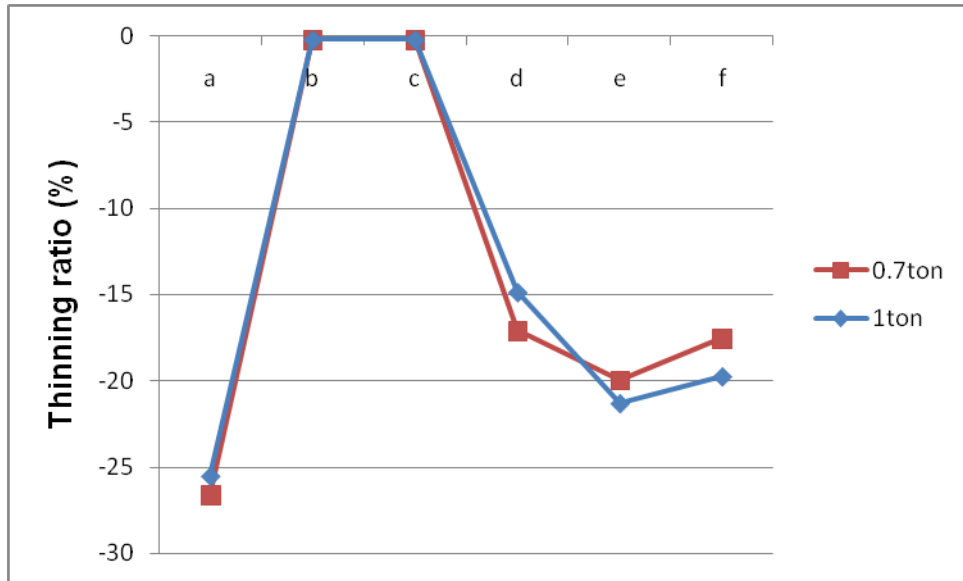
實驗驗證之結果如圖 A.6 所示，由結果可見，本研究所建構之有限元素模型分析之結果與實驗結果十分吻合，由此可驗證其可信度。而 Ti/Al 板液壓成形之模擬結果及各部位之減薄率如圖 A.7、A.8 所示，由結果可見，板件成形之後，在 a 點處的薄化情況十分顯著，由實驗結果（圖 A.9）也可見到在此處已有破裂之情況發生。



圖A.6 SUS實驗與模擬結果厚度分佈比較圖



圖A.7 不同壓板力之Ti/Al板件厚度分佈圖



圖A.8 不同壓板力之Ti/Al板件減薄率



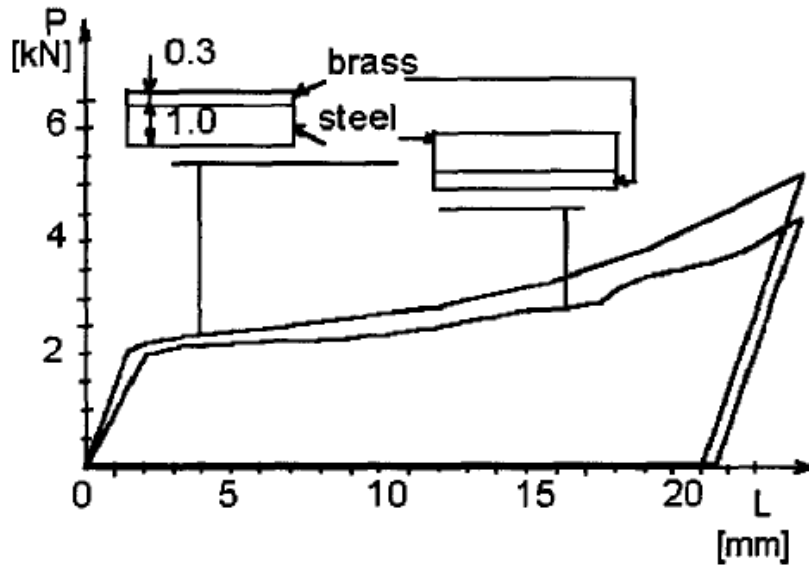
圖A.9 Ti/Al板材板液壓成形實驗結果 (1 ton)

由以上結果初步判斷利用 Ti/Al 複合金屬板材製造此一載具尚有一定的困難性，後續可考慮改變其他製程參數，或是以多道次方式進行加工，以改善破裂情形並使其厚度分佈更加均勻。

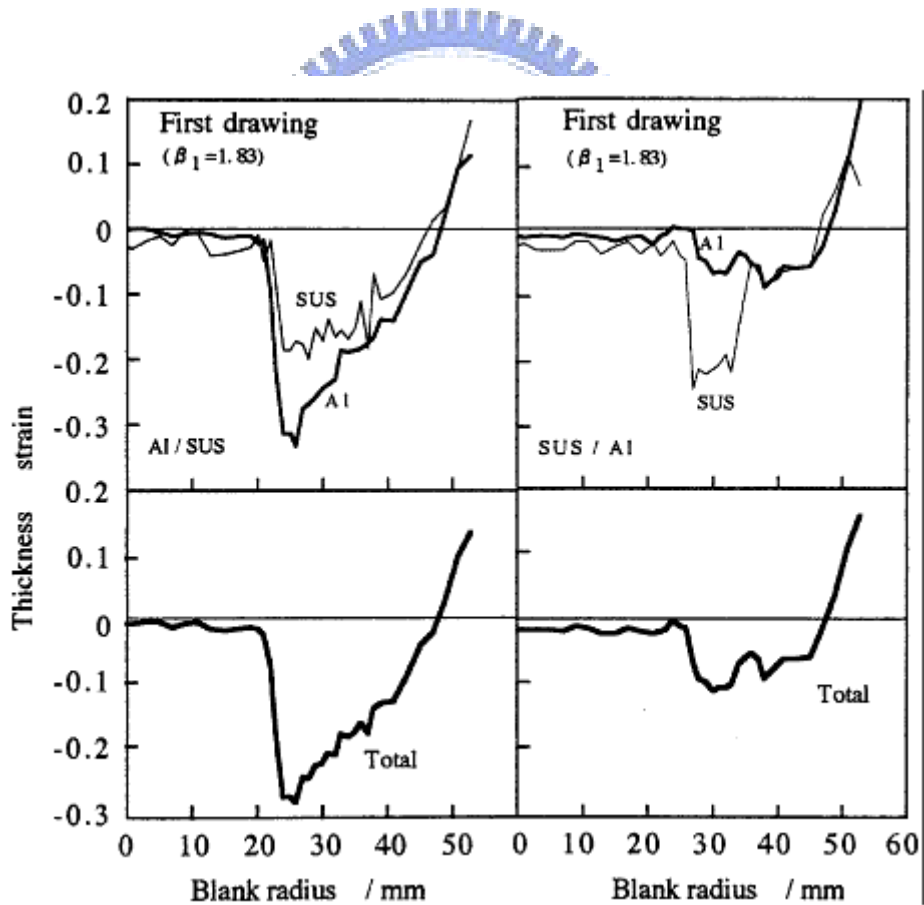
附錄 B 不同材料接觸面之沖頭反力

在參考資料[31]中提出，複合板材在 U-bending 實驗中以不同材料面接觸模具、沖頭時，其沖頭反力會有所不同（圖 B.1）。而參考資料[32]也提出在深引伸（deep drawing）製程中，以用不同材料面接觸模具、沖頭時，其成形性也會有所差異（圖 B.2）。

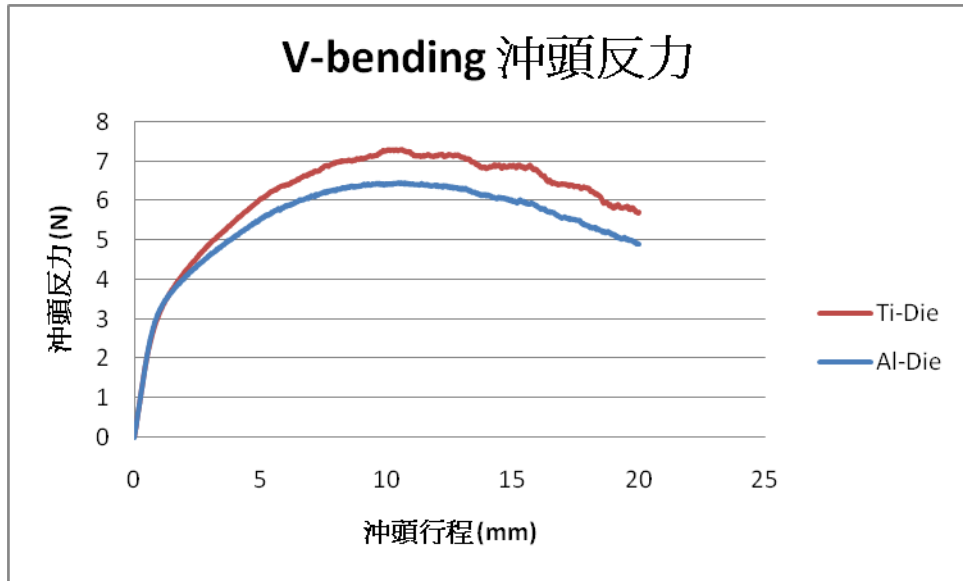
本研究以 V-bending 實驗觀察不同材料面接觸模具時之沖頭反力，從結果（圖 B.3）可以看出材料在成形過程中以不同材料面接觸模具或沖頭時，其沖頭反力確實有所差異。但在本研究中，由於無法分別取得 Ti 及 Al 軋軋後之材料性質，實驗中也由於試片過薄，無法量測雙層材料分別之厚度方向應變，因此在有限元素模擬中可以控制的參數只有不同材料面與模具間接觸之摩擦係數。此外，由於在板液壓成形時，沖頭反力主要受液壓力的影響較大，由材料本身造成之沖頭反力差異對於成形性之影響仍有待更進一步的探討，因此本研究最終仍選擇利用一層等效的材料帶入複合板材之材料性質進行板液壓成形之有限元素模擬。



圖B.1 U-bending實驗之沖頭反力差異[32]



圖B.2 深引伸製程中之成形性差異[33]



圖B.3 V-bending實驗之沖頭反力差異

