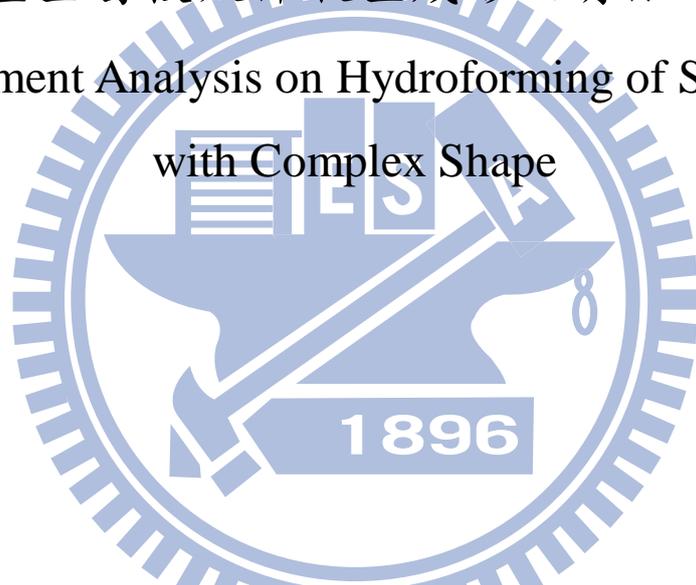


國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

複雜外型金屬板殼件液壓成形之有限元素分析
Finite Element Analysis on Hydroforming of Sheet Metal
with Complex Shape



研究生：吳宗錚

指導教授：洪景華 教授

中華民國 九十九 年 六 月

複雜外型金屬板殼件液壓成形之有限元素分析
Finite Element Analysis on Hydroforming of Sheet Metal with
Complex Shape

研究生：吳宗錚

Student: Zong-Chun Wu

指導教授：洪景華 教授

Advisor: Dr. Ching-Hua Hun

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

The logo of National Chiao Tung University is a circular emblem with a gear-like outer border. Inside the circle, there is a stylized representation of a building or a bridge structure. The text 'A Thesis' is positioned above the central graphic, and 'Submitted to Department of Mechanical Engineering' and 'College of Engineering' are placed below it. The university's name 'National Chiao Tung University' is written across the middle. Below that, it states 'in partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master' and 'in' at the bottom.

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

July 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年七月

複雜外型金屬板殼件液壓成形之有限元素分析

研究生：吳宗錚

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

本研究使用有限元素模擬軟體 ABAQUS 針對一複雜外型的相機外殼殼件之板液壓成型做有限元素分析，以板件之厚度分佈情形作為依據，改變各項製程參數如：壓料板力、液壓力歷程、料片尺寸與修改小部分模具外形，並使用多種材料(ASUS304、A1050 及鈦鋁複合板材)來探討其對於成形性之影響。

首先將由材料試驗得到各種板材之材料機械性質帶入有限元素模形，建構出一個具有多階段成形之板液壓模形，並透過實驗與模擬結果之對照，驗證模型之準確度。之後針對各項製程參數作探討，並適當的修改模具外型來改善板料的流動性，增加其成形性，得到一強度符合需求之成品。最後製作出新的模具外型並帶入修改後製程參數，透過實驗驗證，修改後之模具外型與製程參數確實對於改善成形性有所幫助。

關鍵字：有限元素分析、複雜外型殼件、板液壓成型、製程參數

Finite Element Analysis on Hydroforming of Sheet Metal with Complex Shape

Student: Zong-Chun Wu

Advisor: Dr. Ching-Hua Hun

Department of Mechanical Engineering

National Chiao Tung University

ABSTRACT

This research used ABAQUS to analyze the hydroforming process for a camera case with complex shape. Using thickness distribution as a criterion, this research examined the formability with important factors such as holding force, internal pressure, blank size, different materials (ASUS304、A1050 and Ti/Al clad metal) and die shape.

The material properties of Ti/Al clad sheet were first obtained through uniaxial tensile tests. Then a multi-step hydroforming model was established and verified by comparing hydroforming experiment with simulation result. Thus research also used the FEM model to further discuss the influences of difference process parameters, and obtained a better combination of parameters. Finally, this combination of parameters were used with a set of new dies to conduct verification hydroforming of a Ti/Al composite camera case.

Keywords: Finite Element Analysis, Complicated Shape, Hydroforming, Process Parameters

誌謝

回想起這兩年的生活，細數過往的點滴，真的覺得要感謝的人實在是太多了，當然最感謝的是指導教授洪景華老師，從開始接觸有限元素軟體到最後進行論文的研究，老師皆耐心的給予建議與指導，才有了現在這篇論文的完成；除此之外，老師在待人處事的態度與對於學問的執著更是一個很好的模範讓學生時時作為榜樣。

而在這兩年中，實驗室良好的氣氛也提供我在學習過程中一個良好的環境，沒有架子並且為實驗室生活品質默默付出的宇中學長；指導我閱期讀論文期刊與給予研究上許多建議的煌綦學長，若沒有學長各方面的點子我的論文將會失色許多；外表嚴肅但私底下卻十分有趣的攝影高手正展學長，各方面問題幾乎都能回答的麒禎學長，很有個人特色的銘傑學長，時常保持開朗樂觀的彥彬學長與做任何事都十分認真的志嘉學長，使得待在實驗室時心情十分的輕鬆，而來實驗室早已是這兩年中起床刷牙後的習慣。

當然同屆的同學更是在求學過程中不可或缺的好夥伴，在軟體的使用上常常給予我許多協助的正一，串連最佳化軟體的經驗應該未來都很難忘吧！一開始在我學習 ABAQUS 給予許多幫助，且常常邀吃飯活絡同級間感情的筱偉，還有認識很多神奇的人且生活經歷豐富的

靈活胖子立釗，如果沒有你們這兩年將會遜色不少。而學弟妹振傑、雅喬、馨勻和書麟感謝你們幫忙處理一些實驗室的雜事，讓我們在寫論文時能心無旁騖。

也要謝謝高雄金屬中心的李明富先生與師父，在實驗上給予大力的協助，並提供相關的專業知識供我在各種參數上的改變做參考。

最後要謝謝父母提供我充足的生活條件，讓我能無後顧之憂的專注於學業，並時常給予關心，讓在外地的我時時感到家的溫暖。

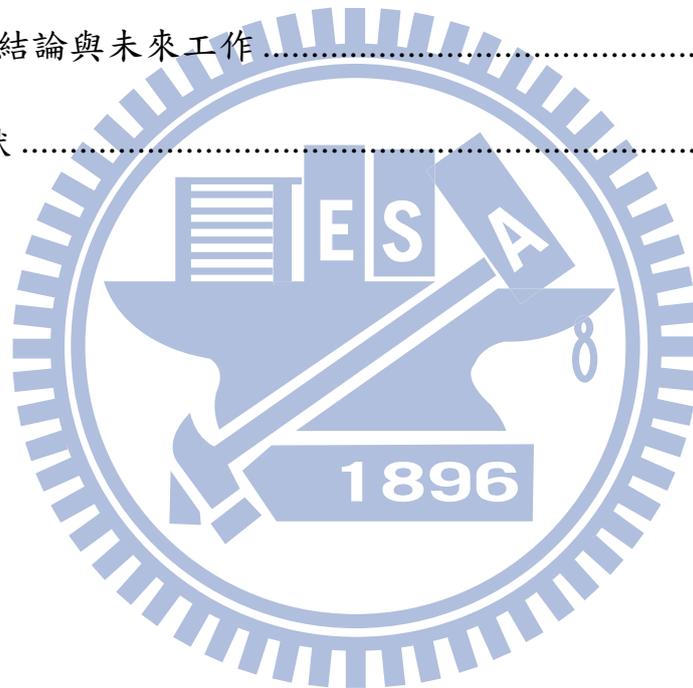


目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
表目錄	viii
圖目錄	ix
1. 第一章 緒論	1
1.1. 簡介	1
1.1.1. 板液壓成形	2
1.1.2. 複合金屬板材	5
1.2. 文獻回顧	6
1.3. 研究動機與目的	9
1.4. 研究方法	10
1.5. 論文內容介紹	11
2. 第二章 材料性質與試驗	12
2.1. 拉伸試驗	12
2.1.1. 試驗目的	12
2.1.2. 彈性係數與指數定律	13
2.1.3. 異向性	14

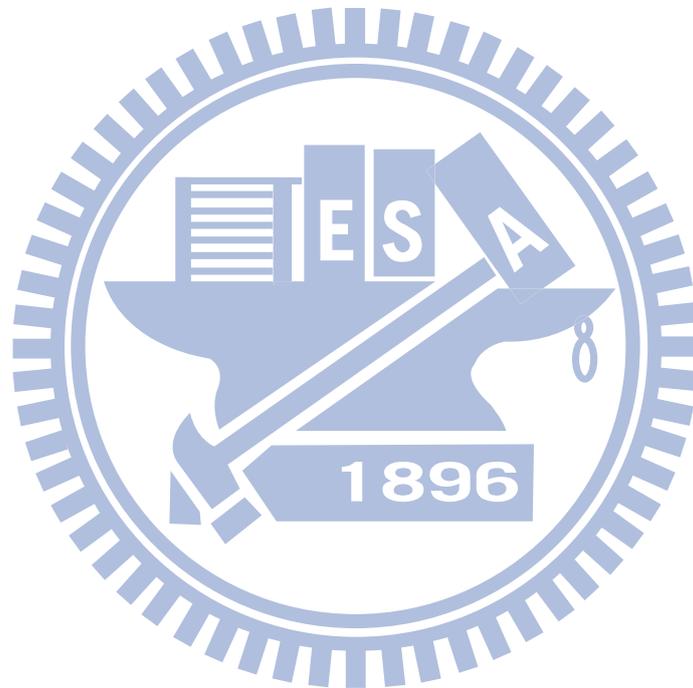
2.1.4.	實驗方法及結果.....	15
3.	第三章 有限元素法.....	22
3.1.	有限元素分析系統.....	23
3.2.	軟體介紹－ABAQUS	25
3.3.	有限元素模型之基本假設	27
3.4.	建立模型	27
3.4.1.	多階段工序與輔助母模.....	27
3.4.2.	取得模具幾何外型.....	28
3.4.3.	網格劃分	30
3.4.4.	材料及元素性質給定.....	31
3.4.5.	接觸設定	32
3.4.6.	邊界條件及分析設定.....	33
3.4.7.	後處理	37
3.5.	網格收斂性測試.....	38
4.	第四章 板液壓成形之模擬結果	40
4.1.	板液壓成形驗證實驗.....	40
4.1.1.	鈦鋁複合板給定雙層材材料之模擬.....	47
4.2.	詳細之有限元素模擬.....	50
4.2.1.	加工階段探討.....	51

4.2.2.	壓料板力變動之影響	55
4.2.3.	移除第一階段下模具與改變壓料板力	58
4.2.4.	模具側邊傾斜角設計	61
4.2.5.	相機殼件機頂之段差高度修改	64
4.2.6.	較佳之製程參數成形模擬	66
4.2.7.	較佳之製程參數實驗驗證	71
5.	第五章 結論與未來工作	74
6.	參考文獻	77



表目錄

表 1.1 液壓成形的各式類別.....	2
表 4.1 各點厚度分佈	44
表 4.2 鈦鋁複合板實驗與不同材料性質給定方法之厚度比較	49
表 4.3 板液壓所使用之製成參數.....	50



圖目錄

圖 1.1 殼件以液壓成形製造的 3C 產品	1
圖 1.2 管液壓成形流程示意圖	2
圖 1.3 板液壓成形流程示意圖	3
圖 1.4 板液壓深引伸成形流程示意圖[1]	4
圖 1.5 品質不良的板液壓成品：(a)皺摺、(b)破裂	4
圖 1.6 軋軋製成的鈦鋁複合板材	5
圖 1.7 成形過程中板件受液壓力作用示意圖[2]	6
圖 1.8 不同液壓利對於圓杯引伸的破裂情形[3]	6
圖 1.9 無合模的板液壓圓杯引伸[4]	7
圖 1.10 複合金屬兩階段有反摺與無反摺引伸[5]	7
圖 1.11 鈦鋁複合板成形後殼件無破裂[6,7]	8
圖 1.12 各量測點位之薄化率分佈實驗與模擬比對 [6,7]	8
圖 1.13 改變模具上緣部分的側壁斜角之研究[8]	9
圖 1.14 相機外殼	10
圖 2.1 MTS-810 拉伸試驗機	15
圖 2.2 拉伸試驗試片尺寸圖(mm)	16
圖 2.3 鈦鋁拉伸試驗試片配置圖	16

圖 2.4 鈦鋁複合板材真實應力/真實應變曲線	17
圖 2.5 鈦鋁複合板材近似之真實應力/真實應變曲線.....	18
圖 2.6 SUS304 實驗真實應力/真實應變曲線	18
圖 2.7 SUS304 近似之真實應力/真實應變曲線.....	19
圖 2.8 A1050 實驗真實應力/真實應變曲線	19
圖 2.9 A1050 近似之真實應力/真實應變曲線.....	20
圖 2.10 鈦之真實應力/應變曲線圖.....	21
圖 3.1 有限元素軟體之分析流程圖[13]	23
圖 3.2 數位相機幾何外型圖.....	28
圖 3.3 模型沖頭及下模具之幾何外型	29
圖 3.4 板液壓成形機台模具配置圖(單位：mm).....	29
圖 3.5 有限元素模型	30
圖 3.6 不同階段之沖頭有限元素模型.....	30
圖 3.7 不同階段下模具之有限元素模型	31
圖 3.8 下模具之內、外部示意圖.....	32
圖 3.9 板液壓成形製程圖	33
圖 3.10 板液壓製程板件變形受力示意圖	34
圖 3.11 虛擬薄膜模擬板件受液壓力示意圖	34
圖 3.12 邊界條件設定示意.....	35

圖 3.13 兩階段成形之接觸設定.....	36
圖 3.14 第一/二階段施加之液壓力曲線.....	36
圖 3.15 板件最低階模態頻率分析圖.....	37
圖 3.16 分析歷程中之動能與內能變化圖.....	38
圖 3.17 網格大小與板件厚度關係圖.....	39
圖 4.1 板液壓成形機台.....	41
圖 4.2 第一階段之下模具與沖頭外型.....	41
圖 4.3 第二階段之下模具與沖頭外型.....	42
圖 4.4 料片尺寸.....	42
圖 4.5 第二階段液壓力歷程.....	43
圖 4.6 實驗之成形步驟.....	43
圖 4.7 厚度分佈之取樣點位.....	44
圖 4.8 A1050 實驗與模擬厚度比較圖.....	45
圖 4.9 圖 鈦鋁複合板材之實驗與模擬厚度比較圖.....	46
圖 4.10 A1050 之殼件實驗與模擬變形情形比較.....	46
圖 4.11 鈦鋁複合板材之殼件實驗與模擬變形情形比較.....	46
圖 4.12 鈦鋁複合板不同材料給定方式之結果比較.....	47
圖 4.13 鋁層之厚度分佈圖.....	48
圖 4.14 鈦層之厚度分佈圖.....	49

圖 4.15 給予截角後之料片尺寸.....	51
圖 4.16 三階段成形新增之第一階段沖頭（左圖）與下模具 （右圖）	52
圖 4.17 三階段的製程	52
圖 4.18 一階段的製程	52
圖 4.19 一階段製程之厚度分佈圖	53
圖 4.20 兩階段製程之厚度分佈圖	53
圖 4.21 三階段製程之厚度分佈圖	53
圖 4.22 三階段製程的第一階段成形厚度分佈	54
圖 4.23 三階段製程的第二階段成形厚度分佈	54
圖 4.24 料片最小厚度低於 0.6mm之厚度分佈圖 (9800N) .	56
圖 4.25 料片厚度低於 0.6mm之厚度分佈圖 (4900N)	57
圖 4.26 第一階段成形結束之厚度分佈圖 (4900N).....	58
圖 4.27 第一階段無下模具之厚度分佈(4900 ton).....	59
圖 4.28 最薄厚度達 0.6mm階段之厚度分佈 (4900N).....	59
圖 4.29 第一階段無下模具之厚度分佈 (2450N).....	60
圖 4.30 最薄厚度達 0.6 mm階段之厚度分佈 (2450N).....	61
圖 4.31 最薄厚度達 0.6 mm階段之料片起皺 (2450N).....	61
圖 4.32 不同模具導角示意圖.....	62

圖 4.33 20 度模具之料片厚度分布情況	62
圖 4.34 10 度模具之料片厚度分布情況	63
圖 4.35 模具角度對於最終成型尺寸的差異比較.....	64
圖 4.36 原段差高度(2.8 mm)的厚度分佈圖	65
圖 4.37 50%段差高度(1.4 mm)的厚度分佈圖	65
圖 4.38 無段差高度的厚度分佈圖	65
圖 4.39 修改後之第一階段沖頭.....	66
圖 4.40 優化後之兩階段製程.....	67
圖 4.41 修改製程參數後鈦鋁複合板料片之厚度分佈	68
圖 4.42 修改製程參數後A1050 料片之厚度分佈.....	69
圖 4.43 修改後截角不對稱之料片	70
圖 4.44 修改料片尺寸後鈦鋁複合板料片之厚度分佈	70
圖 4.45 修改料片尺寸後A1050 料片之厚度分佈.....	71
圖 4.46 模具與沖頭設計圖	72
圖 4.47 初始板件形狀成形結果.....	73
圖 4.48 修改之板件形狀成形結果.....	73

第一章 緒論

1.1. 簡介

目前液壓成形已經被廣泛應用於各項輕量化零組件之製程，包括向來要求產品輕薄短小的 3C 產業（如圖 1.1）。有別於傳統的沖壓引伸製程，液壓成形在板件與模具之中存有液壓油，板件將置於液壓室上方，在沖頭向下位移的同時，液壓室體積變化進而施予板件表面的壓力作用，介於模具與板件之間的液壓油可提供潤滑作用，使其成品相較於傳統沖壓製程而言，具有較佳的成形性與表面品質。如此可針對複雜的產品外型進行較少階段的成形加工外，更可以有效的降低生產成本並縮短製程週期。此外，現今 3C 產品為了達到更優異的機械性質或擁有特殊金屬光澤，使用的材料也越來越多樣化，但以單一的貴金屬做為材料將大大提高產品的製造成本，因此利用結合兩種以上金屬材料的複合金屬，已成為現今材料的一個新的發展方向。如能有效結合多種金屬（如不鏽鋼、鈦、鋁或複合金屬）與液壓成形製程，相信定能展現出產業發展的彈性與競爭優勢。



圖 1.1 殼件以液壓成形製造的 3C 產品

1.1.1. 板液壓成形

液壓成形一般可依照加工產品的外型分為管液壓成形與板液壓成形兩大類，並依照成形時壓力給予方式與機台配置可細分為（表 1.1）所示的較常見的六種。

表 1.1 液壓成形的各式類別

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

管液壓成形之成形過程為將欲成形之管件置於模具之中，由兩端夾具將管固定並封住其開口，使管件處於密封狀態，之後由夾具中孔洞中灌入液壓油，利用液壓使管壁貼和模具達到所需之外形。

Tube hydroforming

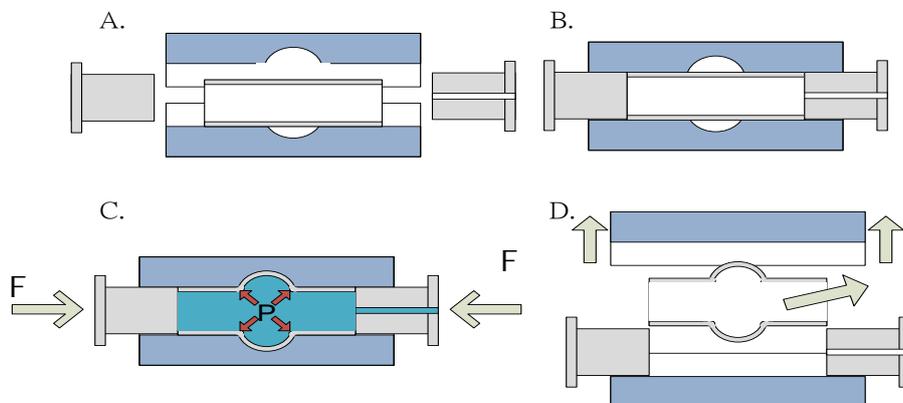


圖 1.2 管液壓成形流程示意圖

至於板液壓成形則是將板件置於一個存有液壓油的液壓室上方，利用壓料板給予夾持力固定板件，此一夾持力除了防止板件起皺外與翹曲外，亦可以防止液壓油從板件與下模具間流出；在成形過程中，可以經由液壓閥與沖頭衝程可以改變液壓力小，此液壓力可給予板件一個垂直表面的均勻作用力，使板件貼附沖頭達到所需的外型。

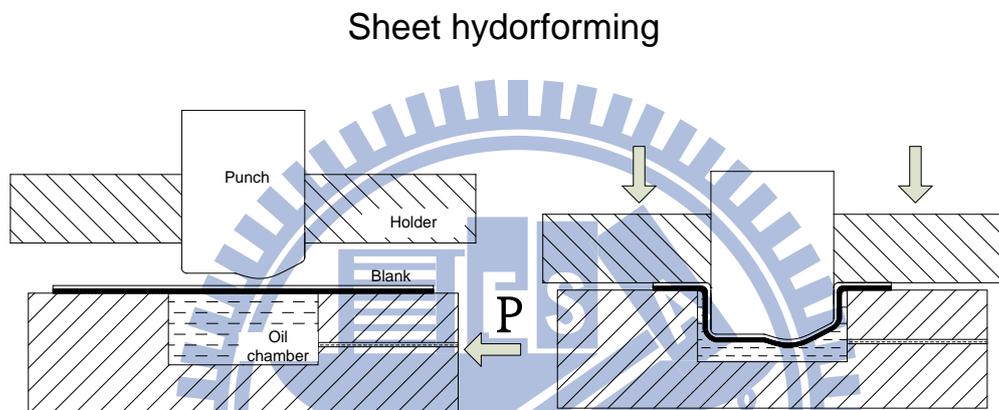


圖 1.3 板液壓成形流程示意圖

本研究將針對板液壓成形中的液壓深引伸(Hydromechanical Deep Drawing)進行研究。其成形原理為在傳統的深引伸加工製程中加入液壓(如圖 1.4)，板件表面在成形過程中受到液壓的均壓作用，在板件受到模具作用而發生塑性變形時，此均壓作用可以增進板件的成形極限，使得成形厚度更為平均，並能使其料片更貼附於沖頭模具，以獲得更精確的設計尺寸，同時，由於液壓油存在於板件與模具之間，可藉此減低其間的摩擦，獲得更佳的成形表面。但是在製程中，若選擇了不適當的材料、模具尺寸或製程參數，很可能造成成品部份區塊發生缺陷，如皺摺、破裂等現象(如圖 1.5)。

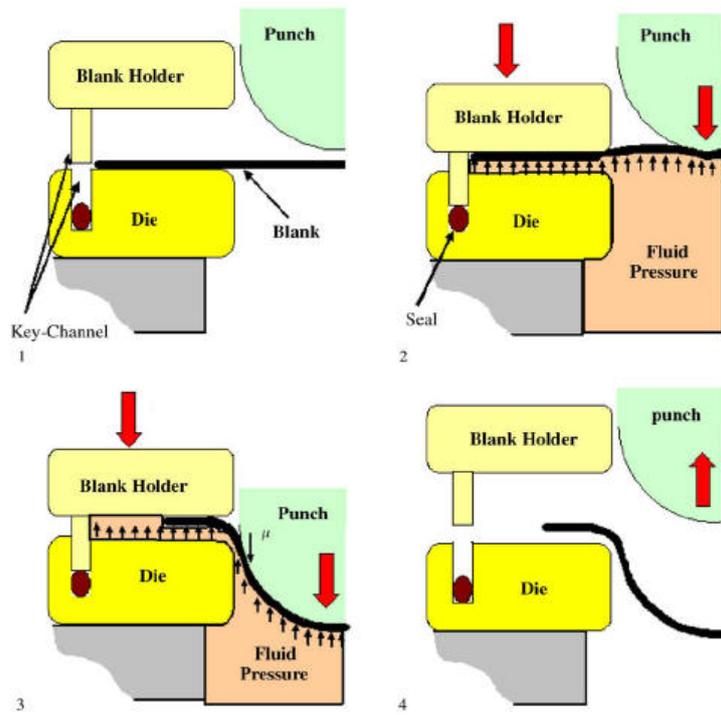
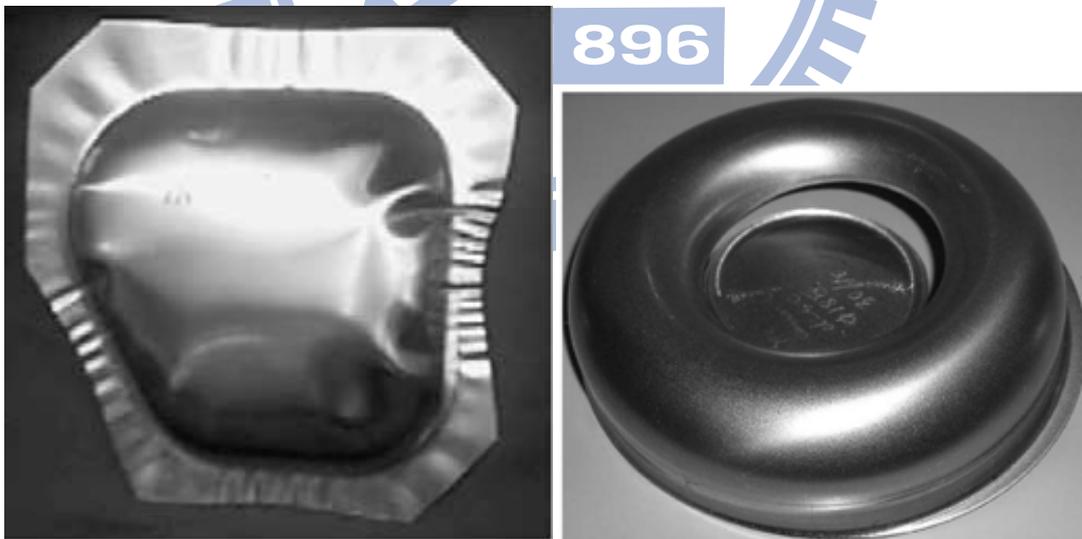


圖 1.4 板液壓深引伸成形流程示意圖[1]



(a)

(b)

圖 1.5 品質不良的板液壓成品：(a)皺摺、(b)破裂

1.1.2. 複合金屬板材

隨著各種產品不斷的推陳出新，對於材料的要求也愈趨嚴苛，除了良好的機械性質以外，耀眼的表面光澤、抗磨耗、抗腐蝕與輕量化等等都成為考量之一，因此單一金屬以漸漸無法兼顧如此多面向的需求，這使得可兼具多種材料特性的複合金屬應運而生。結合材料的方式有許多種，舉例來說，透過軋軋製程可以藉由材料表面間接觸的摩擦力使兩種或兩種以上的金屬材料合而為一。此種複合金屬不僅可以兼具材料特性，擁有優異的機械性質及表面特性，在應用面上更能符合產品設計之需求，而也因其材料的特殊組合，還可達到減輕重量、降低成本等目的。結合以上優點，複合金屬板材相當適合應用於對於產品殼件非常要求的 3C 產業，可以使產品的設計增加更多發揮創意的空間。



圖 1.6 軋軋製成的鈦鋁複合板材

1.2. 文獻回顧

Thiruvarudchelvan [2]等人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 1.7），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。

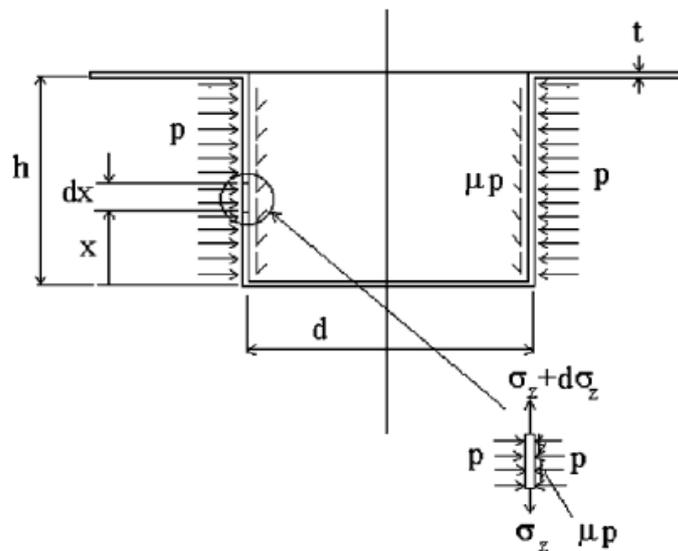


圖 1.7 成形過程中板件受液壓力作用示意圖[2]

Kleiner [3]等人探討在不同液壓力作用下，對於圓杯引伸的破裂情形，並對於成功引伸的成品探討其殘留應力值大小與製程參數的關係。

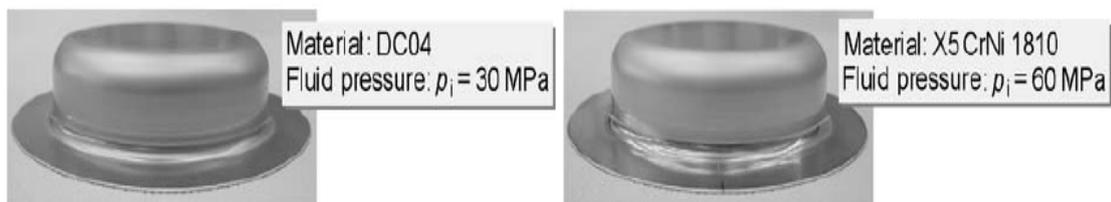


圖 1.8 不同液壓力對於圓杯引伸的破裂情形[3]

Dankert [4]等人利用無合模的圓杯引伸，探討在不同引伸比下的最合適的液壓力與壓板力，並與實驗參數做比較以驗證模擬的真實性。

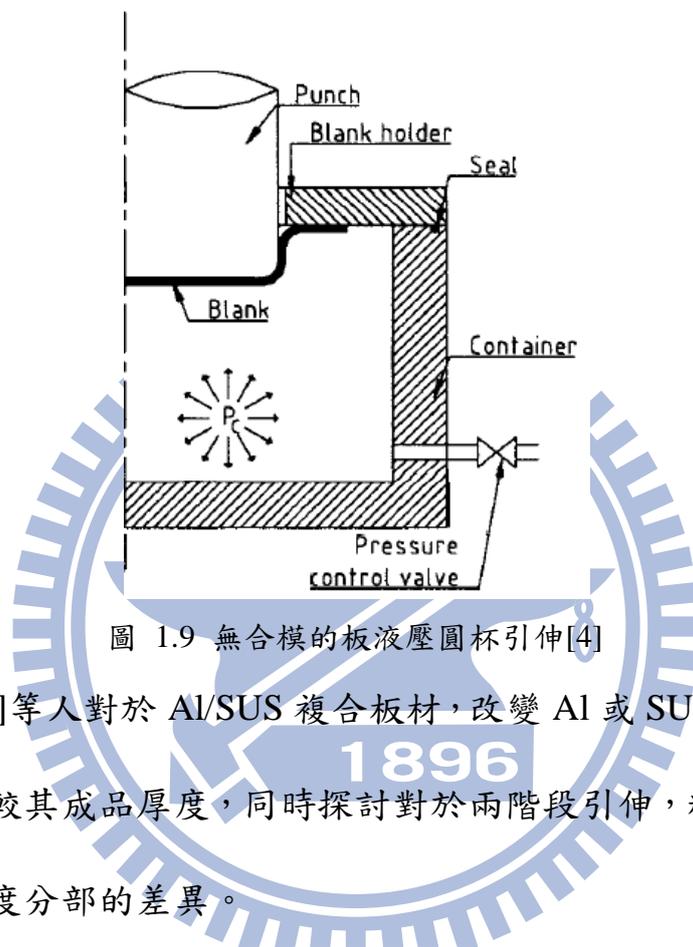


圖 1.9 無合模的板液壓圓杯引伸[4]

Parsa [5]等人對於 Al/SUS 複合板材，改變 Al 或 SUS 貼附沖頭進行引伸並比較其成品厚度，同時探討對於兩階段引伸，料片有無反摺對於成品厚度分部的差異。

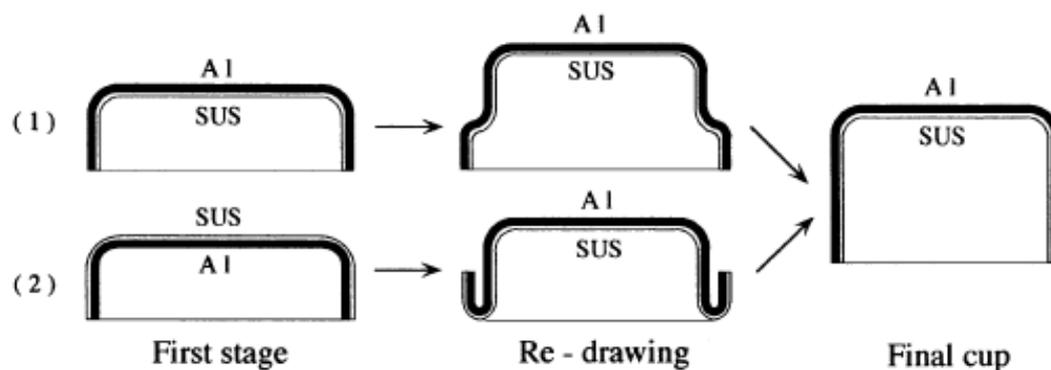


圖 1.10 複合金屬兩階段有反摺與無反摺引伸[5]

Tseng [6,7] 等人藉由調整不同的板液壓製程參數（壓板力、液壓力與模具間隙）觀察 3C 產品電池背蓋模型之成形；結論為 0.45mm 厚之鈦鋁複合板件(Ti/Al clad sheet)可有效達到與單一板材相同的成形性，如圖 1.11 所示；SUS 及鈦鋁板件其厚度分佈比較如圖 1.12 所示。



圖 1.11 鈦鋁複合板成形後殼件無破裂[6,7]

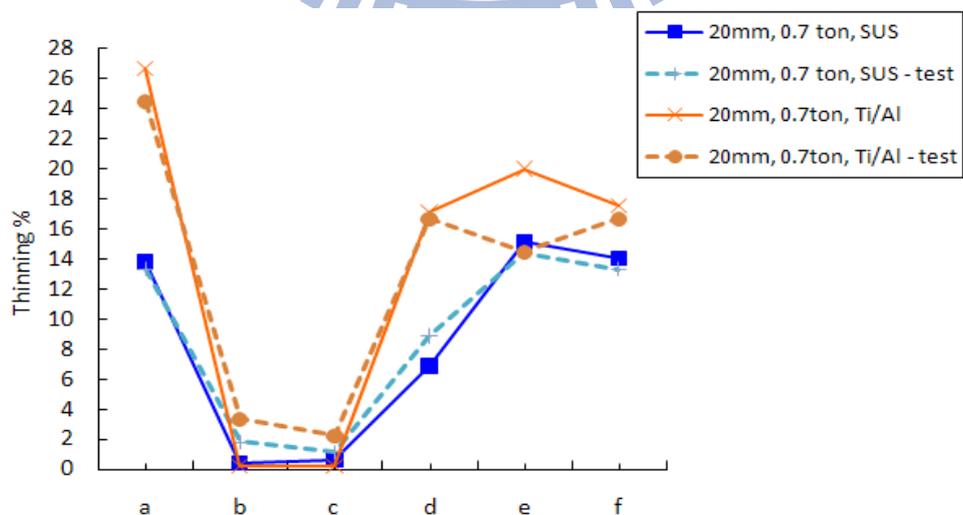


圖 1.12 各量測點位之薄化率分佈實驗與模擬比對 [6,7]

Swadwsh [8]等人藉由改變模具上緣部分的側壁斜角與給予不同的最終液壓室壓力，探討對圓杯深引伸成形極限的影響，發現給予適當的終壓與斜角可以提升成形極限。

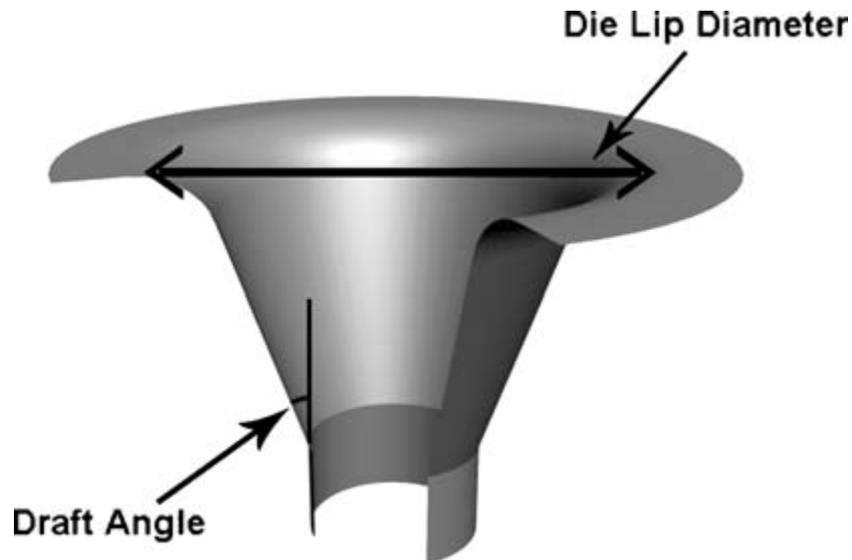


圖 1.13 改變模具上緣部分的側壁斜角之研究[8]

1.3. 研究動機與目的

從相關文獻中可以得知，板液壓成形應用於深引伸將可得到較傳統深引伸更高的引伸比，且在液壓力作用下亦有助於板件貼附沖頭，因此可用更少的階段來製造出複雜的外型；但對於某些具稜角與高引伸量的產品設計，則無法在單一階段即完成所要求之外型，所以須規劃多階段之沖頭與模具外型以達到成形之目的。此時若以有限元素模擬來輔助模具之開發，將可加速開發速度與減少模具製作成本。而近年來，複合材料的應用也愈來愈受重視，許多金屬成型也紛紛選用複合板材做為素材，希望能結合不同材料之特性來達到嚴苛的產品需

求。

因此，本研究希望能結合板液壓成形與複合板材之特性，以外型較複雜的相機外殼做為載具（圖 1.14），利用有限元素法來模擬分析以取得較適當的製程參數，並適當的修改其模具外型，而後與實驗相互驗證，希望能藉此減少製造時所需的階段並提升產品品質，以提供未來製程與模具設計之參考。

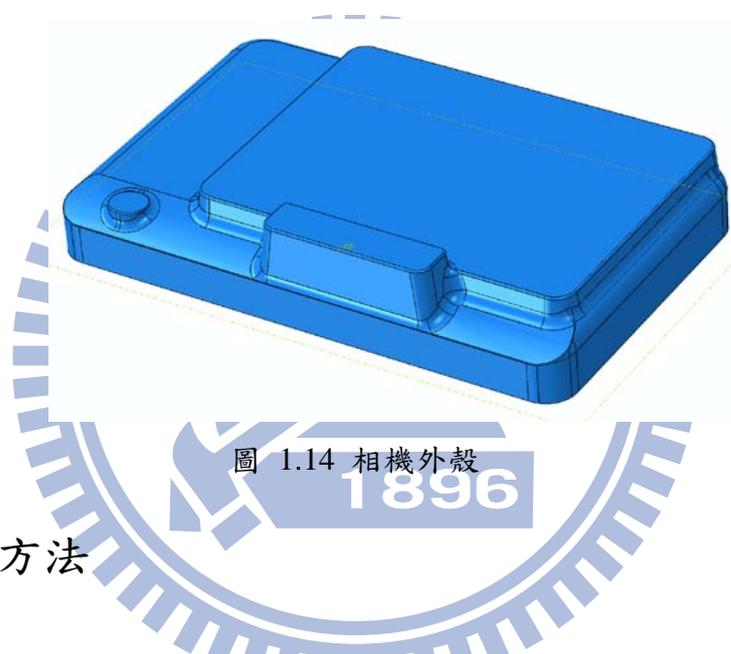


圖 1.14 相機外殼

1.4. 研究方法

本研究將使用多種金屬如：鈦鋁(Ti-Grade 1/A1050)複合金屬板材、不鏽鋼(ASUS304)、鋁(A1050)與鈦(Ti-Grade 1)做為板液壓成形之板件，並將所選用之載具分割為上下兩部分得到兩階段之沖頭與模具外型，以有限元素分析板液壓製程中板件厚度的變化狀況，以預測其成形性。

首先透過材料試驗取得板材之機械性質，將取得之材料參數帶入有限元素軟體 ABAQUS 進行模擬分析，藉由量測實驗成品之各部分

厚度分布與模擬結果做比較，在修改並且確認模擬之準確性後，將藉由改變不同製程參數與使用不同加工工序來對板件做成形分析，以此比較其優劣並取得一組較佳之配對，使得所成形之成品厚度分布較為均勻且與最初之設計外型貼近。最後再以此一製程參數進行實驗驗證，並比較其與初始參數之差異，證實此一參數設定與加工工序能順利做出成品並得到較優良之性質。

1.5. 論文內容介紹

本研究中所使用之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）、現有結果討論與後續工作（第五章）進行詳細介紹。

第二章 材料性質與試驗

在使用某種材料前，必須透過材料試驗來了解其各方面性質，而在本研究中則將對於複合板材之成形做分析，因此將透過材料試驗求得鈦鋁複合板材之彈性係數、真實應力/應變曲線與非等向性等，以了解此一材料之成形性，並做為後續有限元素分析之依據。

2.1. 拉伸試驗

2.1.1. 試驗目的

本研究中所使用之鈦鋁複合板材為將初始厚度為0.5mm的Ti-Grade1與1.0mm的A1050兩種材料經由一次冷軋軋至所需厚度0.8mm。由於鈦的退火溫度約為650~760°C [8]，而鋁的熔點卻只有約為660°C [9]，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），並且由於兩材料不同的熱膨脹係數，在冷卻時亦會使板件有殘留應力。所以在無法有效取得鈦及鋁兩層材料在經過軋壓與退火後個別的材料性質的情況下，本研究考慮將鈦鋁複合板材視為一等效且均質(homogeneous)之材料來對其做材料試驗，以此求得基本機械性質，如：彈性係數、塑性性質及異向性材料之塑性應變比值等，而其餘單一板材亦將進行拉伸試驗取得其機械性質，以此帶入有限元素分析進行後續之模擬。

2.1.2. 彈性係數與指數定律

由單軸拉伸試驗可得到材料之真實應變與機台拉伸力，透過換算可以得到材料的工程應力，但在後續在模擬過程中，則是需要真實應力/真實應變數據，透過 2.1 式換算可以得到所要的數據，但此公式僅適用於材料未發生頸縮前之均勻變形，當頸縮發生之後已不再次單軸拉伸，因此將不考慮頸縮後之數據。

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

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(mm²)、e：工程應變

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[10]。

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

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

其中， ε_T^p ：真實塑性應變、K, n：常數

2.1.3. 異向性

由於本研究使用之鈦鋁複合板材為冷軋軋所得，且並未為達到完全退火，因此將考慮為異向性(anisotropic)的材料並探討其方向性。

在考慮鈦鋁複合板材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 值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[11]。

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

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

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

其中， $d\varepsilon_t$ ：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_t 為橫座標作圖，利用線性迴歸以求得斜率 S ，再由式2.6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共和電業公司(KYOWA)所生產之一般常溫型單軸拉伸應變規KFG-1-120-C1-11L3M2R。



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[12]，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，厚度則為 0.8mm。另外，由於考慮鈦鋁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，由於受限於料片數量在各方向僅能使用兩片試片。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 0.02mm/s 以進行實驗；設定擷取器之擷取速率為 50times/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。

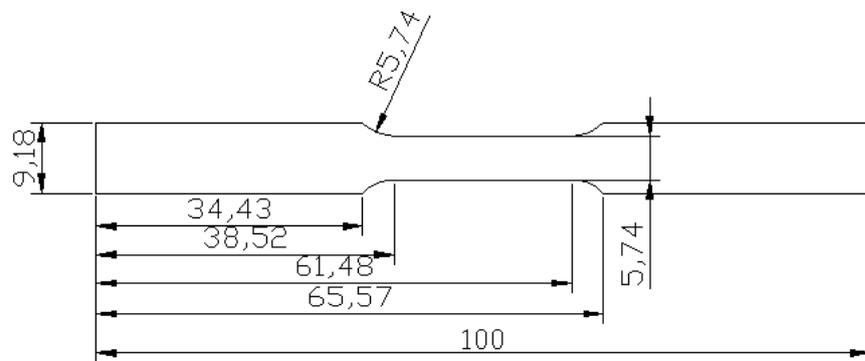


圖 2.2 拉伸試驗試片尺寸圖(mm)

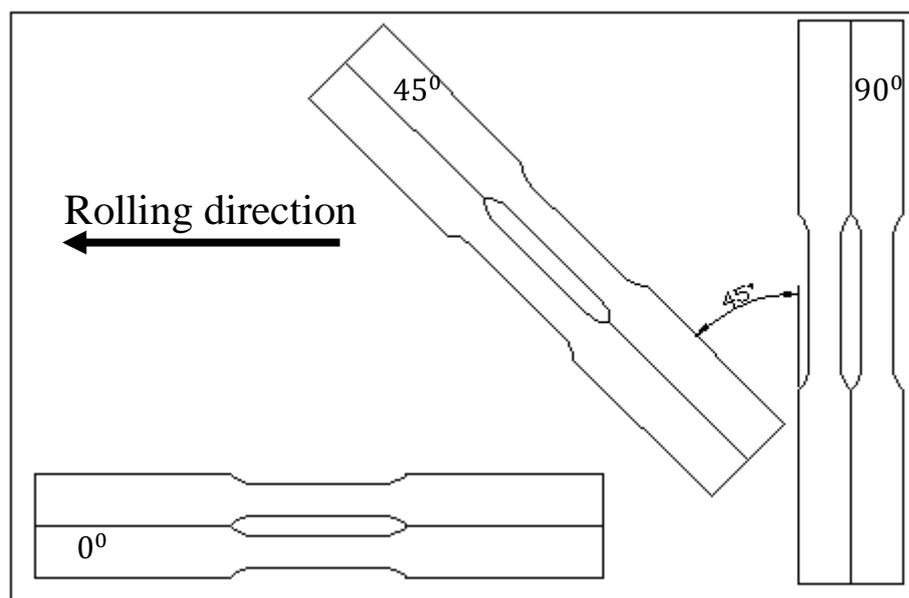


圖 2.3 鈦鋁拉伸試驗試片配置圖

圖 2.4 為拉伸試驗所得到之鈦鋁複合板材在 0° 、 45° 與 90° 三方向之真實應力/真實應變曲線，考慮到材料因為經過輥壓後無法消除殘留應力，而無法取得十分平整的試片，在加上試片較薄且材料較軟，造成拉伸試驗機在夾持時的材料就有部份的變形產生，觀察所得的拉伸曲線圖可以發現除了在 0° 方向在彈性區有稍微不同外，在進入塑性區域後鈦鋁複合版材的強度與斜率皆相同，考慮到實驗時之誤差，因此後續將不考慮版材之方向性，而使用圖 2.5 之拉伸曲線來帶入模擬時使用。

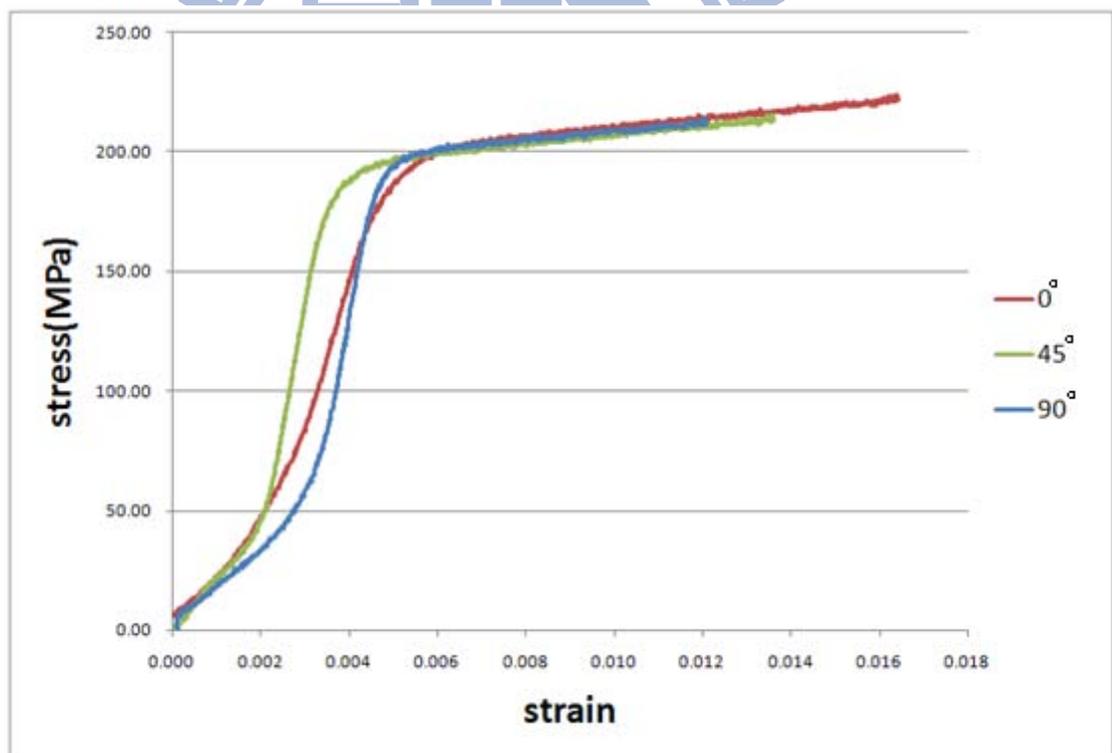


圖 2.4 鈦鋁複合板材真實應力/真實應變曲線

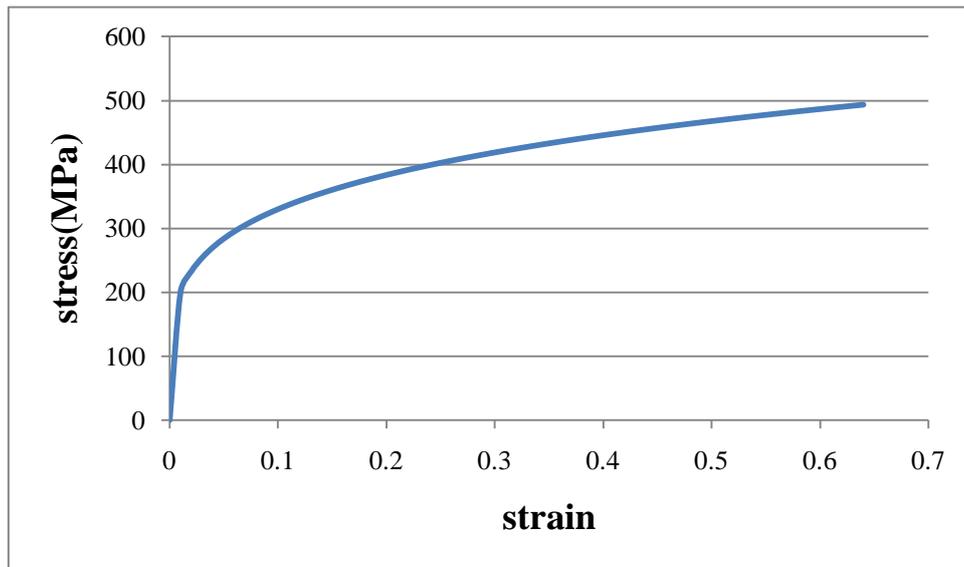


圖 2.5 鈦鋁複合板材近似之真實應力/真實應變曲線

除了鈦鋁複合板材以外，因此本研究亦針對業界常用之版材 SUS304 與 A1050 作拉伸試驗，得到此兩種材料之拉伸曲線帶入模擬來做後續與實驗比較，圖 2.6 與圖 2.7 為 SUS304 之真實應力/真實應變曲線與其近似之真實應力/真實應變曲線；而圖 2.8 和圖 2.9 則為 A1050 之真實應力/真實應變曲線。

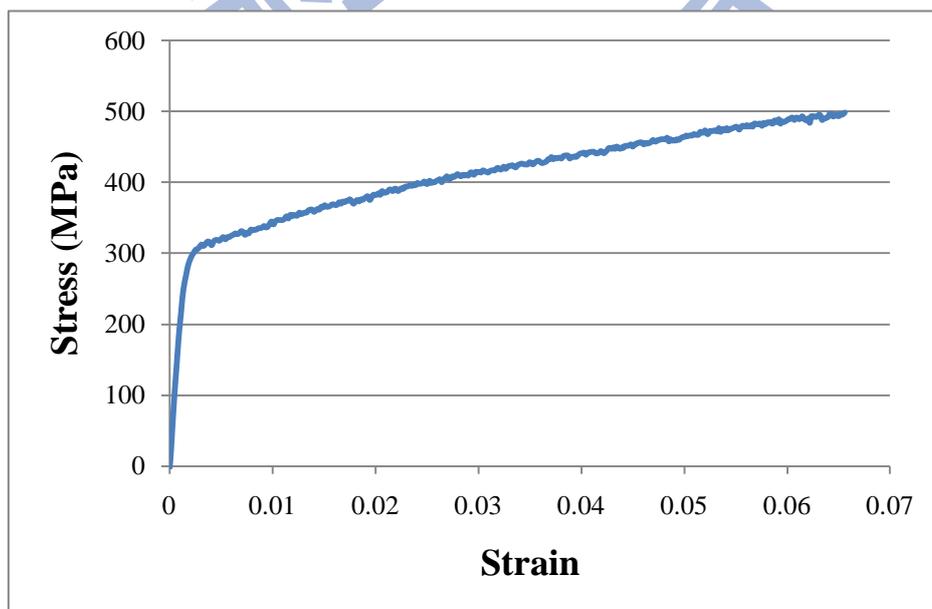


圖 2.6 SUS304 實驗真實應力/真實應變曲線

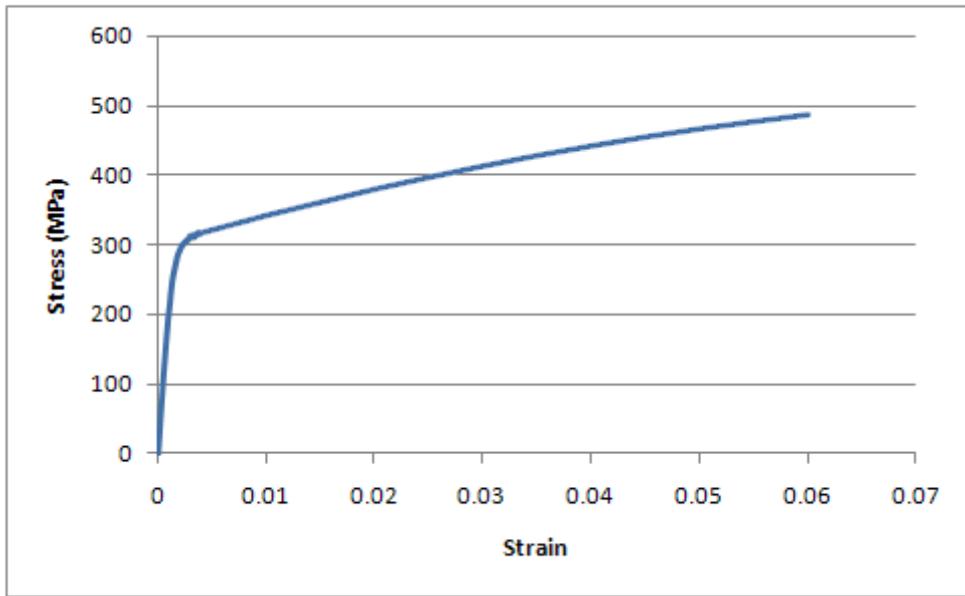


圖 2.7 SUS304 近似之真實應力/真實應變曲線

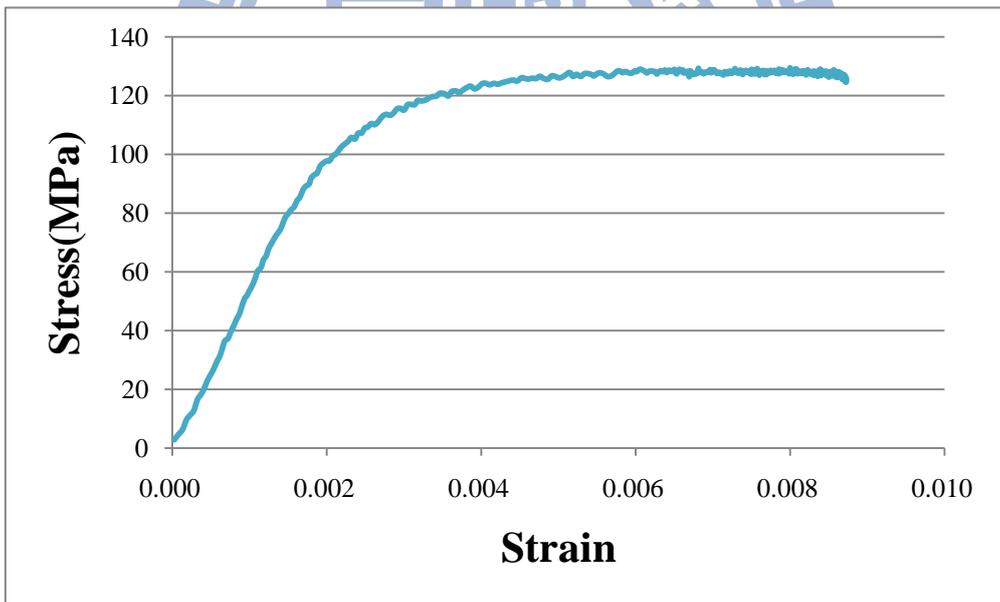


圖 2.8 A1050 實驗真實應力/真實應變曲線

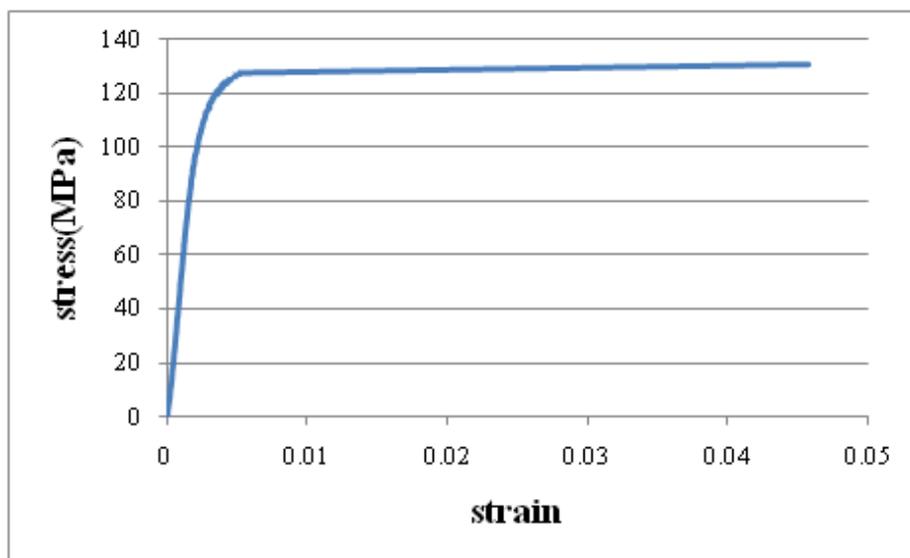


圖 2.9 A1050 近似之真實應力/真實應變曲線

在進行拉伸試驗的時候，應變規皆有提前脫落的現象產生，因此所得之真實應力/真實應變曲線在塑性區的延展性都小於材料表上之材料極限，在加上三種材料在塑性區域都維持一個固定斜率，所以將對塑性區做些微延伸而得到近似之應力/真實應變曲線，帶入後續模擬。

本研究亦針對鈦鋁附合板材中所使用的另一材料—鈦(Ti-grade 1)作拉伸試驗，觀察其應力/應變關係作為後續之參考。由圖 2.10 可以發現，鈦鋁複合板材中使用的鈦在剛進入塑性區域時會有些微軟化的現象，經過比對多組實驗數據之後，確定此為材料特殊性質而非實驗誤差。

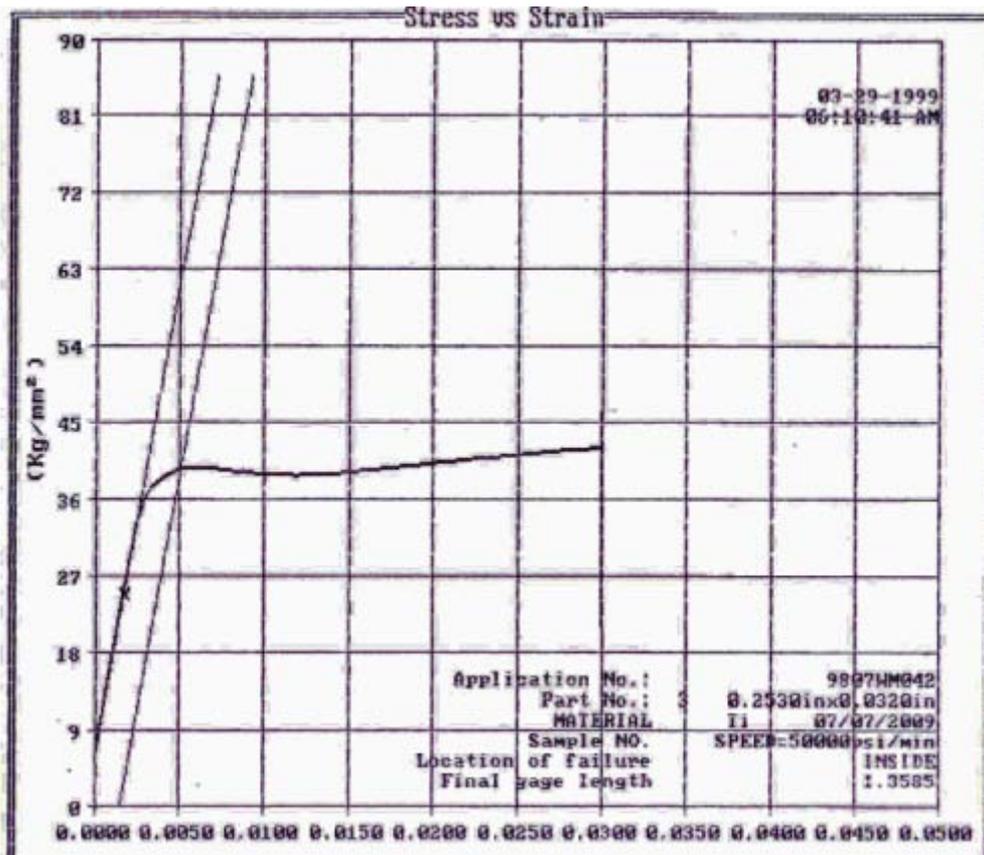


圖 2.10 鈦之真實應力/應變曲線圖

第三章 有限元素法

由於科技的快速發展，設計物件趨於複雜與精密，在製程中所需控制之製程參數也隨之增多，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。運用此類電腦輔助工程分析(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。

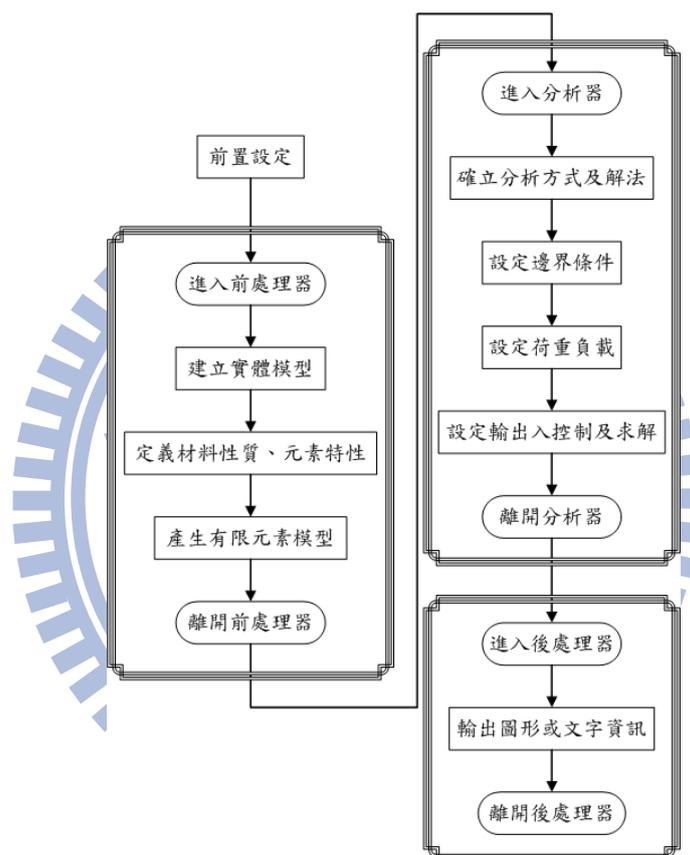


圖 3.1 有限元素軟體之分析流程圖[13]

(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（高溫金屬軋製或板金沖壓）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，例如金屬成形的問題[14]。

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) 假設鈦鋁複合板材之接合面為完美接合，並視其為一均質之彈塑性(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. 多階段工序與輔助母模

在一般深引伸(deep drawing)的製程中，時常可見透過多階段引伸的方式達到高引伸率的長筒形部件，在成形製程中，對於較複雜的產品幾何外型，局部高引伸率的特徵，通常也是需要透過多階段工序的加工，避免在單一階段中產生過大的應變變形，而發生破裂的情形，

此外對於產品外觀具有微細的幾何特徵，也無法經由沖頭直接成形出符合標準的產品外型，故需增加下模具的設計，以克服較困難的產品外型。

本研究將使用數位相機外殼作為板液壓成形之載具，其殼件外形如圖 3.2 所示，其具有一隆起並在側壁呈 90 度的幾何特徵，若直接使用單一階段成形會造成此處應變過大導致板件破裂；此外，本研究所使用之載具在側邊亦具有一微細的圓形曲面，為成形精細的幾何特徵，必須增加輔助母模的設計來幫助成形，來得到所需之外型。

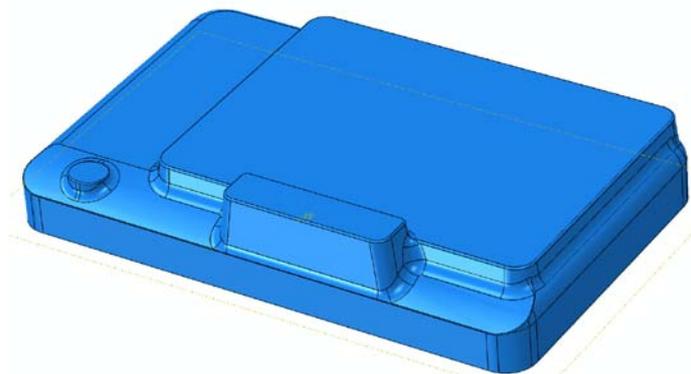


圖 3.2 數位相機幾何外型圖

3.4.2. 取得模具幾何外型

由於上述之考量，本研究將建立一個具有多階段工序與輔助母模之有限元素模型，由於僅有相機外殼其成品設計之 CAD 圖檔，因此其沖頭與下模具（上述之輔助母模）之模型將透過量取相機外殼之內外平面尺寸規格，並適當調整其間隙，再以 CAD 軟體加上導角、延伸區面與修補等等（如圖 3.3），之後將 CAD 軟體所匯出的圖檔匯入

ABAQUS，而後參照板液壓成形機台模具配置（如圖 3.4）將之組合在一起。

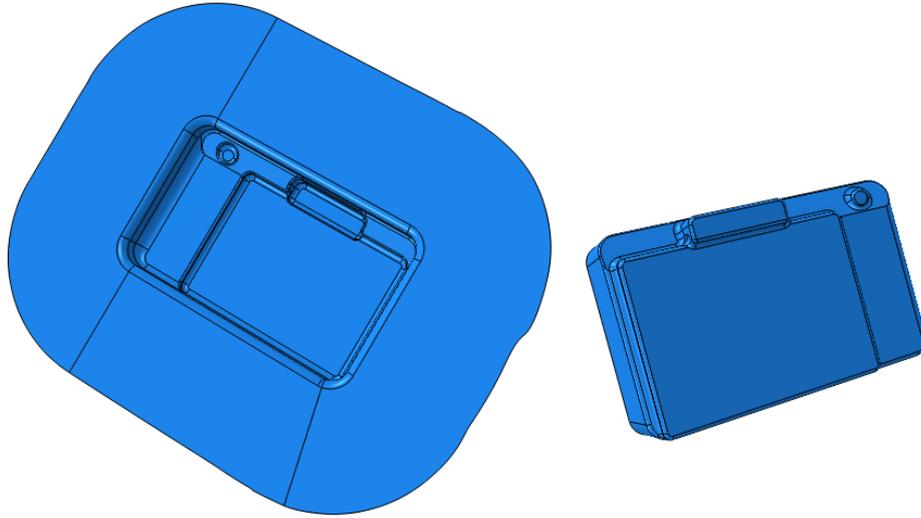


圖 3.3 模型沖頭及下模具之幾何外型

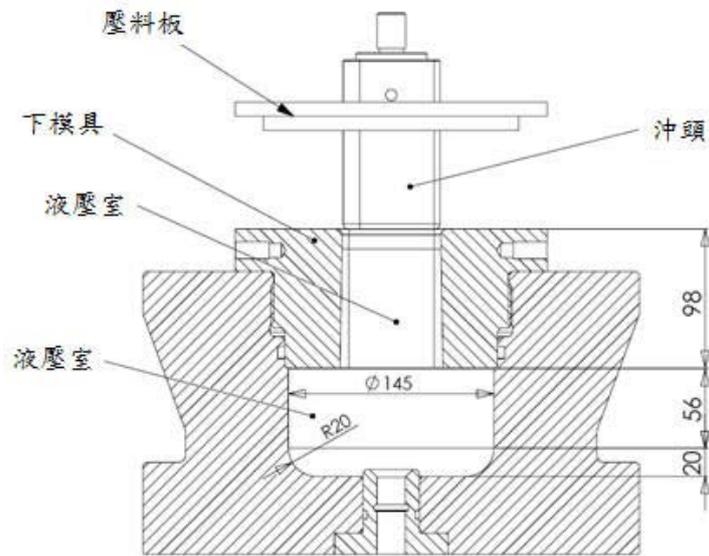


圖 3.4 板液壓成形機台模具配置圖(單位：mm)

3.4.3. 網格劃分

在進行分析前，需建立模具與複合金屬板件之有限元素模型，由於所採用之載具外型較為複雜，因此需建立一個完整之三維模型來進行模擬分析，其有限元素模型如圖 3.5 所示。其中在模具與沖頭的部分，本研究考慮到多階段製程的模擬，因此依照不同的分割方式建構出以下之沖頭與下模具外型（如圖 3.6、圖 3.7），後續並依據不同模擬條件，套用不同模具組合。

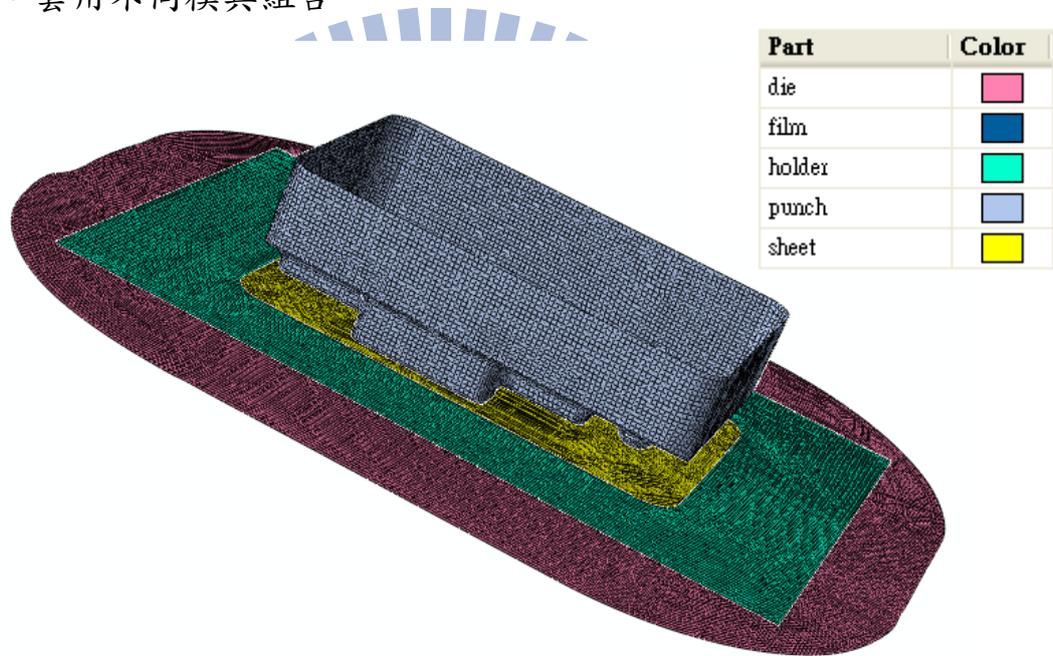


圖 3.5 有限元素模型

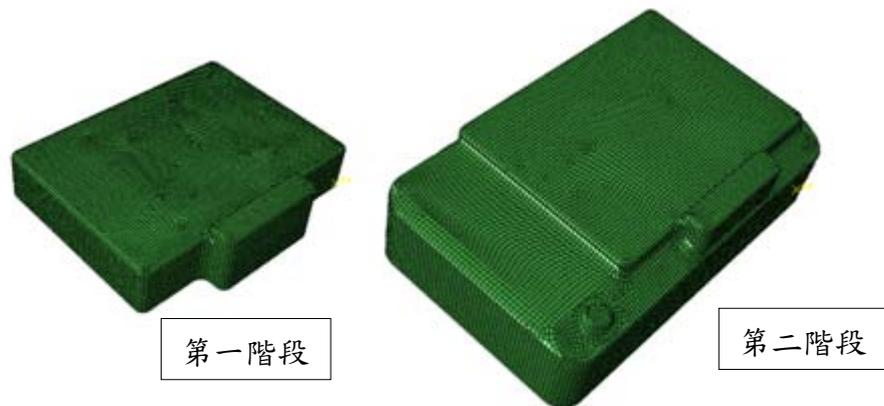


圖 3.6 不同階段之沖頭有限元素模型

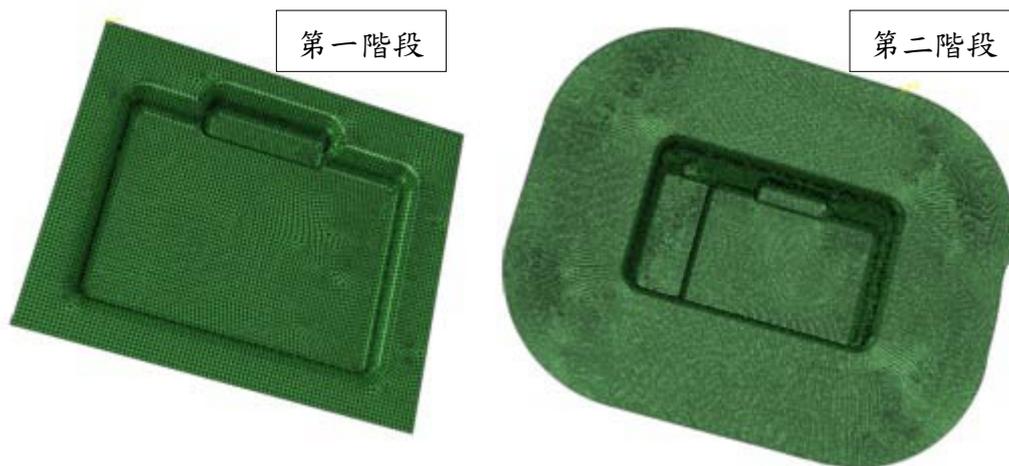


圖 3.7 不同階段下模具之有限元素模型

本研究使用了在厚度方向有 5 個積分點的殼元素(shell element)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可變形體結構。在金屬板件的部份，採用的是上述殼元素中的 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[15]。

3.4.4. 材料及元素性質給定

除了金屬板件外，模具與沖頭都視為剛體，將以第二章材料性質試驗所得之真實應力/真實應變曲線帶入有限元素軟體模擬板材受力後的變行情形，並假設材料為均質性。

3.4.5. 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
- d. 板件與下模具內部

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[16、17]進行設定，在不存在液壓油之接觸對(a、b、c)設其庫倫摩擦係數為 0.1，存在液壓油之接觸對(d)設其庫倫摩擦係數為 0.05。

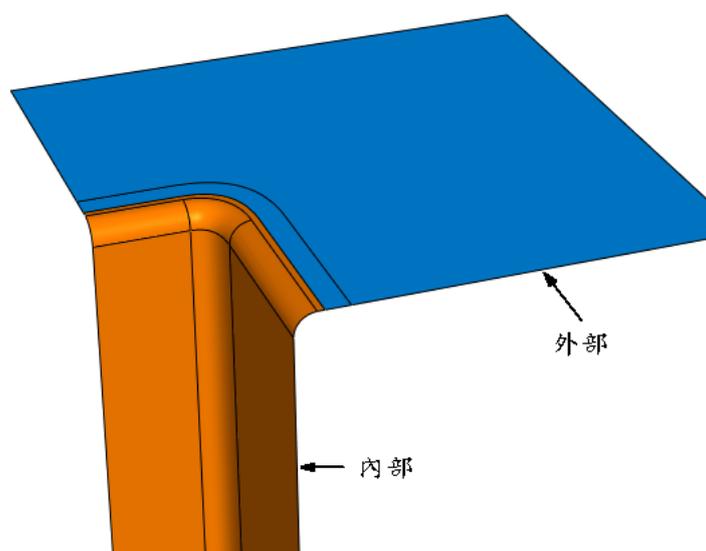


圖 3.8 下模具之內、外部示意圖

3.4.6. 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 3.9所示，為省去不必要計算時間，將不考慮沖頭為與板件接觸前之歷程，因此給予沖頭自接觸板件表面後向下位移，並給定壓料板一作用力作為夾持試片。

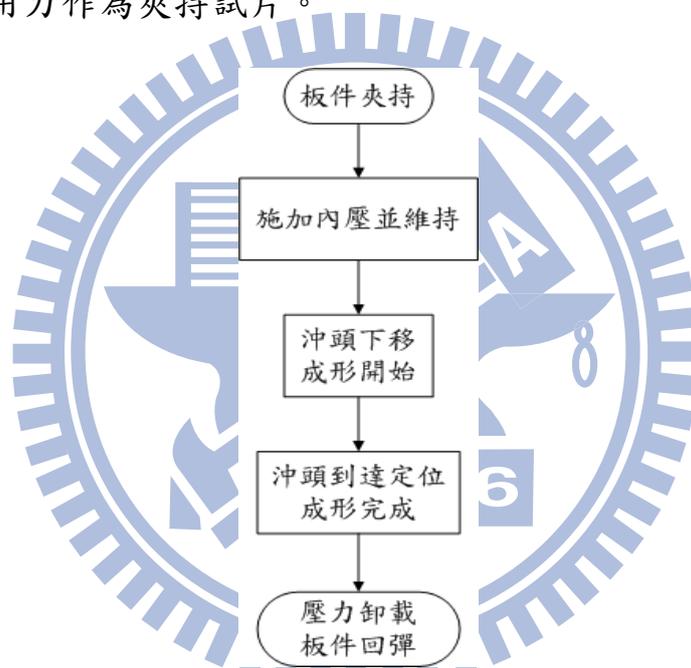


圖 3.9 板液壓成形製程圖

此外，由於在實際板液壓成形時，液壓室的壓力是作用於試片上，然而在模擬設定中由於板件會隨著沖頭下移而使得進入液壓室受到液壓力作用的面積逐漸擴大，如圖 3.10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；但當沖頭下移後板件開始變形後，A、B點皆有受到液壓室的壓力作用。

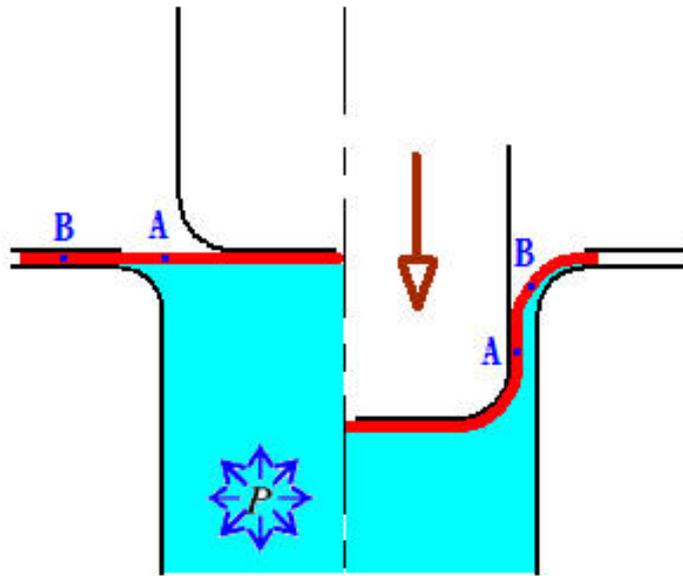


圖 3.10 板液壓製程板件變形受力示意圖

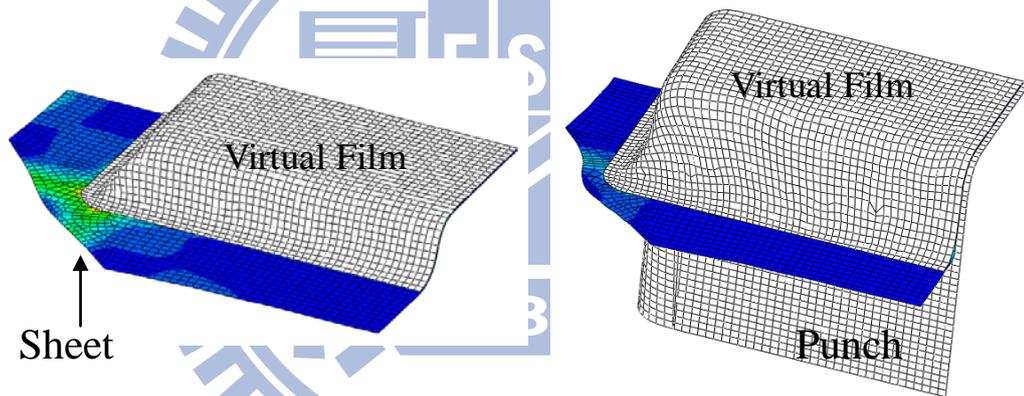


圖 3.11 虛擬薄膜模擬板件受液壓力示意圖

故在此利用建構一虛擬殼元素以作為壓力的施加面（如圖 3.11），隨著沖頭下移、板件變形，此薄膜也將跟著變形並貼附於板件表面，如此將可以解決板件外型變化時壓力給定困難的問題。設此虛擬殼元素為彈性材料， E 值為 8GPa （鈦鋁複合板材的 E 值為 62GPa ），厚度 0.01mm ，其與板件間的接觸設為零摩擦。此一設定已於去年韓忠諭學長以手機背蓋模型之實驗驗證[18]，證實可準確模擬出板件受液壓

之狀態，因此本研究中將使用此一虛擬殼元素做為液壓力之施加。圖

3.12則為邊界條件施加示意圖。

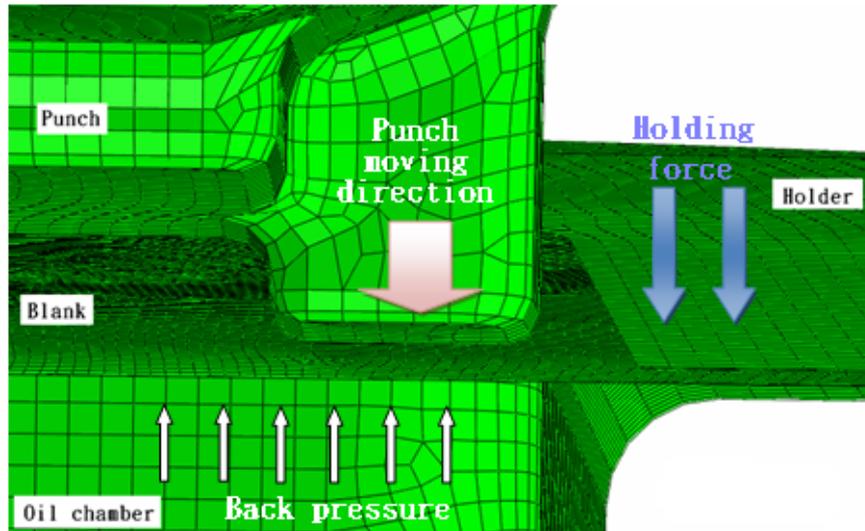


圖 3.12 邊界條件設定示意

因為本計畫將針對多階段製程做分析，因此在有限元素模型將初步分成兩階段模擬不同階段時的沖頭、下模具與板件的接觸情況。在第一階段時板件僅與第一階段沖頭、下模具、壓料板及虛擬薄膜設有接觸；而在第二階段則取消第一階段的沖頭和下模具的接觸條件，改以第二階段的沖頭與下模具接觸(圖 3.13)。在液壓力部分，將考慮模具拆除時液壓力之升降，而在第一階段採取一線性壓力曲線，第二階段沖頭下移一段距離後才與板件接觸，此時，壓力曲線才往上提升，如圖 3.14 所示。

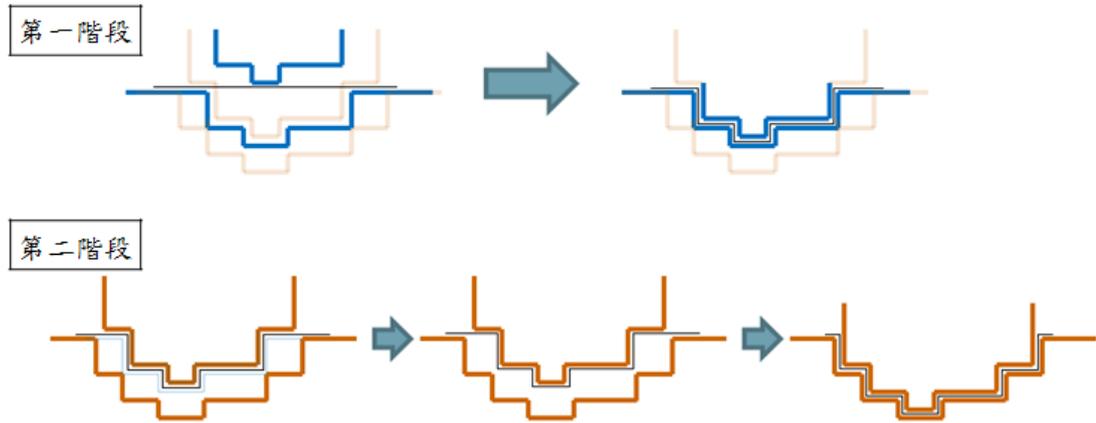


圖 3.13 兩階段成形之接觸設定

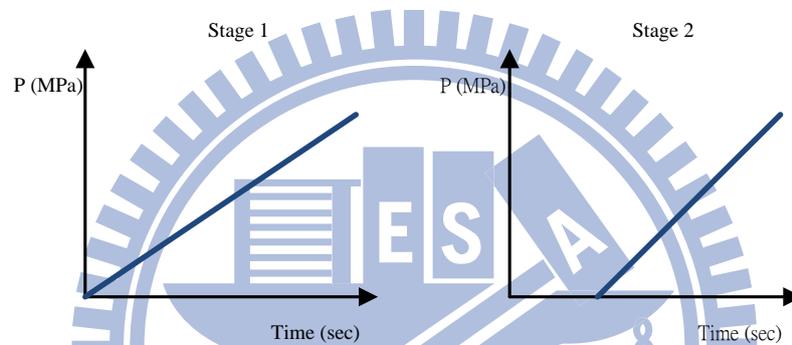


圖 3.14 第一/二階段施加之液壓力曲線

由於本計畫採用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，往往在計算效率上是不實際的，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[15]。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 3.15），用以決定得到適當的靜態響應所需要的時間。

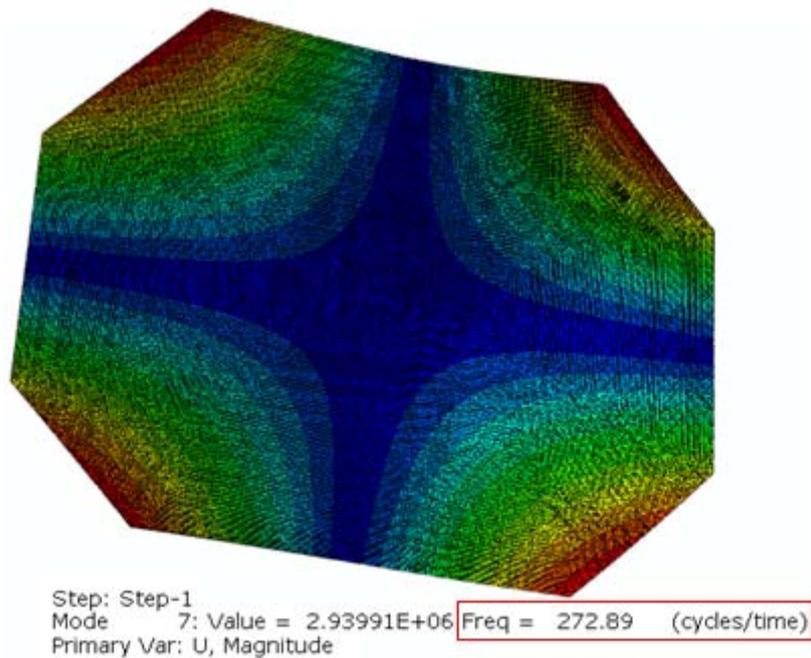


圖 3.15 板件最低階模態頻率分析圖

3.4.7. 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。一典型的內能與動能變化分析結果如下圖 3.16 所示，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。若分析符合準靜態，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，再加上已經忽略慣性

力，因此動能也應該很小。

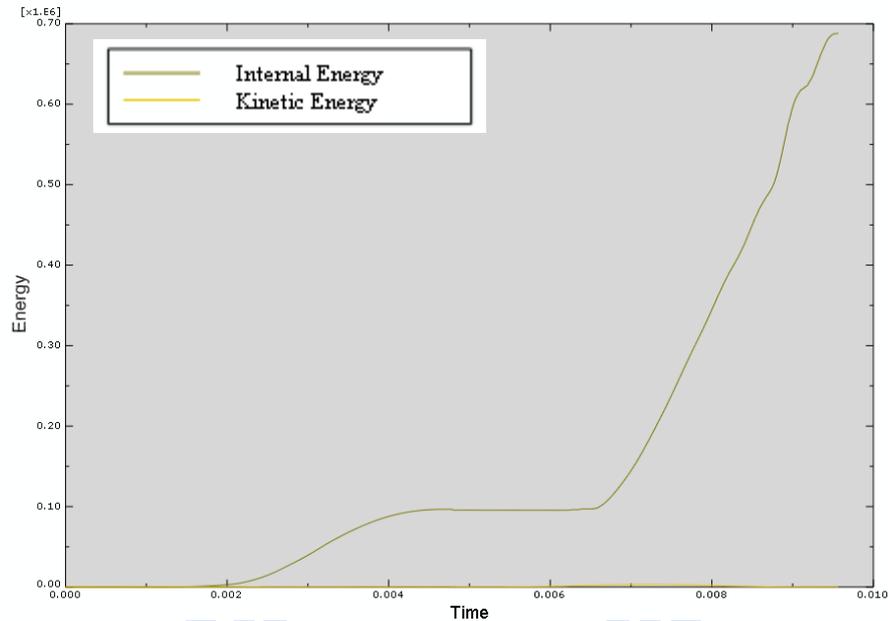


圖 3.16 分析歷程中之動能與內能變化圖

3.5. 網格收斂性測試

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，但過分的切割元素也可能因此累積出數值誤差使得誤差增加，並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。

由於本研究所使用之載具外形會造成成形過程中板件局部薄化的現象，並且此處的薄化現象對網格尺寸的改變相當敏感，因此將取此一部份之最小厚度作為收斂性測試之標準，收斂性測試結果如下圖所示，從收斂性測試結果可以看出，當網格邊長為 0.5mm 時板件最

小厚度值趨於一致，因此後續將使用 0.5mm 的網格尺寸做為後續有限元素模型的網格劃分標準。

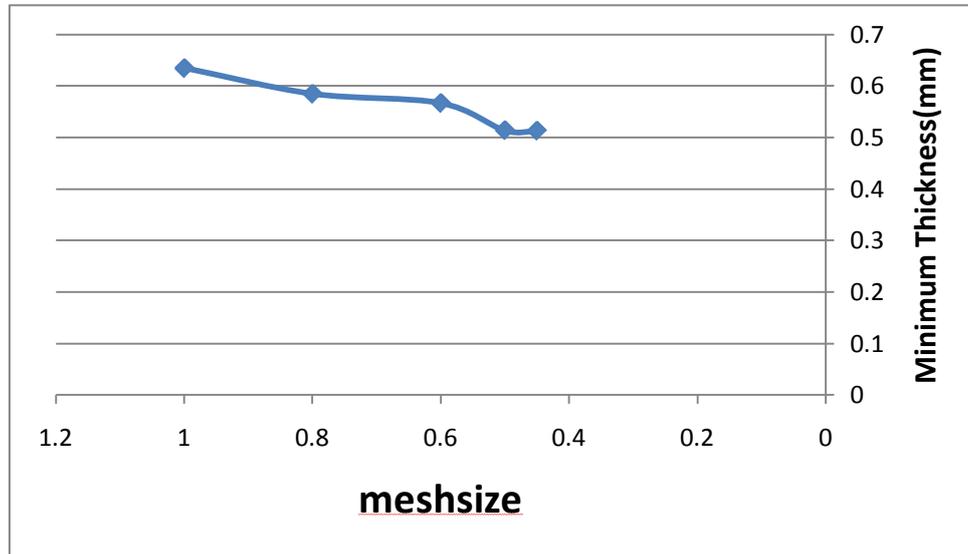


圖 3.17 網格大小與板件厚度關係圖

本研究先取得使用之載具—複雜外形像機殼之設計圖檔，根據圖檔之大小繪製出模具，之後匯入有限元素軟體根據製程方法設定各階段之接觸條件，並參考文獻設定合理之接觸面摩擦係數，帶入拉伸試驗所得之材料性質，最後取得板件之自然頻率來設定計算之最小時間，使模擬時有限元素模型之動能內能比合乎要求，與透過收斂性測試得到適當之網格尺寸，以求得到準確的計算結果，而且模擬結果與實驗之比較將於下個章節討論。

第四章 板液壓成形之模擬結果

由於板液壓成形塑性變形的過程中，不同的模具輪廓設計與配置，不同的製程參數，都將會影響複合板材之成形性，也會影響後續的板件回彈量。因此適當的設計不僅能提高其材料成形性，使得工件能夠作較大的變形行為，更可使得產品符合設計之規格。因此本章將針對改變各種製程參數、模具外形與不同加工階段，來探討其液壓成形中對板件成形性的影響。

4.1. 板液壓成形驗證實驗

為了驗證板液壓成形模擬之可行性本研究將使用由金屬工業研究發展中心提供之板液壓成形機台，來完成相關之板液壓成形實驗。此機台為日本 Amino 公司生產之液壓成形機台(如圖 4.1)，而實驗所使用之模具外型則如圖 4.2 與圖 4.3 所示。所使用的料片尺寸為厚度 0.8mm 的 A1050 與厚度 0.9mm 的鈦鋁複合板材，而兩種板件之長寬皆為 128*95mm 並在四邊各給予 45° 的截角，截角邊長(chamfering width)為 25mm，如圖 4.4 所示。



圖 4.1 板液壓成形機台

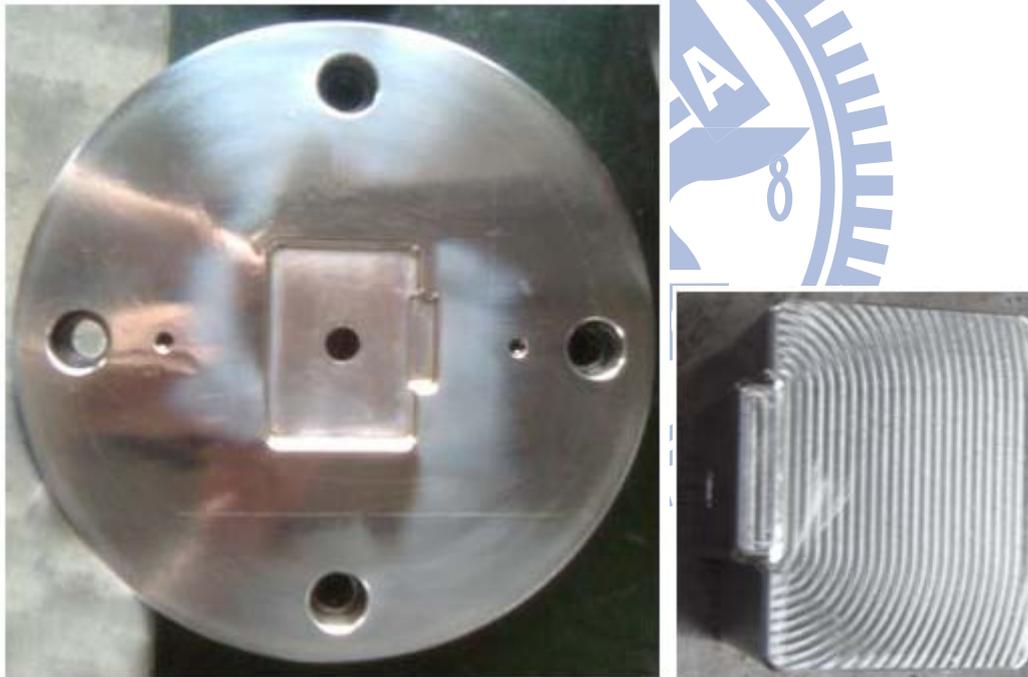


圖 4.2 第一階段之下模具與沖頭外型



圖 4.3 第二階段之下模具與沖頭外型

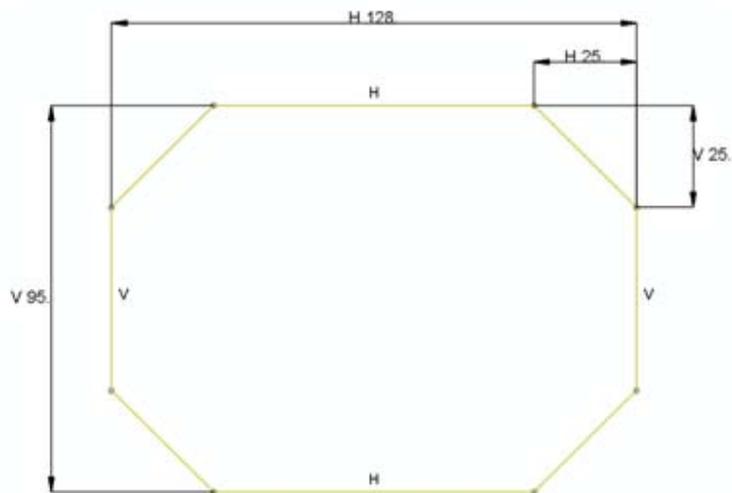


圖 4.4 料片尺寸

進行板液壓成形時，沖頭與下模具之間隙為 1.0mm，略大於板件厚度，整個製程分為兩階段進行(圖 4.6)，在第一階段沖頭自接觸板件後向下位移 2.8mm，第二階段則在向下位移 13.7mm，總共位移為

16.5mm；而兩階段之壓料板力則都維持為 1 噸，在第一階段成形時不施予液壓，第二階段施予液壓成形結束時液壓力到達 16MPa，其液壓歷程如圖 4.5 所示。

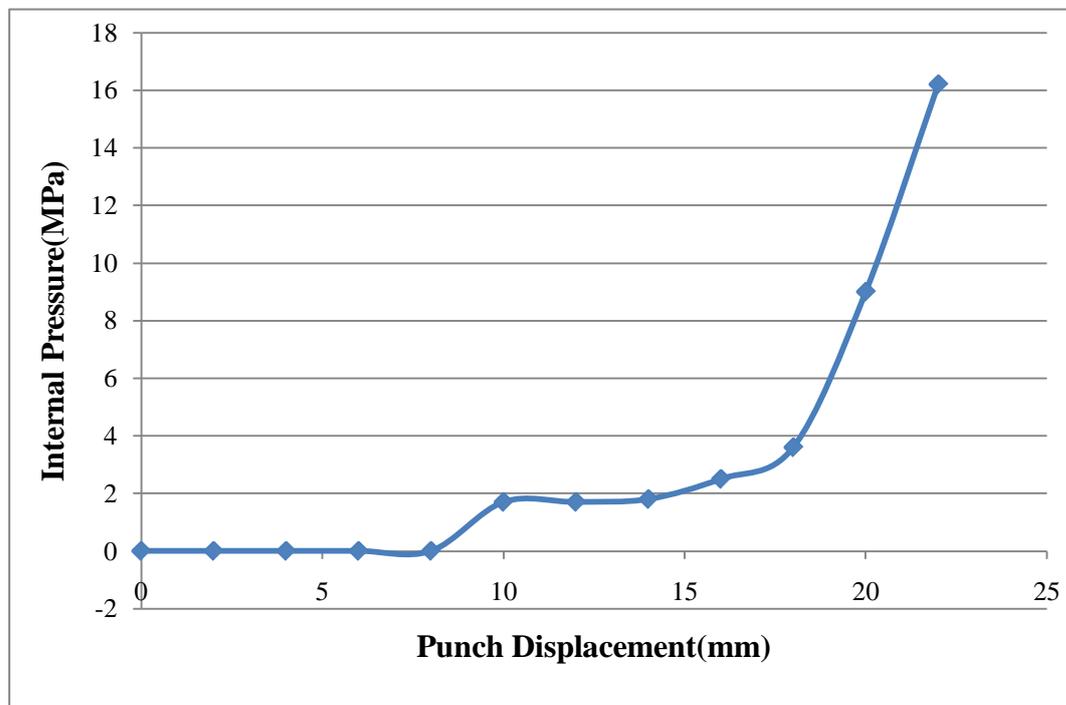


圖 4.5 第二階段液壓力歷程

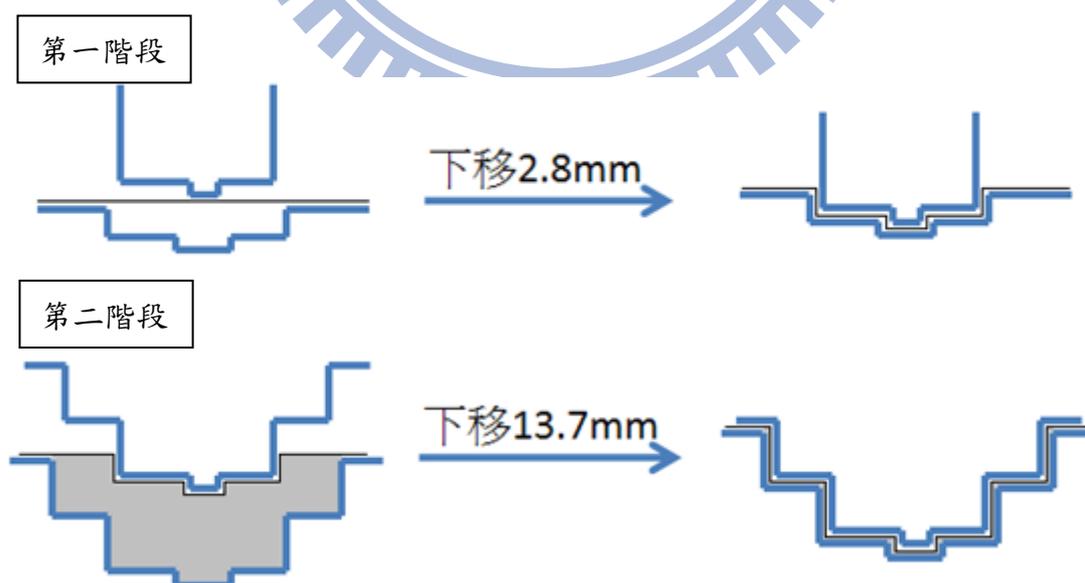


圖 4.6 實驗之成形步驟

將實驗之參數帶入先前所建立之有限元素模型進行模擬分析，將透過厚度分佈與成形後板件外形兩部分，來比較模擬結果與實驗之異同。在厚度分佈之比較方面，將取殼件前端切面來做比較，各取樣點之位置如圖 4.7 所示，而模擬與實驗比較則如表 4.2 所示。

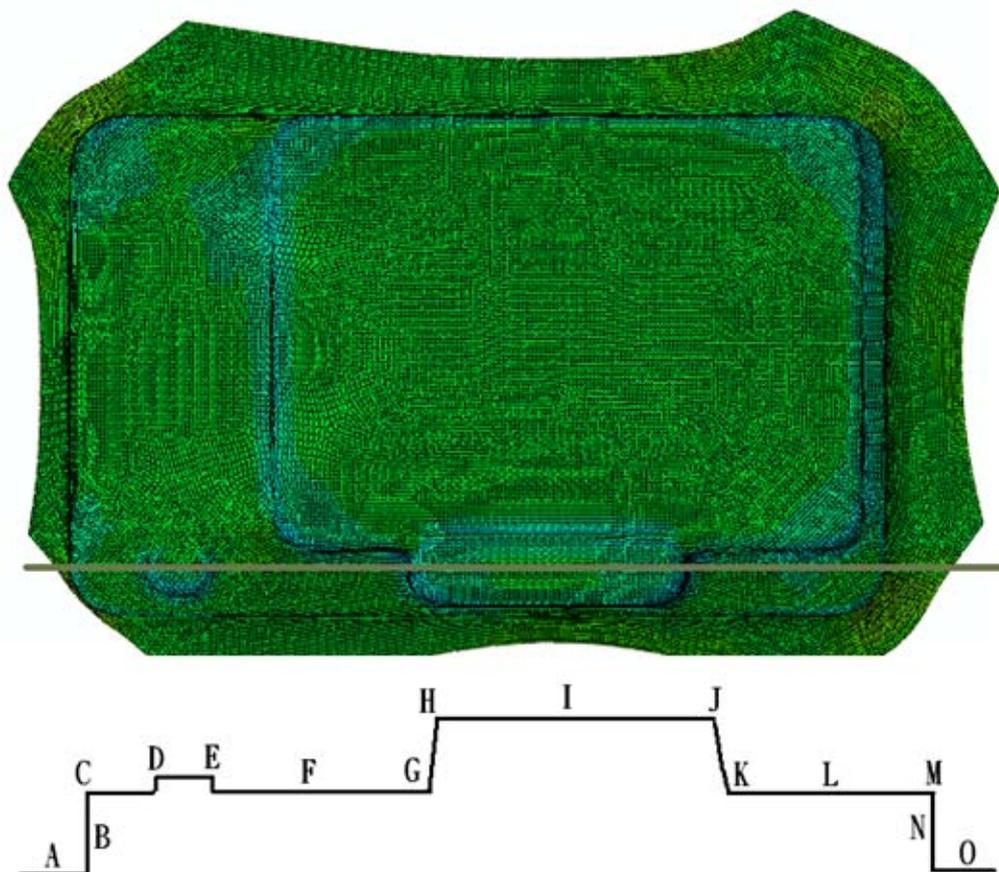


圖 4.7 厚度分佈之取樣點位

表 4.1 各點厚度分佈

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
A1050	exp	1.06	0.8	0.73	0.52	0.54	0.75	0.71	0.27	0.63	0.24	0.67	0.75	0.68	0.74	0.88
	sim	1.03	0.82	0.75	0.55	0.53	0.8	0.63	0.45	0.64	0.47	0.6	0.79	0.72	0.79	0.94
Ti/Al	exp		0.83	0.77	0.63	0.6	0.91	0.5	0.55	0.86	0.56	0.55	0.86	0.74	0.7	0.88
	sim		0.87	0.78	0.64	0.63	0.92	0.44	0.65	0.85	0.63	0.45	0.88	0.85	0.9	1.01

從表 4.1 與圖 4.8、圖 4.9 可以看出模擬與實驗之板件厚度分佈趨勢一致，僅 A1050 之 H 和 J 點與鈦鋁複合板材之邊緣有較大誤差外，各處實驗與模擬之厚度差異皆在可接受之範圍內；探究原因，在 A1050 部分可能因為在此圓角處的小範圍內板件的厚度變化劇烈，而有限元素模型中所使用的網格密度不足以表現出如此劇烈的變化；至於鈦鋁複合板材的邊緣部分，則可以在實驗結果看到料片在邊緣處已產生皺摺並影響到板料的流動，而反映到模擬上則是在此處產生增厚的現象。並且由實驗結果觀察，使用材料為 A1050 之殼件，在 H 和 J 點已有些微的破裂產生，而鈦鋁複合板材之殼件在此兩處亦發生破裂。接著觀察成形後之殼件餘料外形，來比較板件之流動性在實驗與模擬之差異。

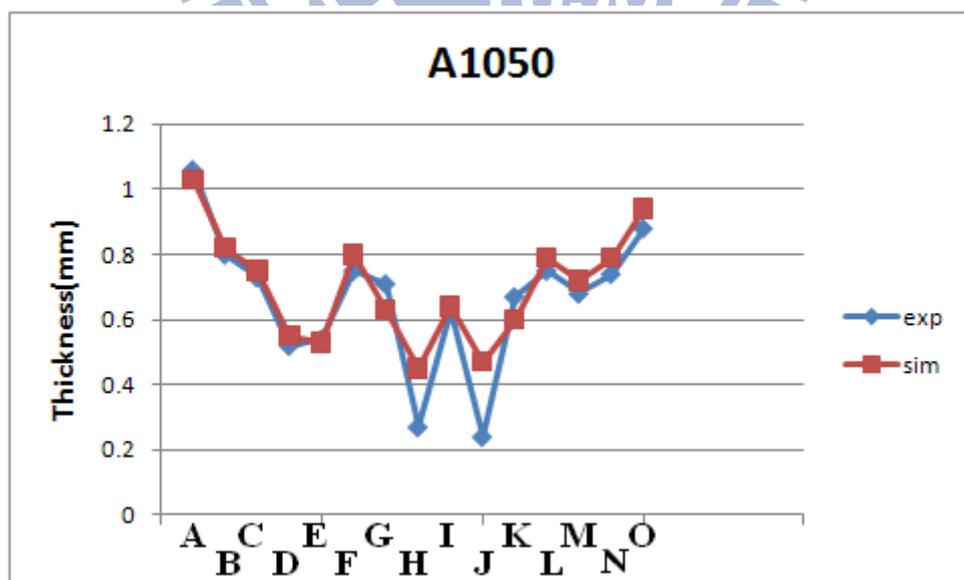


圖 4.8 A1050 實驗與模擬厚度比較圖

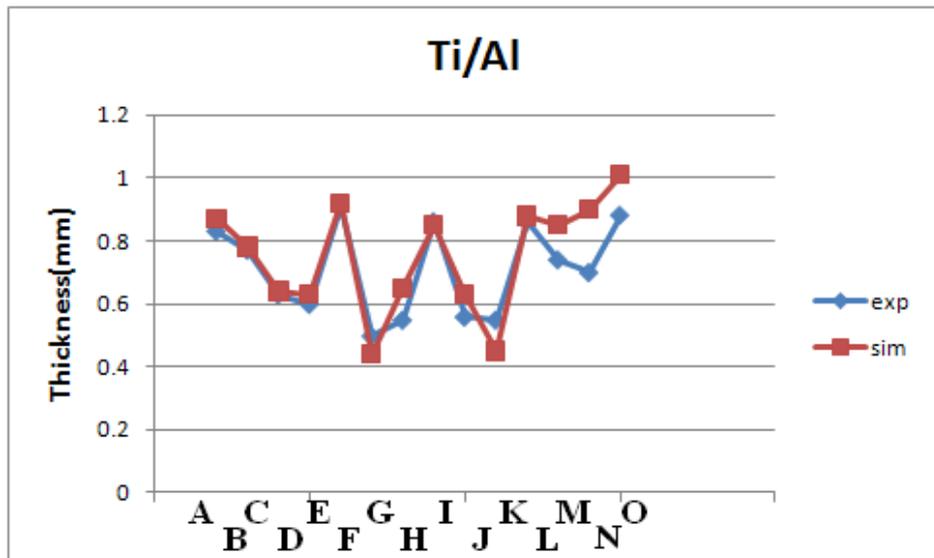


圖 4.9 圖 鈦鋁複合板材之實驗與模擬厚度比較圖

從圖 4.10 與圖 4.11 可以看出，無論使用 A1050 或鈦鋁複合板材做為材料，在成形完成後其餘料之外形皆相似，並且在殼件部份之幾何特徵在模擬與實驗結果皆顯現一致性，由此顯示本研究所建立之有限元素模已有相當的可信度。



圖 4.10 A1050 之殼件實驗與模擬變形情形比較



圖 4.11 鈦鋁複合板材之殼件實驗與模擬變形情形比較

4.1.1. 鈦鋁複合板給定雙層材材料之模擬

本研究所使用之鈦鋁複合板材為輥軋複合所得，因此考慮到在經過輥軋後，鈦與鋁之接合面已發生擴散，並且材料亦有些許的塑性應變殘留，所以在前節中即將鈦鋁複合板材之應力/應變曲線直接帶入作為其材料性質，將其視為一單一板材來做處理，並由前節之模擬與實驗比較，得知此一給定方法已有相當的準確性，但仍有些許的誤差。

所以在此希望藉由給予複合板中的鈦層與鋁層各自的應力/應變曲線於兩層殼元素，來模擬複合板材接合後的成形，並假設在成形過程中其界面不產生滑動，在模擬中限制兩者介面間的相對位移，而各層之厚度則依照輥軋後之鈦鋁板的厚度分佈，給定鈦層與鋁層之厚度比為 2:3 帶入模擬，希望能有較接近於真實的模擬結果；模擬結果比較如下圖所示。

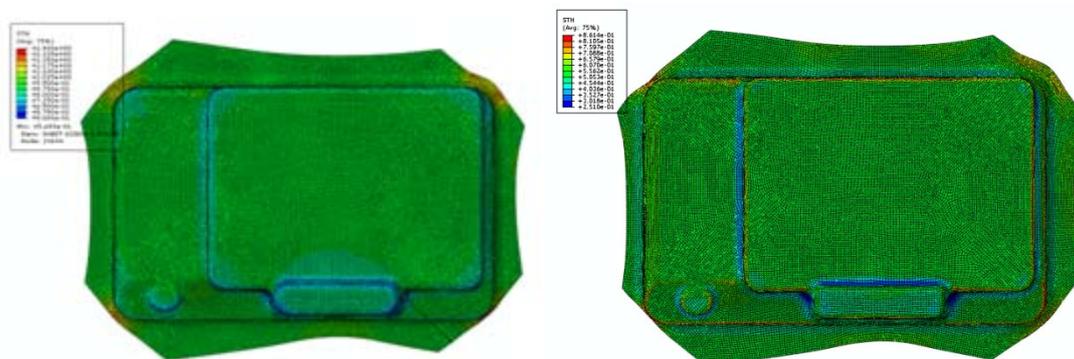


圖 4.12 鈦鋁複合板不同材料給定方式之結果比較

可以發現使用兩層殼元素來模擬複合板(圖 4.12 右側)，其結果顯示板件左側會有最佳的流動性，而在其他處的流動性則與先前的給定方式無太大不同。

而在厚度比較的方面，由於為兩層殼元素，因此將先量取鈦層與鋁層各點位的厚度分佈再相加來與實驗值做比較，量取之點位與前節圖 4.7 相同，而鈦層與鋁層之厚度分佈如圖 4.13 與圖 4.14 所示，表 4.2 為模擬與實驗之厚度分佈比較。

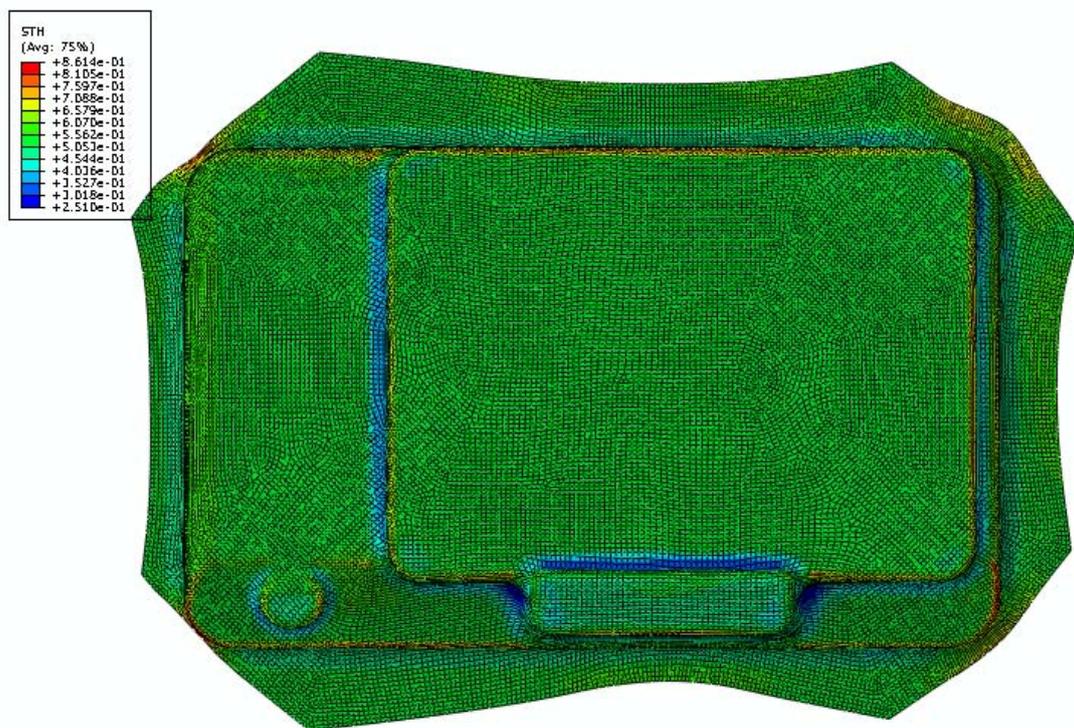


圖 4.13 鋁層之厚度分佈圖

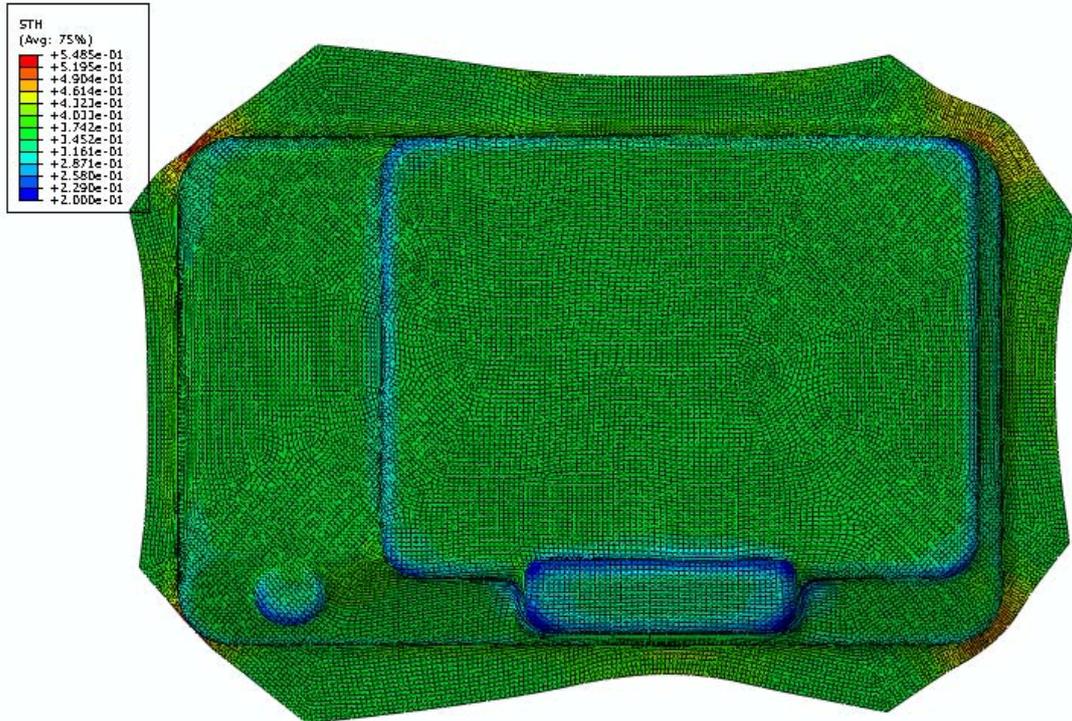


圖 4.14 鈦層之厚度分佈圖

表 4.2 鈦鋁複合板實驗與不同材料性質給定方法之厚度比較

		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
雙層	鈦		0.37	0.31	0.29	0.28	0.36	0.29	0.21	0.34	0.2	0.29	0.35	0.33	0.4	0.45
	鋁		0.6	0.87	0.63	0.64	0.53	0.36	0.53	0.5	0.54	0.39	0.53	0.73	0.65	0.64
	總合		0.97	1.18	0.92	0.92	0.89	0.65	0.74	0.84	0.74	0.68	0.88	1.06	1.05	1.09
實驗			0.83	0.77	0.63	0.6	0.91	0.5	0.55	0.86	0.56	0.55	0.86	0.74	0.7	0.88
單一層			0.87	0.78	0.64	0.63	0.92	0.44	0.65	0.85	0.63	0.45	0.88	0.85	0.9	1.01

從厚度分佈的比較可以發現，使用兩層殼元素的模擬結果在多處皆有蠻大的誤差，顯示若不考慮軋軋造成的影響，而給予軋軋前鈦與鋁的材料性質來做模擬，則無法得到準確的預測；並且使用兩層殼元素亦會增加幾乎一倍的模擬時間，所以後續將直接使用拉伸所得之鈦鋁複合板應力/應變曲線，帶入單一層殼元素來做模擬。

4.2. 詳細之有限元素模擬

由於板液壓深引伸成形其主要特性為可用較少加工階段成形所需之產品，因此本研究希望以此一外形複雜之相機殼件作為載具，利用以驗證之有限元素模形探討各種製程參數，如：加工階段、壓料板力、料片尺寸、模具斜角與些微修改產品外型等等方式，來得到一個較適當的配合，以求在生產時能得到品質與良率較佳的產品。

將先使用 ASUS304 之材料特性帶入模擬，而壓料板力、液壓歷程與模具間隙則參考實驗數據，給定一合理之初始參數如下表 4.3 所示：

表 4.3 板液壓所使用之製成參數

Holding force	9800N
Internal pressure	10MPa
Tooling gap	1.0mm

並且為了減少成形後的餘料，並增加料片在四個角落處的流動性，將適度的給予一截角，得到如下圖 4.15 所示之料片帶入模擬分析。首先，將針對成形的加工階段做探討，找出最適合此一外型的數量，以求以最少的加工階段得到一個符合產品外型要求且無破損的成品，之後對各製程參數如：壓料板力、模具側壁斜角、像機殼件機頂斷差高度與第一階段移除下模具等等，探討對成形性的影響。

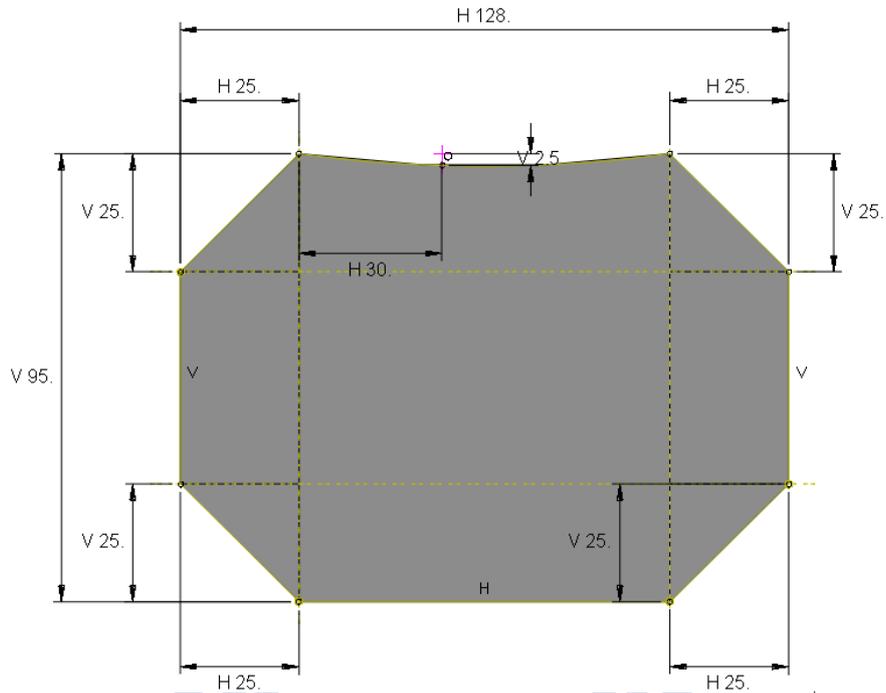


圖 4.15 給予截角後之料片尺寸

4.2.1. 加工階段探討

由於加工階段會影響到生產產品之時間與模具所需之開銷，因此若能減少加工階段，則可以大大減少生產成本；但對於較複雜的產品，往往無法在單一階段的成形中，即得到所需的產品，太少的加工階段會使得產品產生破裂或皺摺等等的缺陷。

因此本研究首先將針對所使用之載具之外型，探討不同加工階段對其成品之影響，依其外外型將分為一階段、兩階段及三階段成形來做比較。其中三階段成形所新增之模具如下圖 4.16 所示：

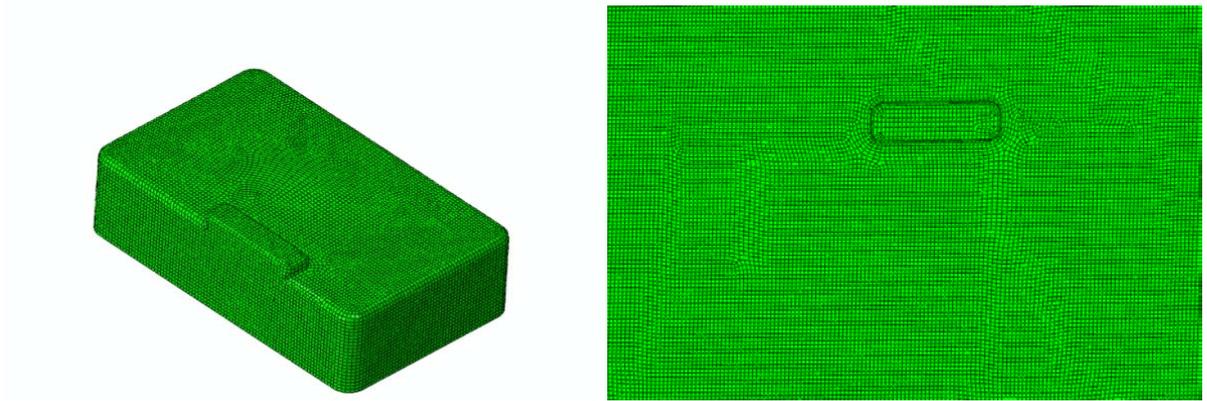


圖 4.16 三階段成形新增之第一階段沖頭（左圖）與下模具（右圖）

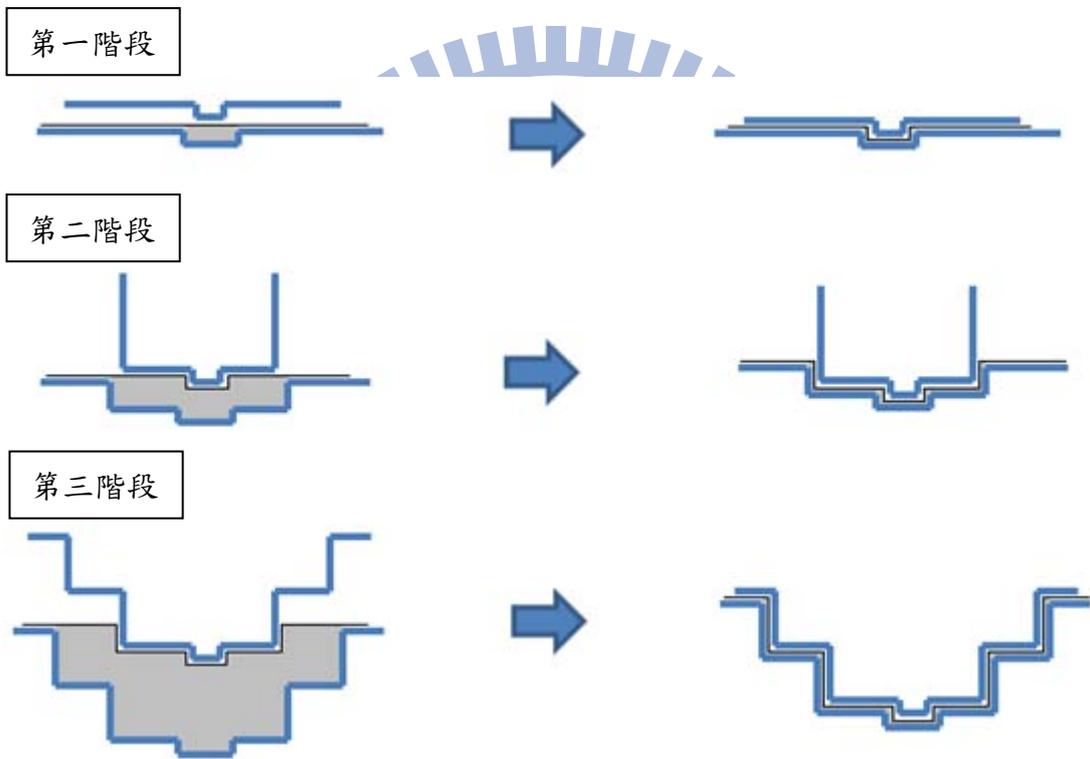


圖 4.17 三階段的製程



圖 4.18 一階段的製程

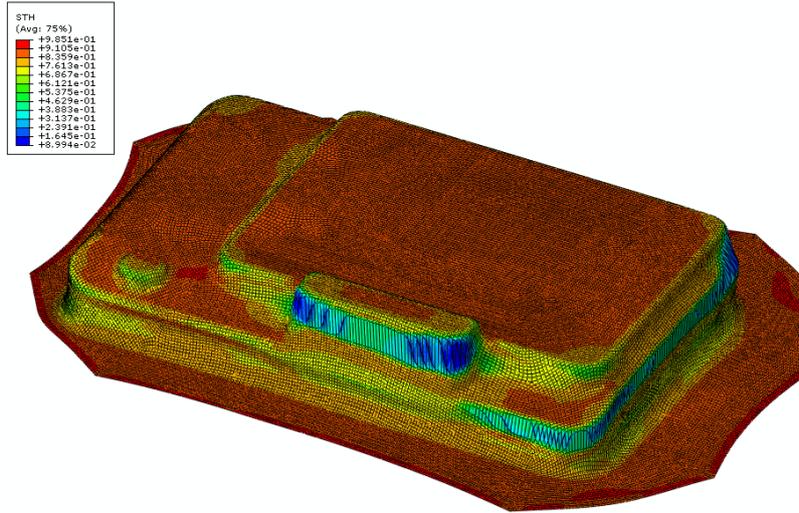


圖 4.19 一階段製程之厚度分佈圖

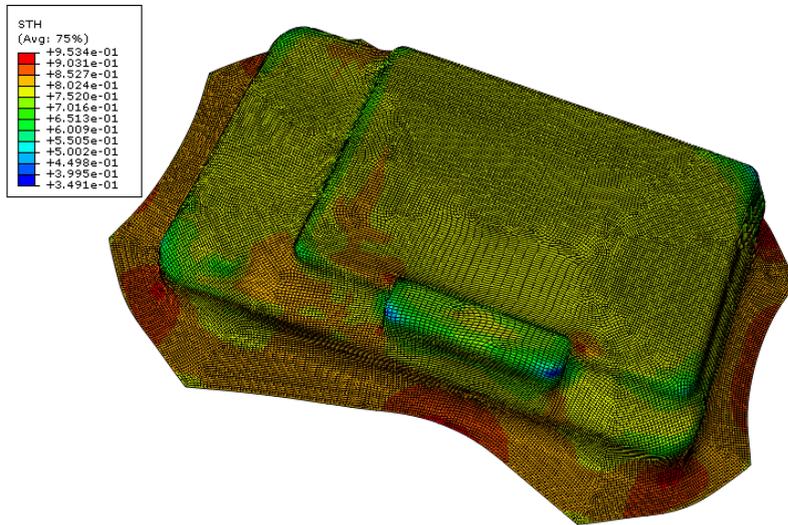


圖 4.20 兩階段製程之厚度分佈圖

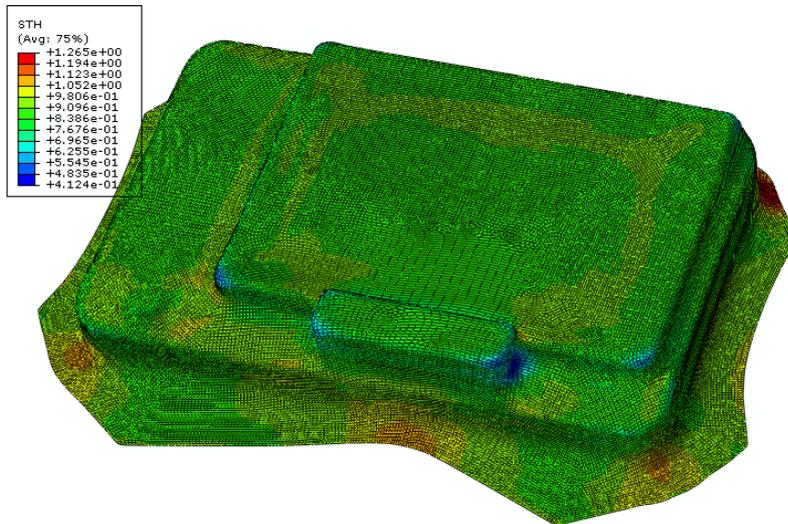


圖 4.21 三階段製程之厚度分佈圖

從圖 4.19 至圖 4.21 的模擬結果可以發現，僅使用一階段製程會造成板件被過度拉扯，在成形還未結束板件就有很大的可能產生破裂。而比較兩階段與三階段的模擬結果，可以發現兩者的最薄厚度之差異不大，並觀察三階段成形的各個階段(圖 4.21 至圖 4.23)可以發現，最大厚度減縮發生在第二階段之成形，此即為兩階段成形時的第一階段。

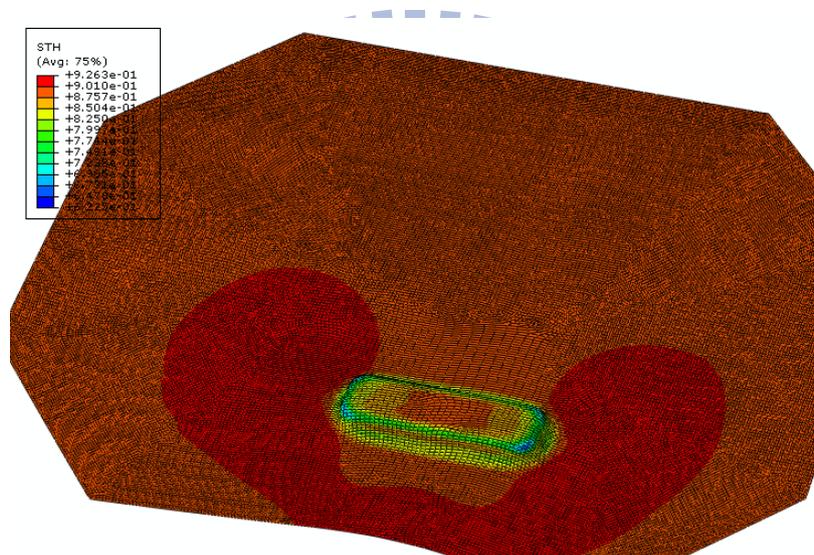


圖 4.22 三階段製程的第一階段成形厚度分佈

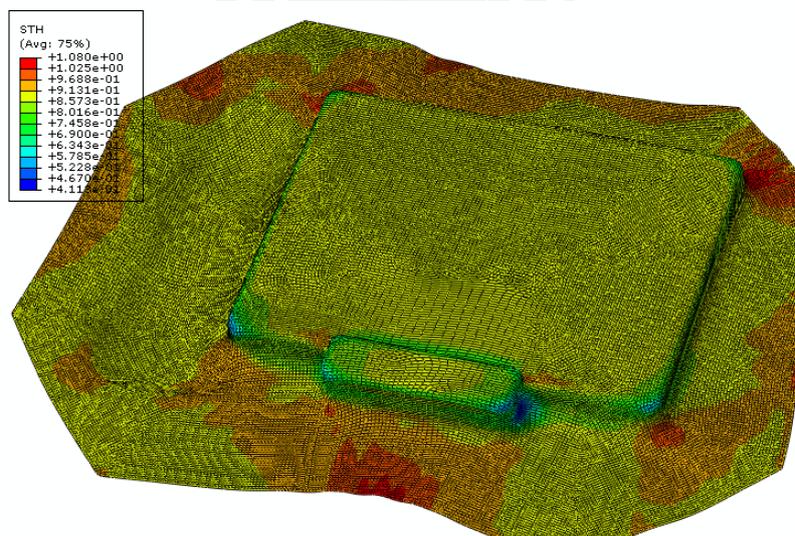


圖 4.23 三階段製程的第二階段成形厚度分佈

將兩階段與三階段成形做比較後，可以發現使用三階段的成形減少板件薄化的情形有限，且將增加製造時間與成本，因此後續將針對兩階段之製程的製程參數來作探討，來改善產品的厚度減薄情形。

4.2.2. 壓料板力變動之影響

在給予料片與模具間充分潤滑後，壓料板力大小將是做直接影響料片流動性之參數，也是最容易更改之參數，因此在確定製程階段後，首先將探討壓料板力大小對於成品之厚度分佈的影響。各項製程參數將參考實驗時之數據做初步設定，並設 1000kg(9800N) 及 500kg(4900N) 兩組壓料板力來比較模擬結果之差異，而液壓力之設定則與實驗時有些許差異，也就是在第一階段之製程即給予液壓希望能幫助板件流動，而液壓力歷程如前述圖 3.14 所示，第一階段終點壓力為 5MPa，第二階段終點壓力為 10MPa，模具間隙為 1.0mm，板件外型則如前述圖 4.15 設定。

參考韓[19]於模擬與實驗比較結果可得知，鈦鋁複合金屬材料亦或是 SUS304 不鏽鋼的單一板材在不適當之製程參數下，圓角處會產生破裂的情形，量取此時之厚度皆為減薄率超過 25%。所以本研究在無實驗對照下暫時依據韓[19]實驗之資料，定義板件破裂之安全係數。亦即，藉此減薄率為破裂依據，定義當板件減薄率大於 25% (以本研

究所使用之初始厚度 0.8 mm，25%相當厚度小於 0.6 mm 時)，就表示在相關製程參數設定下，板件將會產生破裂而可能無法完成成形。

$$\text{減薄率} = \frac{\text{板件初始厚度} - \text{板件當前厚度}}{\text{板件初始厚度}} \times 100\% \quad (4.1)$$

由下圖 4.24 可以觀察，在此沖頭僅下移 3.2 mm 時，板件在部件稜角處已經低於 0.6 mm（即有破裂危險），並在完成第一階段沖頭行程時，板件之最大薄化率已達到 82%，表示此一參數無法完成產品製造。

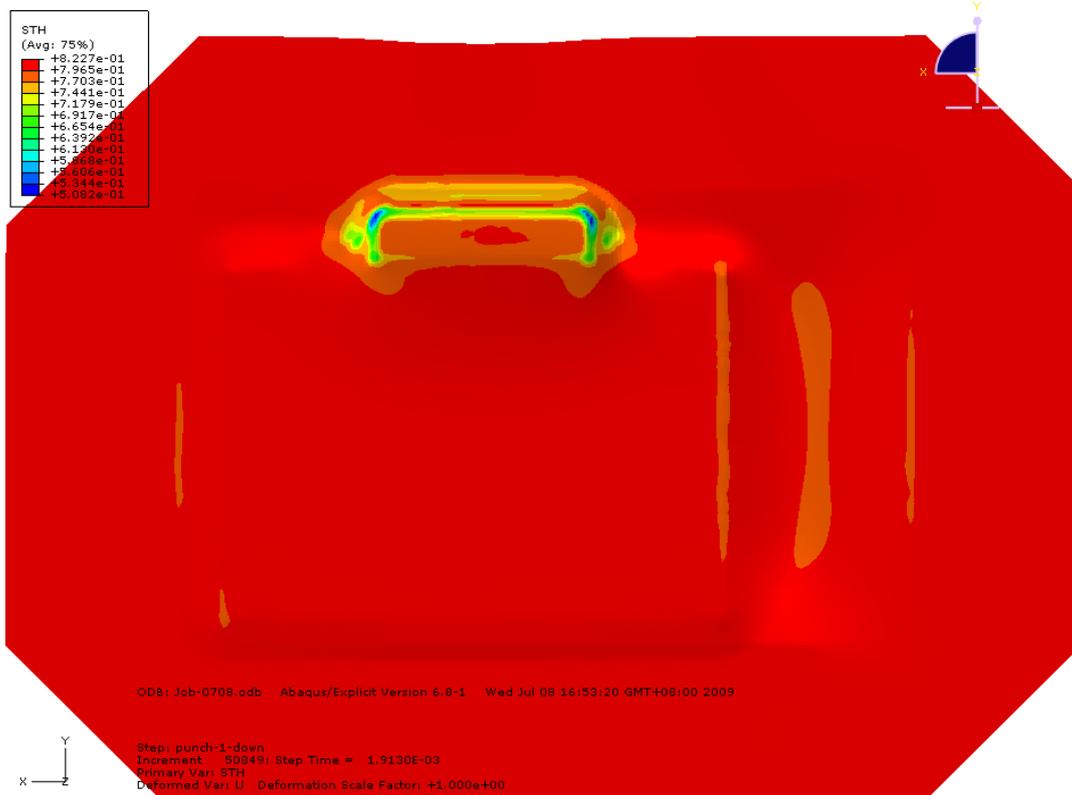


圖 4.24 料片最小厚度低於 0.6mm 之厚度分佈圖 (9800N)

為增加其板件的流動性，所以嘗試將壓板力降低至 0.5 ton，而其他參數則與先前相同，觀察此一製程參數下的結果，如圖 4.25 與圖 4.26 所示，由模擬結果可以發現沖頭在第一階段行程尚未結束時 (6 mm)，最薄厚度就到達 0.6 mm 時，表示有破裂可能，並且於第一階段成形完畢後，最薄厚度達到 0.469 mm，薄化率高達 41%，研判應該難以完成後續之成形。

除此之外，經由模擬結果顯示，板件在局部區域亦發生起皺現象，研判除了較小的壓板力影響之外，料片進入下模具時之接觸摩擦，也會限制住局部的流動性，而產生局部起皺現象，且其起皺之最大高到達到 1.7 mm，可能於實際成形中造成液壓油洩漏之現象，所以若想再降低壓板力則只會造成板件皺摺更加嚴重，而無法成形。

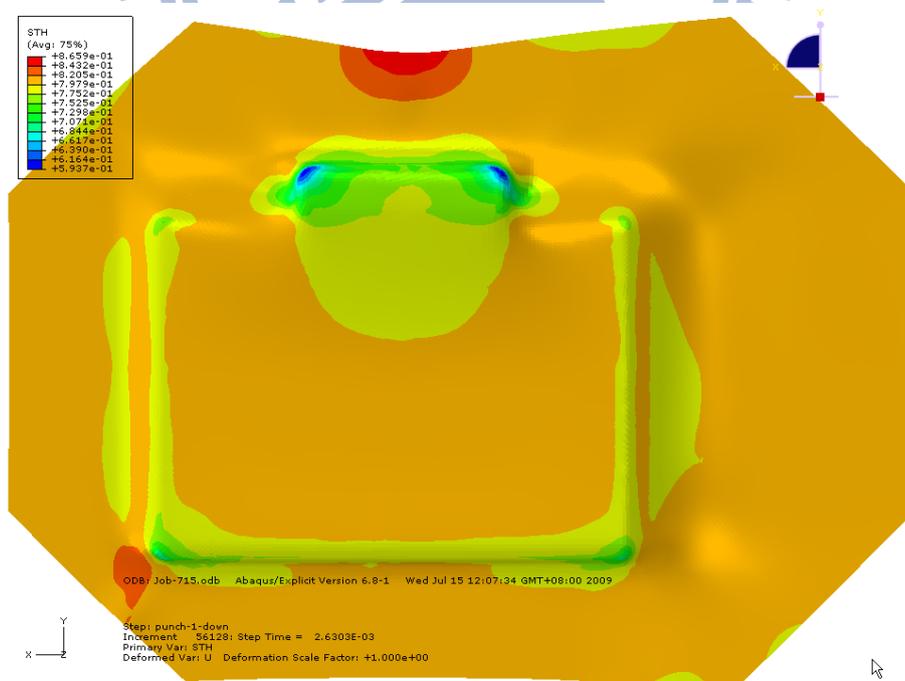


圖 4.25 料片厚度低於 0.6mm 之厚度分佈圖 (4900N)

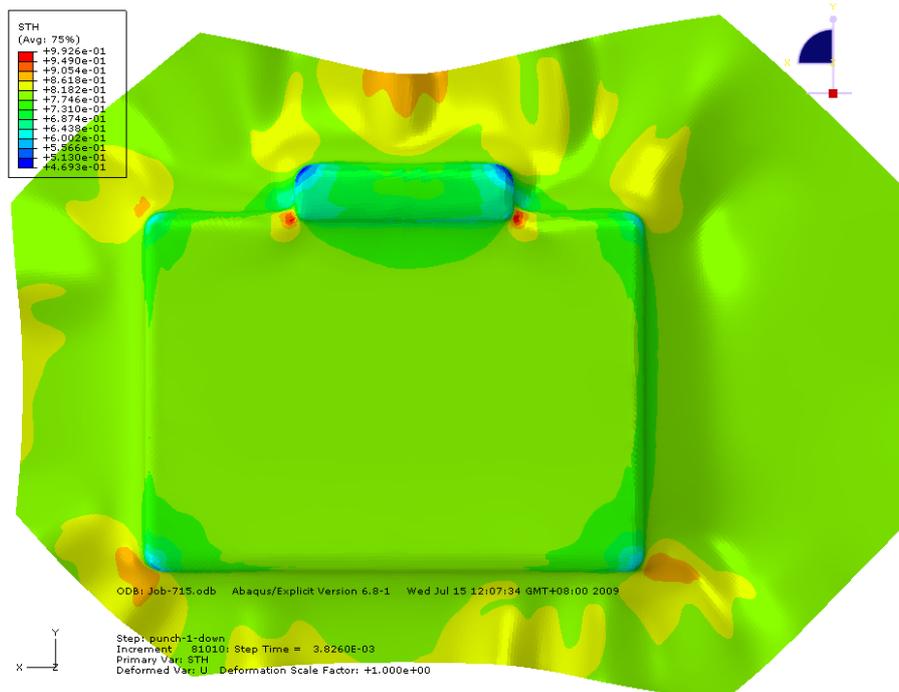


圖 4.26 第一階段成形結束之厚度分佈圖 (4900N)

4.2.3. 移除第一階段下模具與改變壓料板力

觀察在前一小節的模擬結果可以發現，第一階段的下模具會對板件流動性造成負面影響，後續將考慮於第一階段時移除下模具，而僅利用液壓力來幫助料片貼合沖頭外型，而於第二階段最終再用下模具幫助細部外觀的成形。

探討第一階段即完成部分的殼件外型其結果不甚理想，主要原因在於，下模具限制住前端部位的流動性，以致於薄化情況過度，可能發生破裂的行為。故在將移除第一階段下模具來進行模擬，料片尺寸則維持 128*95 mm 截角 25 mm 的設計，壓板力則使用前一章節所得之臨界值 0.5 ton。

經由圖 4.27 與圖 4.28 可以顯示第一階段移除下模具，板件的厚

度為 0.6981mm，減薄率約為 12.7%左右，最薄的區域主要還是前端及後方兩端點部位，明顯較第一階段合模的結果改善許多，但是隨著料片下移至 12.32 mm 時，最薄厚度已經達到 0.6 mm，並下移至 14.77 mm 時，元素扭曲過大造成運算失敗，但觀察其板件之皺摺情形卻無第一階段合模時嚴重，因此將減少壓料板力為 0.25 ton 進行模擬，以增加其板件流動性。

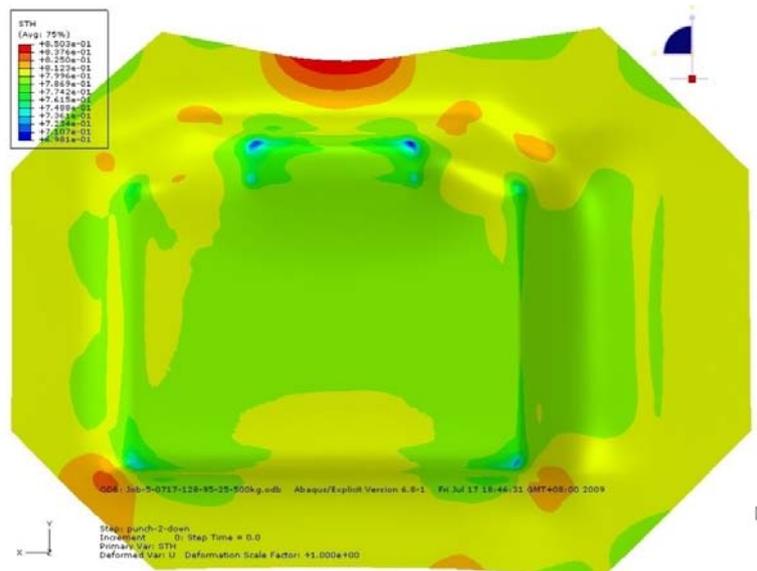


圖 4.27 第一階段無下模具之厚度分佈 (4900 ton)

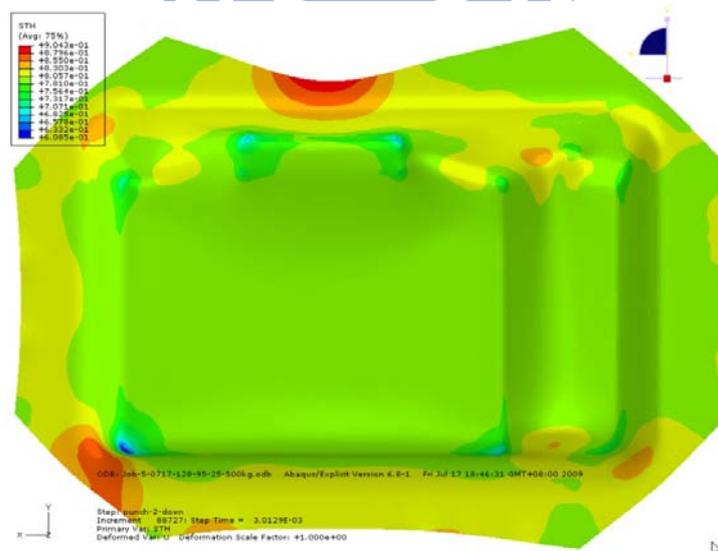


圖 4.28 最薄厚度達 0.6mm 階段之厚度分佈 (4900N)

經由圖 4.29 圖 4.30 可以顯示第一階段無合模的厚度為 0.6926mm，減薄率約為 13.42% 左右，同樣地，最薄的區域主要還是前端及後方兩端點部位，但是由於壓料板力減少，在局部區域發生起皺的現象，但是隨著料片下移至 12.63 mm 時，最薄厚度達到 0.6 mm，周圍料片起皺現象更為明顯，如圖 4.31 所示，由於在模擬中，並未考慮液壓油的洩漏問題，過度的起皺將產生明顯的間隙，可能會影響液壓油密封造成壓降，因此後續應該維持壓料板力於 0.25 ton 之上。

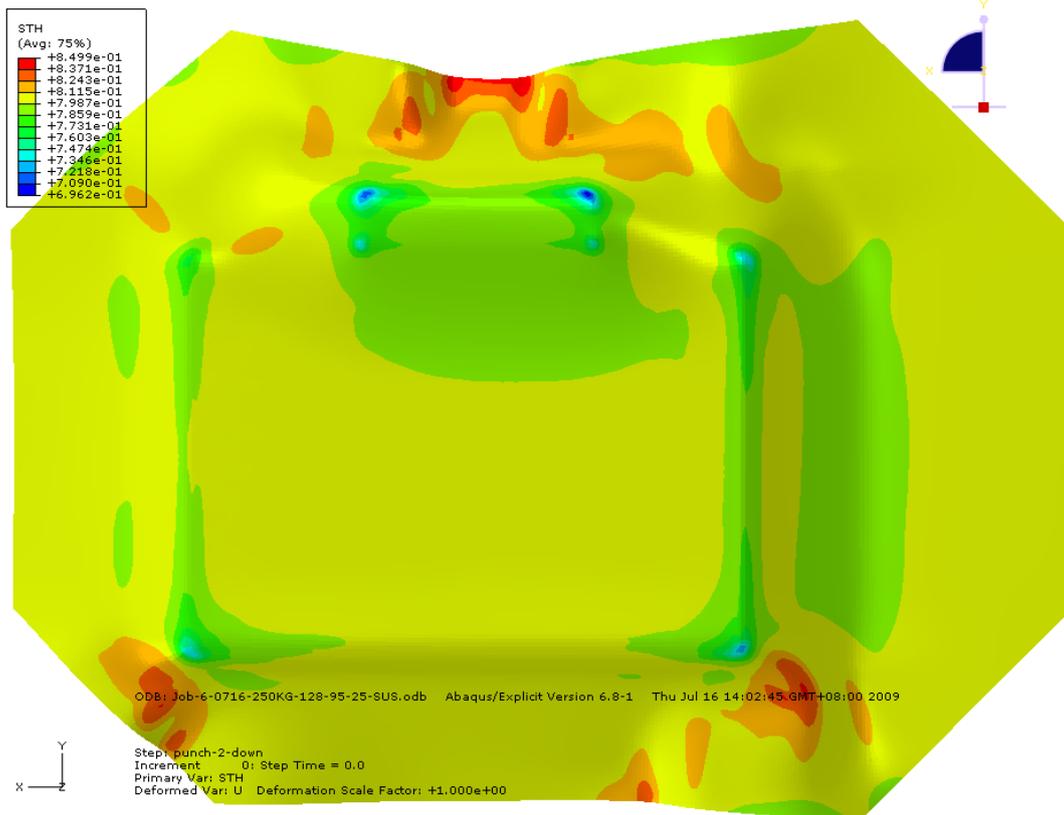


圖 4.29 第一階段無下模具之厚度分佈 (2450N)

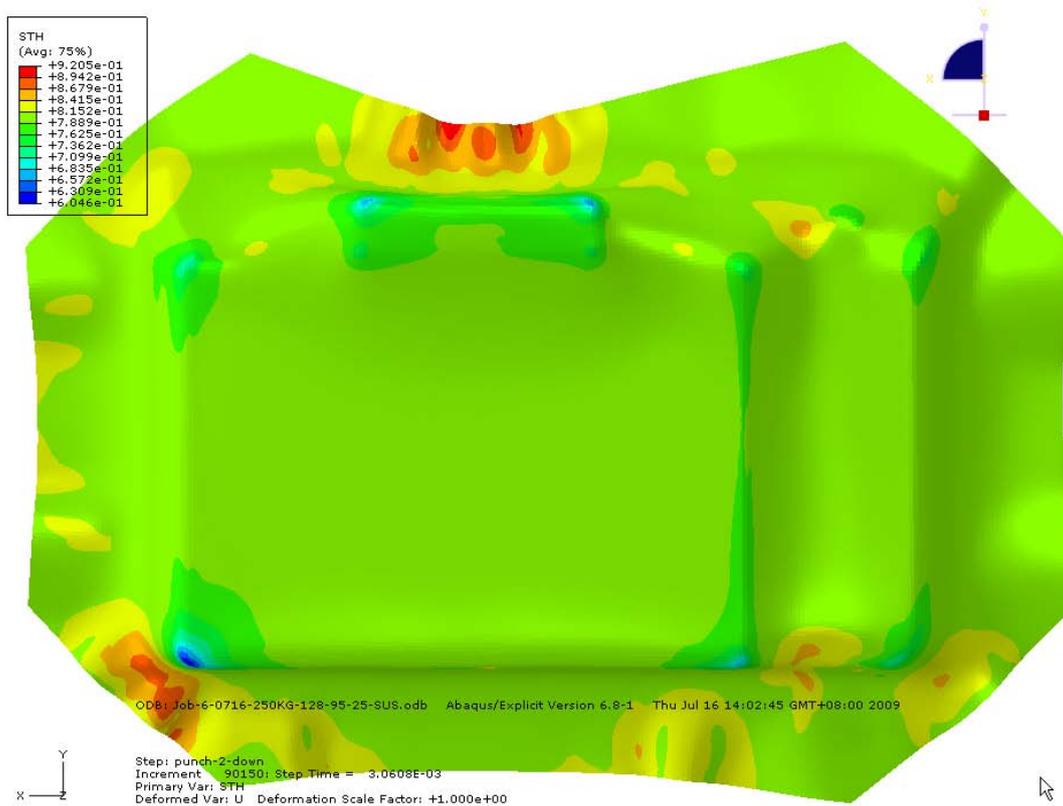


圖 4.30 最薄厚度達 0.6 mm 階段之厚度分佈 (2450N)

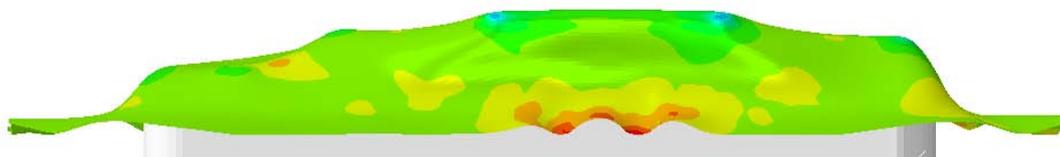


圖 4.31 最薄厚度達 0.6 mm 階段之料片起皺 (2450N)

4.2.4. 模具側邊傾斜角設計

在本節中，將根據板液壓相關文獻，選擇適當模具拔模角，主要目的將可以使液壓油更容易流入板件與模具之間，輔助料片貼附沖頭，增加板件的流動性，而考慮實際載具成形外型，以及四邊不對稱的高度，因此僅在下模具 0~6 mm 處給予 10° 、 20° 的斜角，來建立兩種不

同的下模具外型，如下圖所示，至於料片尺寸與圖 4.4 相同，而壓料板力則與表 4.3 做相同的設定，在此時已取得 A1050 之材料拉伸曲線，且對於本研究所使用之高引伸比的載具，使用 ASUS304 其成形條件相當嚴苛，因此將選用 A1050 做為板件的材料性質帶入模擬，並與實驗結果相比較。而液壓力歷程由前述圖 3.14 所示，第一階段終點壓力為 5MPa，第二階段終點壓力為 10MPa。

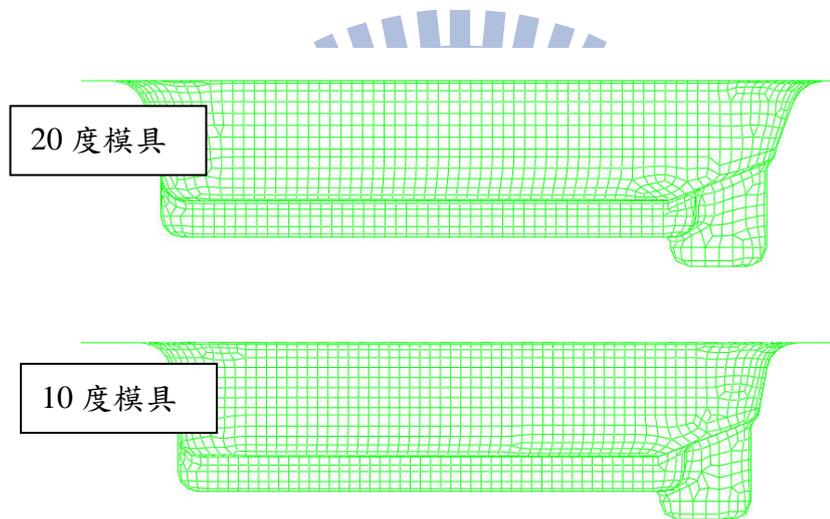


圖 4.32 不同模具導角示意圖

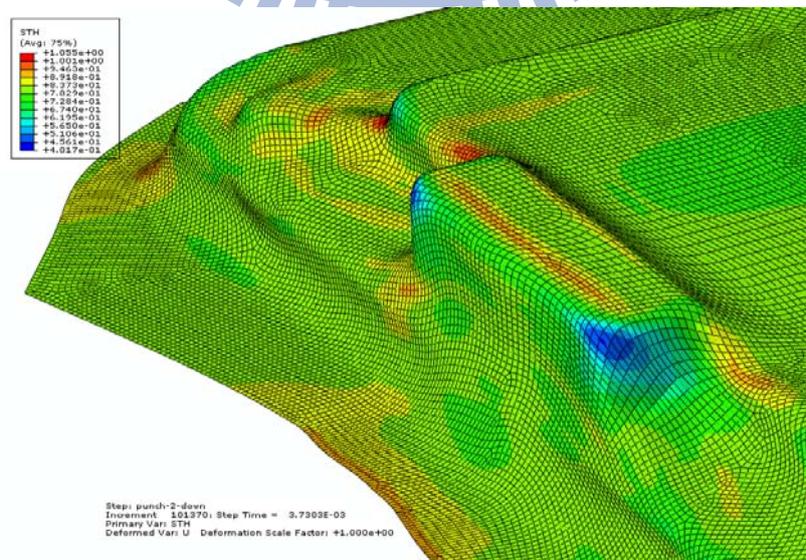


圖 4.33 20 度模具之料片厚度分布情況

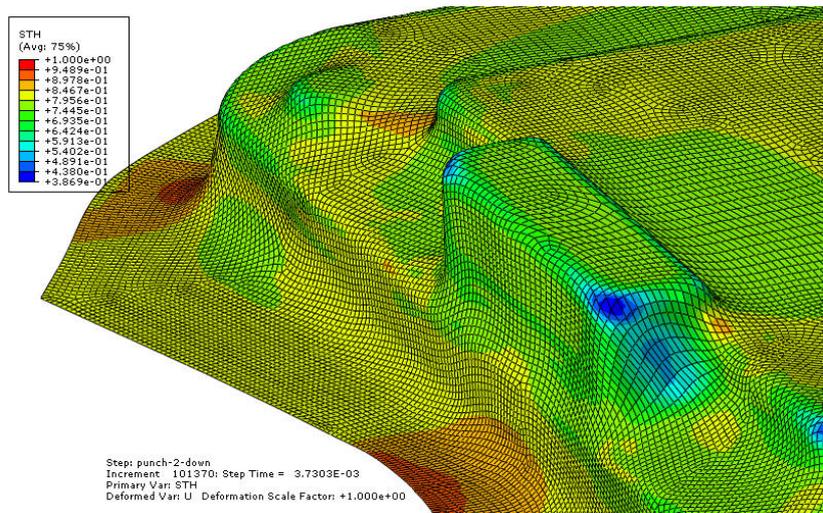


圖 4.34 10 度模具之料片厚度分布情況

經由以上模擬結果得知，20 度模具中，料片的最小厚度為 0.429mm，10 度模具則是為 0.386 mm，較大的模具倒角，確實對於減薄情況會有些微的幫助，但是此薄化程度，仍然可能在實際實驗過程中，會使得料片發生破裂的可能。除此之外，由下圖的產品成型尺寸比對，在目前的終壓壓力設定(10MPa)不足夠將產品垂直的部分貼合置沖頭上，與所要求之產品外型不符，如圖 4.35 可以看出不管是 10 度或是 20 度的模具倒角，料片形狀都與所希望的產品外型(也就是沖頭外型，側壁為垂直 90 度)有所差異，20 度模具導角的情況尤其嚴重。

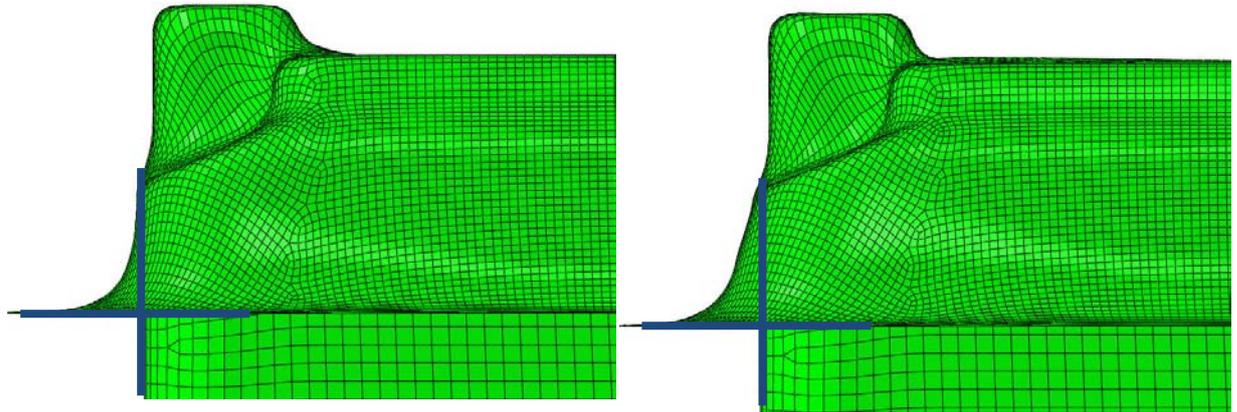


圖 4.35 模具角度對於最終成型尺寸的差異比較

4.2.5. 相機殼件機頂之段差高度修改

在先前的成形結果可以看出，板件的最小厚度(可能破裂處)，大多為相機最高段差的圓角，因此在本節中，將適當的修改此處段差高度，藉由模擬結果觀察是否會對成形有所幫助；而本計畫之載具，在最高處段差高度為 2.8 mm，所以在高度差的修改方面，將分別修改為 50% 高度(1.4mm)與無斷差高度(0mm)來做模擬，料片尺寸則維持 128*95 mm、截角 25mm 的設計，並設定壓料板力為 4900N 來做模擬，液壓力歷程由前述圖 3.14 所示，第一階段終點壓力為 5MPa，第二階段終點壓力為 10MPa。

比較段差高度縮減 50% 與原始段差高度 2.8 mm 之最小厚度，如下圖 4.36 與圖 4.37 所示，分別為 0.349 mm 及 0.484 mm，可以發現段差高度縮減 50% 可以有助於減緩圓角處的減薄情形，但是在圓角處最薄厚度同樣達 0.484 mm(減薄達到 39.4%)，在實際成形時板件仍可能由此處破裂。

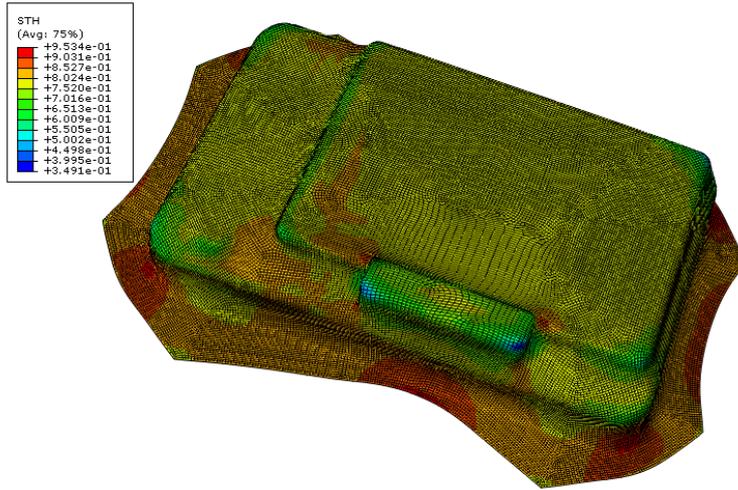


圖 4.36 原段差高度(2.8 mm)的厚度分佈圖

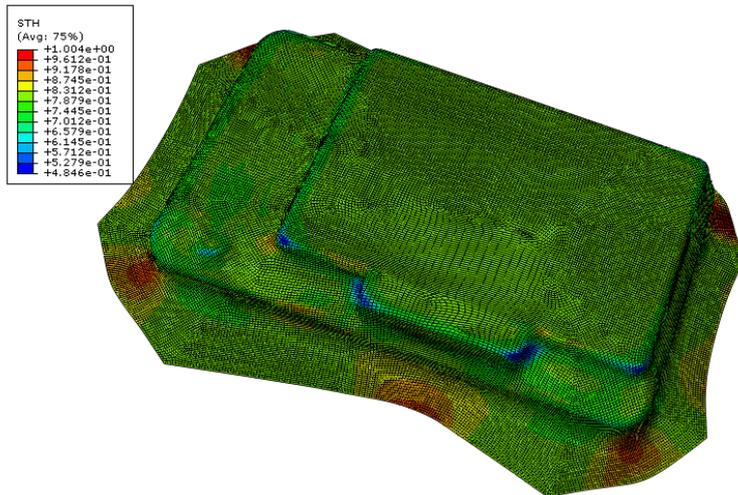


圖 4.37 50%段差高度(1.4 mm)的厚度分佈圖

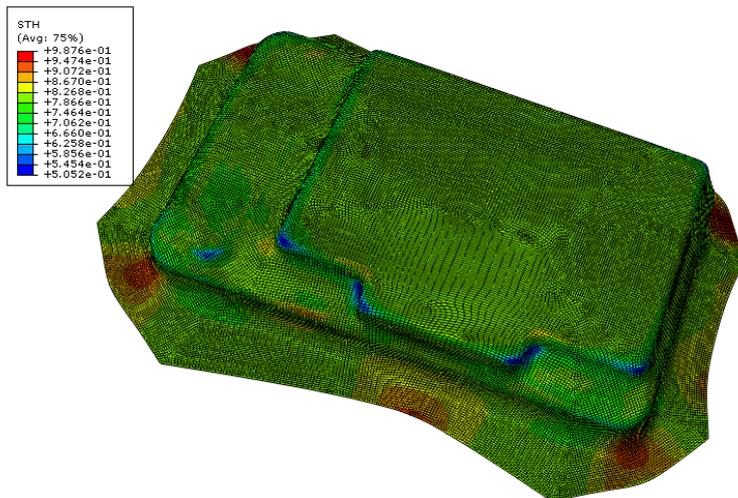


圖 4.38 無段差高度的厚度分佈圖

接續比較兩修整高度之模擬結果(圖 4.37 與圖 4.38),可以發現將最高段差幾何完全消除,在圓角處的薄化情況雖有趨緩的趨勢,卻無法有顯著的改善,除此之外,觀察模擬結果發現,在次高段差部位,其圓角薄化情況則有增加的趨勢,此現象可能是在修改段差高度後,由於段差縮小或消失,而導致次高段差部位,承受較大的引伸量造成。

4.2.6. 較佳之製程參數成形模擬

綜合先前之各項參數探討,而選擇其中較佳參數之組合,將其帶入模擬並觀察其結果。在先前的模擬結果中,雖然第一階段不合模可以稍微改善厚度減薄的情形,但在此階段的液壓力無法使料片貼附沖頭,來顯現出較明顯的外型,而在下一階段成形仍會使料片流動性受到模具限制,而開始減薄最後可能會導致破裂,因此將在第一階段時給予沖頭與模具一個斜角(如圖 4.39 所示)以增加料片之流動性,且改變段差高度縮減 50%,並於此階段進行合模,使料片貼附沖頭,如此在第二階段成形時就不會產生過度拉扯,而導致局部減薄現象。而由於在第一階段就合模,所以將使用 9800N 之壓料板力,來避免



圖 4.39 修改後之第一階段沖頭

料片起皺，並且此一階段液壓油則不施與壓力，而僅僅作為潤滑作用，而第二階段之液壓力歷程則參照實驗數據給予液壓歷程如圖 4.5，料片尺寸則維持 128*95 mm，並在四邊給予 25 mm 之截角(如圖 4.4)，而料片則以鈦鋁複合板材與 A1050 作為其材料性質，模擬結果如圖 4.41 與圖 4.42 所示。

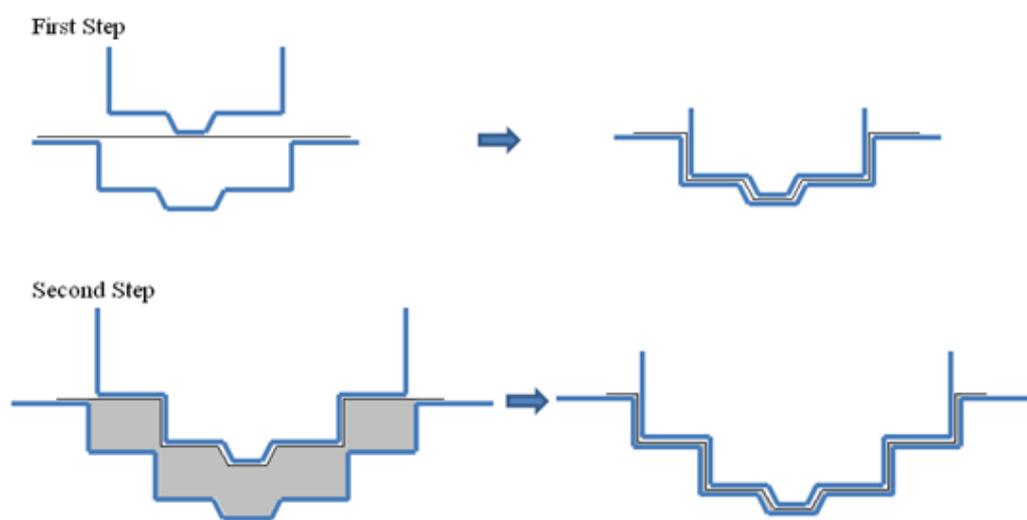


圖 4.40 優化後之兩階段製程

可以發現在使用鈦鋁複合板的部分其最薄處厚度已提升為 0.511 mm，而觀察板件餘料發現，右邊剩餘許多多餘料片，而左邊則略顯不足。

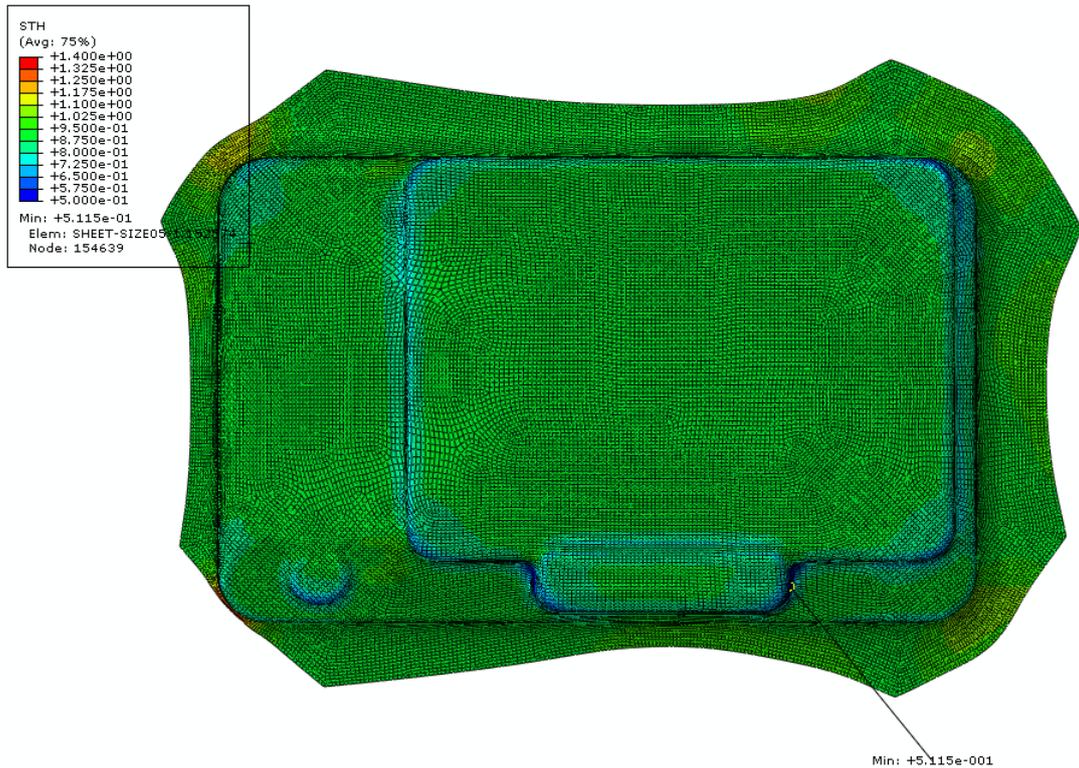


圖 4.41 修改製程參數後鈦鋁複合板料片之厚度分佈

而使用 A1050 料片的成形結果在最薄處的厚度為 0.3442mm，與使用鈦鋁複合板材料片相比明顯小很多，模擬結果顯示使用 A1050 可能在實際成形時會產生破裂；此外觀察餘料的外型，則與鈦鋁複合板材的結果相似，即在右側有較多的餘料，因此將再針對料片之尺寸與料片擺放之位置略做修改。

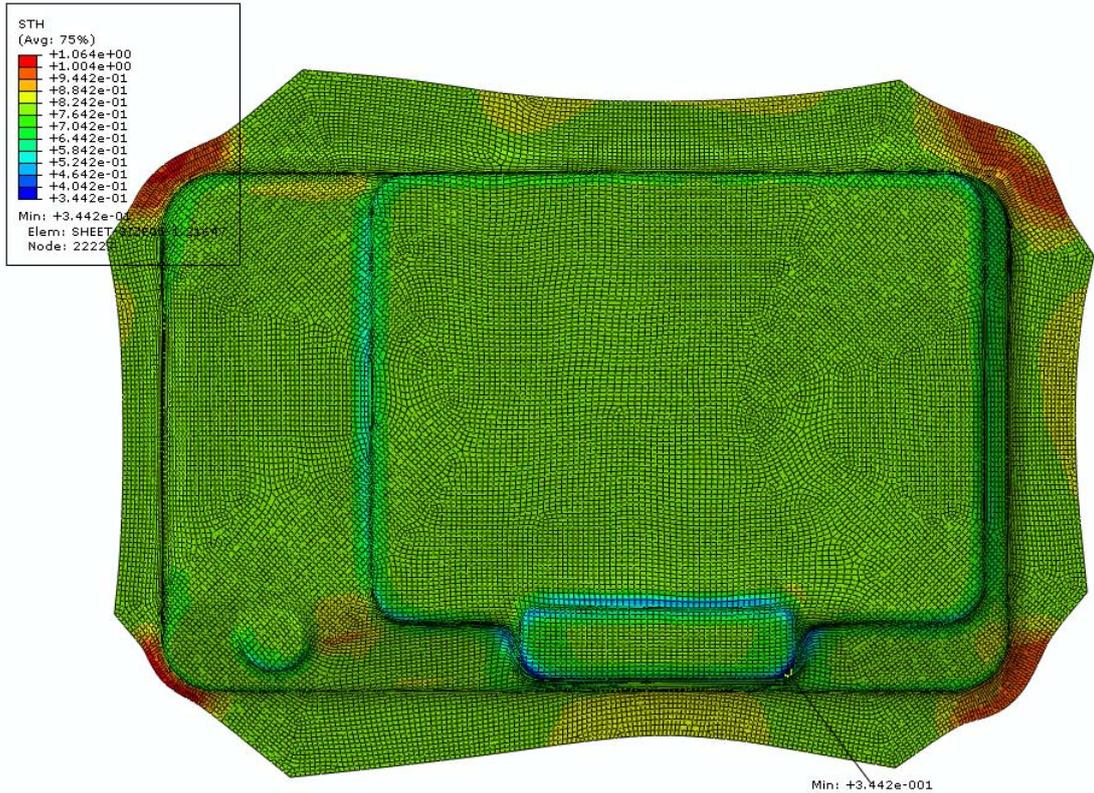


圖 4.42 修改製程參數後 A1050 料片之厚度分佈

修改之料片尺寸如圖 4.43 所示，在此另外將料片擺放位置向左橫移 2 mm，而其他製程參數則與先前相同，其結果如圖 4.44 與圖 4.45 所示，由結果可以發現在使用鈦鋁複合板的部分其最薄處之厚度由 0.511 mm 提升到了 0.568 mm，而使用 A1050 做為料片結果也顯示最小厚度亦由 0.3442mm 提升到了 0.3846mm，顯示使用此一製程參數可以大幅提升最薄處的厚度，達到改善品質的要求。

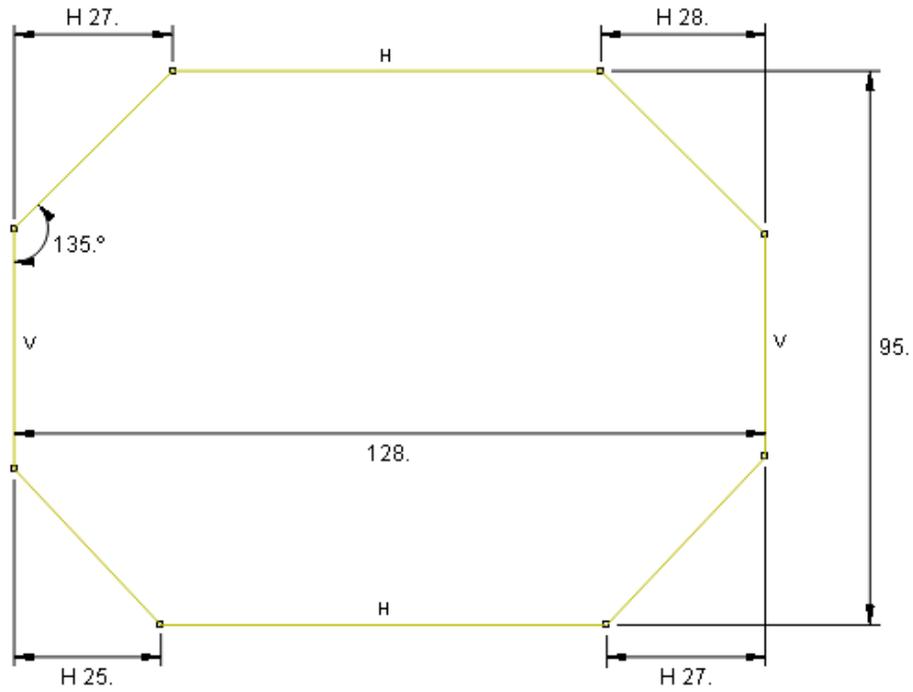


圖 4.43 修改後截角不對稱之料片

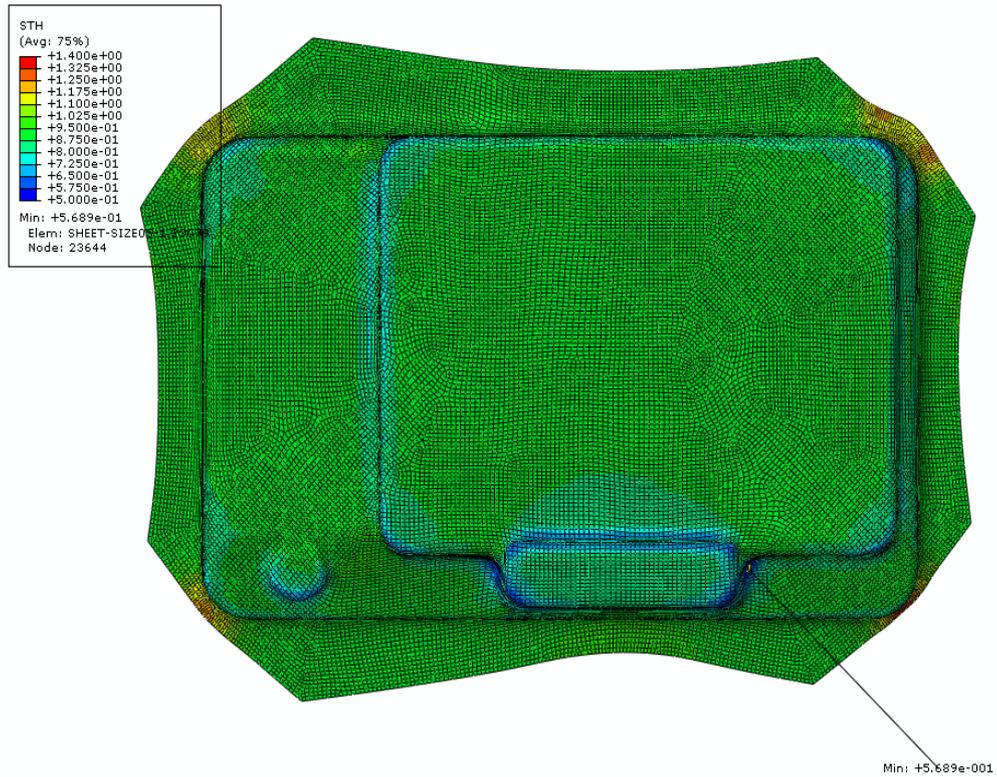


圖 4.44 修改料片尺寸後鈦鋁複合板料片之厚度分佈

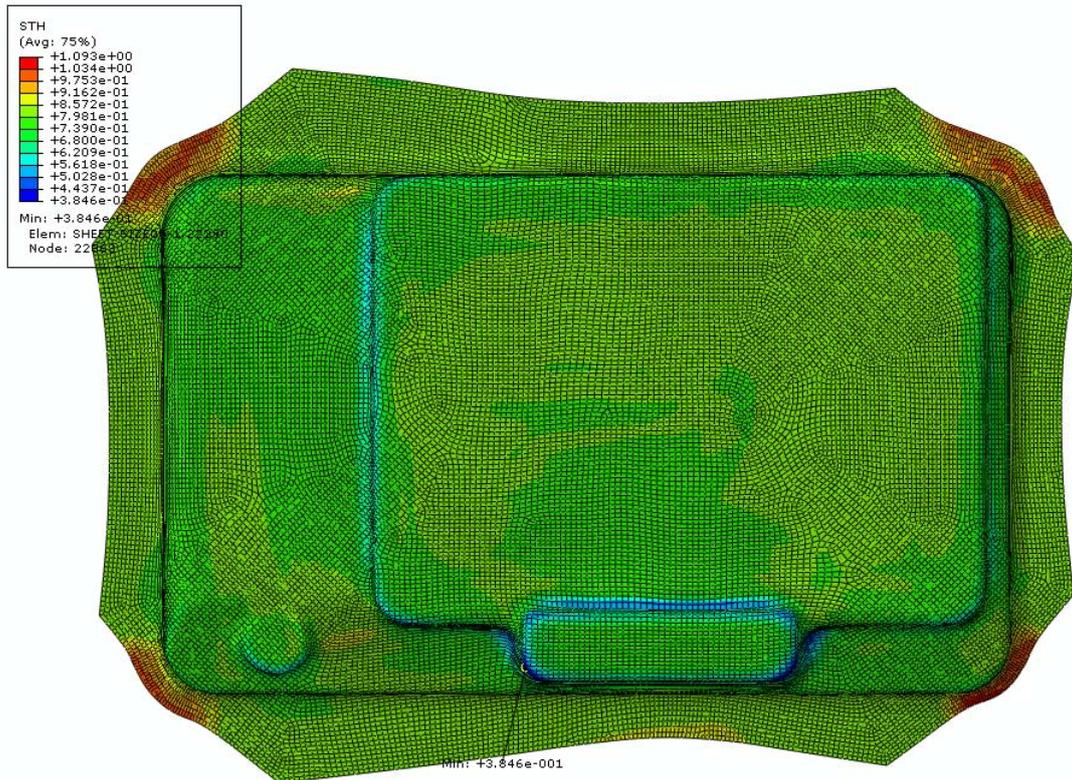


圖 4.45 修改料片尺寸後 A1050 料片之厚度分佈

4.2.7. 較佳之製程參數實驗驗證

從上述的模擬結果發現，使用改變後的製程參數可以大幅的提升最薄處的厚度，因此本研究根據模擬之模具外型製作修改後的第一階段的模具，並搭配修改後的製程參數進行板液壓成形實驗，觀察成形的結果，模具各部份之設計圖如圖 4.46 所示。並在進行實驗時分別對修改模具後使用的兩種製程參數作試驗。

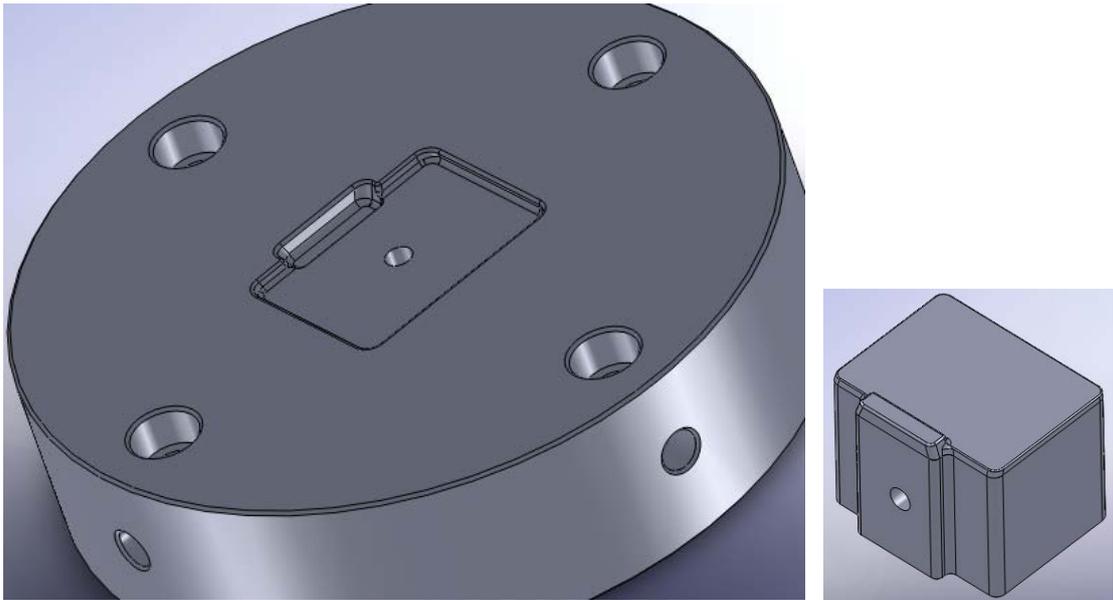


圖 4.46 模具與沖頭設計圖

由於目前無法取得鈦鋁複合板材作為成形時之材料，因此僅能使用 A1050 做為料片來進行實驗，實驗結果如圖 4.47 與圖 4.48 所示。可以看出在使用 A1050 做為料片材料後，無法得到無破損的實驗結果。但觀察修改版件形狀與置放位置前後的差異可以發現，在移動板件位置與改變形狀後，可以使後側側邊破裂消失，但在前側則因餘料增加，反而產生了破裂。不過結果也可以說明，改變料片的形狀與擺放位置對於改善破裂發生顯著的影響。



圖 4.47 初始板件形狀成形結果



圖 4.48 修改之板件形狀成形結果

第五章 結論與未來工作

本研究透過拉深試驗取得 SUS304、A1050(0.8 mm)與鈦鋁複合板材(0.9 mm)之拉伸數據作為板材之材料參數，建構出本研究之載具的數位相機有限元素模型及板液壓成形模型，並透過實驗驗證此一模型之準確度後，接續針對各種製程參數做討論，觀察料片變形及厚度分佈影響。經由比較模擬結果可得以下幾點結論：

1. 壓料板力設定

在壓料板力的部分，過大的壓料板力將會嚴重影響料片流動，造成料片破裂，由模擬結果顯示對本計畫之複雜外型數位相機產品，0.5~1 ton 左右的壓料板力設定可以使板件有較好的流動性，並限制板件起皺程度不至於嚴重影響液壓室之密封性。

2. 修改段差高度

本研究所使用之載具，其在機頂之部分垂直相交處之圓角較小，且具有較大之深寬比，此一外型除了會造成版件流動不易，且突起處亦有應力集中之現象，若需在較少的階段內完成製造，則可以適當修改最高之高度，如此可以增加板料之流動性，並使厚度在各處均勻減薄而不會過於集中造成破裂。

3. 給予模具側邊斜角

在模擬結果中，無論在第一階段或第二階段給予下模具適度的傾斜角(對於此一載具 10 度之傾斜角為較佳)，則可以明顯的改變料片的流動性，但若給予之液壓力作用無法在成形後段部分將料片貼附於沖頭上，則無法得到產品所需的外型，因此可以在前期成形階段給予適當之斜角增加料片流動性，並於最後一階段以下模具來幫助板件貼合沖頭得到所需之產品外型。

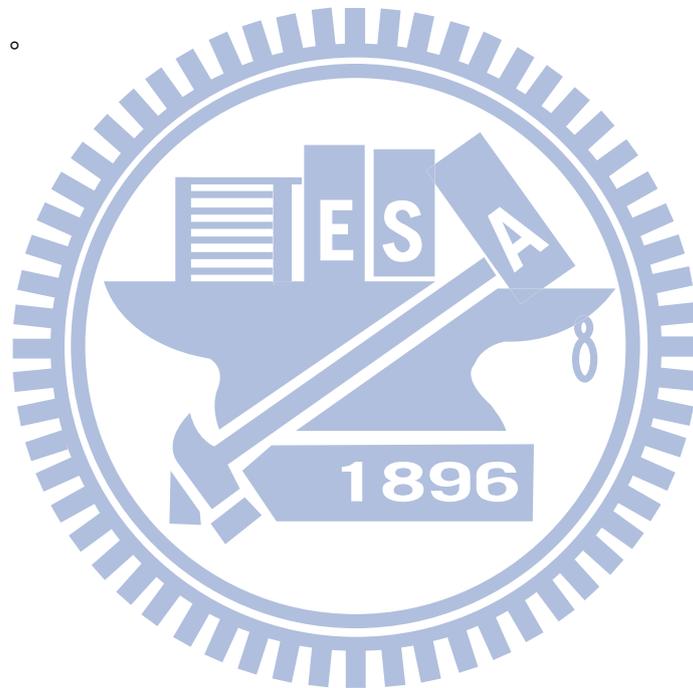
4. 改變料片位置與截角尺寸

透過有限元素模擬軟體建構出模型，並藉由模擬結果觀察產品餘料形狀，來修改料片位置與截角，可使得在成形過程中料片的流動符合所需，達到增加料片流動性、減少局部的厚度減薄，也可以避免產生皺摺。

未來工作：

1. 所使用之鈦鋁複合板材為金屬中心利用較小型的輥輪輥壓所得，除了板件在長寬上面受制於機台外，亦無法大量的取得，所以在本研究並沒有對此一板材進行成形極限試驗，後續希望能得到較大量的試片來作成形極限試驗。

2. 本研究所使用之載具較為複雜，因此在成形過程中材料各點的應力組合亦十分複雜，所以僅利用厚度減薄作為簡單判斷料片是否破裂之依據，後續若能找出一組適合之降伏準則，應可以更準確的評估材料之成形性及破裂趨勢。
3. 在後續希望能取得鈦鋁複合板材，並使用修改後之模具外型搭配實驗參數進行實驗，以期能在後續的成形實驗中得到無破裂的相機殼成品。



參考文獻

- [1] N. Abedrabbo, M.A. Zampaloni, and F. Pourboghra, “Wrinkling control in aluminum sheet hydroforming”, *Journal of Materials Processing Technology* , v. 151 , pp. 48-53 , 2004.
- [2] S. Thiruvarudchelvan and M.J. Tan, “Fluid-pressure-assisted deep drawing”, *Journal of Materials Processing Technology* , v. 192 , pp. 8-12 , 2007.
- [3] M. Kleiner, R. Krux, and W. Homberg, “Analysis of Residual Stresses in High-Pressure Sheet Metal Forming”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* , v. 53, Issue 1 , pp.211-214, 2004.
- [4] J. Danckert and K.B. Nielsen, “Hydromechanical Deep Drawing with Uniform Pressure on the Flange”, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* , v. 49, Issue 1, pp. 217-220, 2000.
- [5] 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* , v. 43, Issue 10, pp. 2331-2347, October 2001.
- [6] H.C. Tseng, Z.C. Wu, C. Hung, M.H. Lee, and C.C. Huang, “Investigation of Optimum Process Parameters on the Sheet Hydroforming of Titanium / Aluminum Clad Metal for Battery

Housing”, 4th International Conference On Tube Hydroforming 2009, Kaohsiung , Taiwan , September 6-9 , 2009.

[7] 洪景華，『複合材料之成形製程參數研究』，經濟部九十七年度科技研究發展專案合作研究計畫，金屬研究發展中心，2008。

[8] S.K. Singh , A. Dixit , and D.R. Kumar,

“Optimization of the design parameters of modified die in hydro-mechanical deep drawing using LS-DYNA” International Journal Advance Manufacture Technol , v. 38, pp.38:32–37, 2008.

[9] W.H. Cubberly, “Metals handbook”, 9th edition, v.4, Asm International Handbook Committee, 1978.

[10] J.E. Hatch, “Aluminum : properties and physical metallurgy”, 1st edition , Asm International Handbook Committee , 1984.

[11] J. Tsai and C.T. Sun, “Constitutive model for high strain rate response of polymeric composites”, Composites Science and Technology , v. 62 , pp. 1289–1297, 2002.

[12] 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。

[13] 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。

[14] 康淵、陳信吉，『ANSYS 入門』，修訂四版，全華，2007。

[15] 士盟科技股份有限公司，<http://www.simutech.com.tw>。

- [16] 愛發股份有限公司，『ABAQUS 實務入門引導』，初版，全華，2005。
- [17] T.J. Kim, D.Y. Yang , and S.S. Han, “Numerical modeling of the multi-stage sheet pairhydroforming process”, *Journal of Materials Processing Technology* , v. 151 , pp. 48–53, 2004.
- [18] P. Groche and C. Metz, “Hydroforming of unwelded metal sheets using active-elastic tools”, *Journal of Materials Processing Technology* , v. 168 , pp. 195–201, 2005.
- [19] 韓忠諭，『複合金屬板材板液壓成形之有限元素分析』，國立交通大學機械工程學系，碩士論文，2009。

