

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

高深寬比金屬板材微流道之

液壓成形研究

The Hydroforming of Microchannels With High  
Aspect-Ratio on Metallic Sheets



研 究 生：顏振傑

指導教授：洪景華 教授

中華民國 一 百 年 七 月

高深寬比金屬板材微流道之  
液壓成形研究

The Hydroforming of Microchannels With High  
Aspect-Ratio on Metallic Sheets

研 究 生：顏振傑

Student: Jhen-Jie Yan

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



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 2011

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一百年七月

# 高深寬比金屬板材微流道 之液壓成形研究

研究生：顏振傑

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

## 摘要

本研究透過本實驗室之靜水壓成形機台進行實驗，使用厚度為 0.1mm 之 SUS304 薄板，分別施加 5 種不同的壓力，成功地將微流道壓印在板材上，得到高深寬比之微流道。

同時利用有限元素模擬軟體 Abaqus/Standard 針對金屬板材微流道之液壓成形做有限元素分析，將材料試驗所得不銹鋼板之材料參數、模具幾何外形與邊界條件等來建立有限元素模型，比較此模擬結果與實驗之成形性來進行驗證。

藉此有限元素模型，利用最佳化軟體 SmartDo 串聯有限元素軟體 Abaqus/Standard，調整模具的幾何形狀、成形壓力等，以液壓成形來完成微流道流道深寬比的最佳化以及氣體反應效率的最佳化，並將其最佳化結果與實驗、相關文獻作比較與討論。

關鍵字：液壓成形，流道，有限元素，最佳化

# **The Hydroforming of Microchannels With High Aspect-Ratio on Metallic Sheets**

Student: Jhen-Jie Yan

Advisor: Dr. Ching-Hua Hung

**Department of Mechanical Engineering**  
**National Chiao Tung University**

## **ABSTRACT**

This research had experimented by using the novel hydroforming machine. Using five pressure to print microchannels on SUS304 Stainless Steel Sheet, the thickness is 0.01mm. To obtain microchannels with high aspect-ratio.

Simultaneously, using Abaqus/Standard to analyze the microchannels on metallic sheets hydroforming process. The material properties were first obtained through uniaxial tensile tests, then the finite element model were built. And the deepest channel height is taken as the indicate of sheet's formability .By the difference of the formability. this research compared the results of simulation and hydroforming experiment for verifying the accuracy of the finite element model.

Finally, to finish the optimization for aspect-ratio and optimization for reaction efficiency with hydroforming by changing the various dimension of flow channel and pressure.

Keyword: Hydroforming, Flow channel, Formability, Finite element, Optimization

## 誌謝

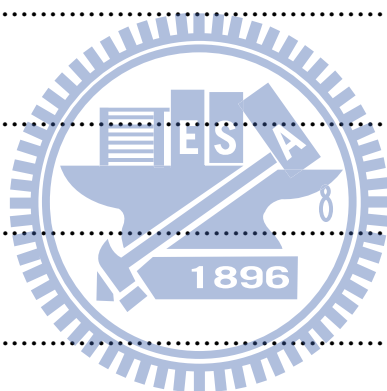
沒想到兩年過得真快，在這些日子裡，最感謝的是指導教授洪景華老師，當我在研究過程中遇到困難時，都會很有耐心的教導且給予建議。而老師開朗且有趣的對話方式，使我在與老師的對話過程中比較不會有壓力，而老師的為人與處事態度是很令人值得學習的。

而在實驗室的這些日子中，實驗室和諧的氣氛，讓我在研究過程中感到非常的自在與安心。問麒禎學長時，總是能得到很好的答案或建議；帶著我閱讀期刊與研究的志嘉學長，總是很有耐心並時常提醒我要注意的地方；低調的銘傑學長，開朗的彥彬學長，及剛進實驗室就和大家相處很融洽的志傑學長，真的很感謝學長們的照顧；還有跟我同屆的同儕們，馨勻是個活潑大方的女生，雅喬則讓實驗室常常充滿了歡笑，跟書麟則是有聊不完的話題。而學弟妹宜均、致豪、呂翔、品帆和彥佑，幫忙實驗室的鎖事，讓我們在寫論文時可以不用分心。

也感謝台大陳復國老師實驗室的同學們在拉伸試驗中的協助與建議，還有感謝父母讓我沒有經濟上的壓力，家人對我的支持與關心，讓我在外地能夠無慮的生活。

# 目錄

摘要 .....	i
ABSTRACT .....	ii
誌謝 .....	iii
目錄 .....	iv
表目錄 .....	vii
圖目錄 .....	viii
第一章 緒論 .....	1
1.1 簡介 .....	1
1.1.1 燃料電池介紹 .....	1
1.1.2 靜水壓微成形技術 .....	4
1.2 文獻回顧 .....	6
1.3 研究動機與目的 .....	11
1.4 研究方法 .....	12
1.5 論文架構 .....	13
第二章 材料性質與試驗 .....	14



2.1	拉伸試驗.....	14
2.1.1	試驗目的.....	14
2.1.2	彈性係數與指數定律 .....	14
2.1.3	實驗方法及結果 .....	15
2.2	材料熱處理.....	18
2.3	金相實驗.....	20
2.4	液壓膨脹實驗 .....	22
第三章有限元素分析.....		24
3.1	有限元素分析系統.....	24
3.2	有限元素模型之基本假設 .....	25
3.3	建立模型.....	26
3.3.1	模具、板件外形與邊界條件設定.....	26
3.3.2	材料性質設定 .....	28
3.4	網格收斂性測試 .....	28
3.5	後處理.....	30
3.6	最佳化分析系統 .....	31
3.7	最佳化軟體介紹－SmartDO .....	32

第四章液壓成形實驗與模擬.....	35
4.1 實驗機台與模具介紹.....	35
4.1.1 靜水壓微成形機台.....	35
4.1.2 模具.....	37
4.1.3 量測儀器.....	37
4.2 初步有限元素模擬與實驗比較.....	38
4.3 模型簡化之驗證.....	41
4.4 最佳化分析.....	42
4.4.1 深寬比之探討.....	45
4.4.2 反應效率之探討.....	48
4.4.3 深寬比與反應效率之結論.....	50
第五章結論與未來工作.....	52
5.1 結論.....	52
5.2 未來工作.....	53
參考文獻.....	55





## 表目錄

表 1 不同流道幾何的反應效率[19] .....	10
表 2 不同流道幾何的成形性[19] .....	11
表 3 SUS304 材料性質 .....	19
表 4 腐蝕液成份 .....	21
表 5 靜水壓實驗結果 .....	39
表 6 最佳化設計變數 .....	44
表 7 最佳化限制條件 .....	44
表 8 最佳化前製程參數、成形深度 .....	45
表 9 實驗結果與文獻比較 .....	46
表 10 深寬比最佳化後的製程參數、成形深度 .....	47
表 11 反應效率最佳化後的製程參數、成形深度 .....	49
表 12 實驗、最佳化的結果與相關文獻的比較 .....	51

## 圖目錄

圖 1 氫氧燃料電池示意圖[1].....	2
圖 2 雙極板上之微流道[1].....	3
圖 3 靜水壓成形技術圖示[15].....	5
圖 4 (a)沖壓成形與(b)靜水壓成形微流道輪廓曲線[15].....	6
圖 5 沖壓成形與靜水壓成形在各流道間之高度差異[15].....	7
圖 6 沖壓成形與靜水壓成形之深寬比比較[15].....	7
圖 7 利用雷射束針對微結構成品進行量測[10].....	8
圖 8 靜水壓壓力與深寬比之關係圖[16] .....	9
圖 9 流道幾何參數示意圖[19].....	10
圖 10 MTS-810 拉伸試驗機.....	16
圖 11 拉伸試驗試片尺寸圖(mm).....	17
圖 12 SUS304 拉伸試驗試片配置圖.....	17
圖 13 熱處理前 SS304 真實應力真實應變曲線圖 .....	18
圖 14 熱處理加熱過程 .....	19
圖 15 熱處理後 SS304 厚度真實應力真實應變曲線 .....	20
圖 16 板件熱處理後之金相圖.....	22
圖 17 aluminum AA 6111 之真實應力應變曲線[21].....	22

圖 18 液壓膨脹實驗示意簡圖[22] .....	23
圖 19 靜水壓微成形示意圖 .....	26
圖 20 流道全圖 .....	27
圖 21 詳細流道尺寸[15] .....	27
圖 22 模具與板件配置 .....	27
圖 23 壓力=100MPa，meshsize=0.034 之應力分布 .....	29
圖 24 壓力=100MPa，meshsize=0.025 之應力分布 .....	29
圖 25 壓力=100MPa，meshsize=0.02 之應力分布 .....	29
圖 26 壓力=100MPa，meshsize=0.0167 之應力分布 .....	30
圖 27 網格大小與最大深度關係圖 .....	30
圖 28 最佳化設計基本原理[17] .....	32
圖 29 SmartDO 連接 Abaqus/Standard 流程圖[17] .....	34
圖 30 靜水壓成形機台之示意圖[18] .....	36
圖 31 靜水壓成形機台壓力與擠桿尺寸示意圖[18] .....	36
圖 32 模具實體圖 .....	37
圖 33 CMOS 雷射位移感測器實體圖 .....	38
圖 34 液壓後板件流道輪廓之量測圖 .....	38
圖 35 靜水壓成型機台板件放置處 .....	39
圖 36 成形後的板件圖 .....	40

圖 37 實驗與修正前模擬成形比較圖 .....	40
圖 38 實驗與修正後模擬成形比較圖 .....	41
圖 39 實驗與簡化模擬比較圖 .....	42
圖 40 流道幾何示意圖 .....	44
圖 41 最佳化前之等效應變分布 .....	45
圖 42 深寬比最佳化後之等效應變分布 .....	47
圖 43 反應效率最佳化後之等效應變分布 .....	49



# 第一章 緒論

## 1.1 簡介

近年來由於原油價格持續攀升以及亞洲各國經濟持續成長，未來全球將遭遇石油供應短缺的危機，隨著石油的存量越來越少，高油價時代來臨已無可避免。此外各種文獻報告顯示著人類活動與全球氣候變遷高度相關，因此減碳抗暖化成為全球新興運動，在面對油價高漲壓力、及溫室氣體減量之國際環保趨勢，尋找高效率之替代能源技術成為全球當務之急。

### 1.1.1 燃料電池介紹

燃料電池是一種簡單、潔淨、效率高及運轉安靜之發電裝置 [1]-[6]，其基本結構如圖 1 所示，中間包含一層電解質層(質子交換膜)，兩邊則分別貼附著多孔性陰極與陽極，在電極外側則有刻有流體通道之雙極板。在陽極持續補充氫氣，而陰極則持續補充氧氣，在電極上發生氧化還原反應，其質子通過電解質到達陰極，而電子則從陽極經過外接負載抵達陰極而完成電流迴路，反應產物水以及未反應之氫氣與氧氣則經由電極出口排出。此外並可藉由熱回收設計將整體能源利用率提升到 70% 以上，遠高於石油之轉換率 35-40%；且具有

環保特性，使用時溫室氣體排放量低，為當前歐美日各國積極發展的明星科技之一。

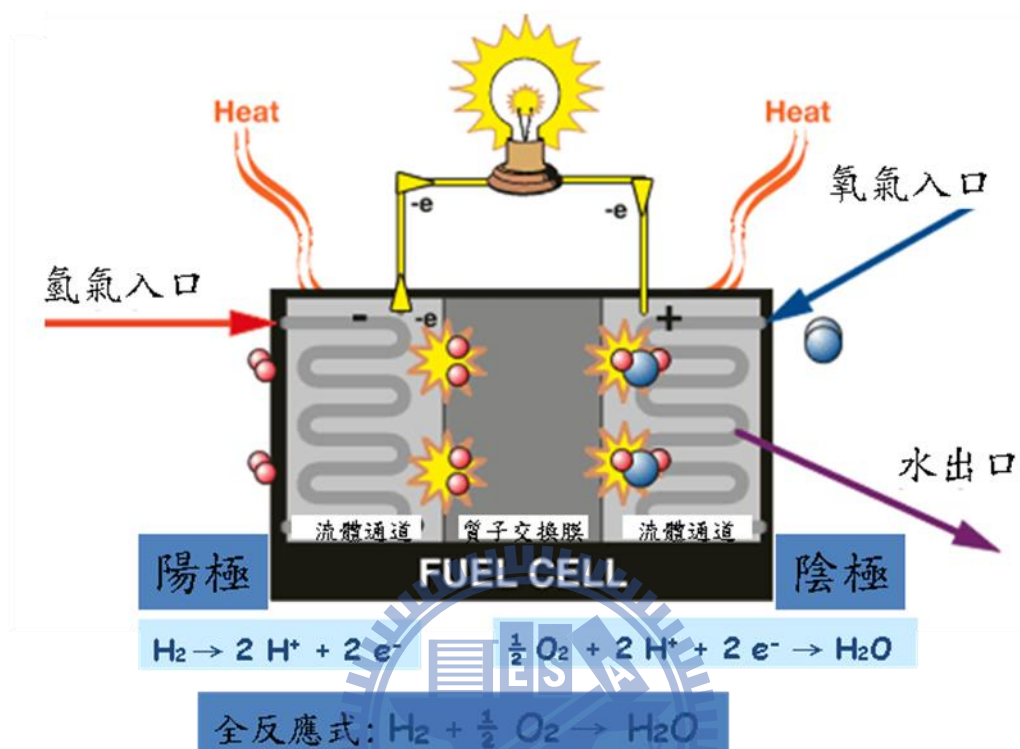


圖 1 氫氧燃料電池示意圖[1]

儘管燃料電池具有許多潛在的優勢，但是現階段在價格上仍無法與其他存在的發電裝置相競爭。舉例來說燃料電池元件中，雙極板是重要且昂貴的關鍵組件(圖 2)。在燃料電池中，雙極板占了約 60-80 % 的重量、30-45 % 的成本，而在雙極板上有著深、寬度約 100-500 $\mu\text{m}$  的微流道(micro-channels)[8][9]，其功能與特性主要為分隔還原劑(如氫氣)及氧化劑(如氧氣或空氣)。雙極板之要求必須具有隔絕氣體的功能，不能採用多孔透氣材料。雙極板所處的環境同時存在還原介質及氧化介質，所以雙極板材料必須能在這種條件下和其工作的電位

範圍內（例：0.6-0.7V 單位電池）具有一定抗腐蝕能力、在雙極分隔板兩側應有使反應氣體均勻分布的通道，以確保反應氣體在整個電池各處均勻分布。雙極板亦當作在陰極及鄰近另一單元電池（cell）陽極之電流傳導，做為電流收集器，必須是電的良導體。雙極板亦必須是熱的良導體，以確保電池組的溫度（80-90°C）均勻分布和散熱設計的實施。所以雙極板必須對氣體有高不透氣性、高的電傳導性、高的熱傳導性及耐腐蝕性，另外雙極板也必須有足夠的彎曲強度以抵抗操作壓力及熱循環穩定性[1][10]。

然而不論是質子交換膜燃料電池、直接甲醇燃料電池亦或是甲醇重組燃料電池在可攜式燃料電池的研發上對於雙極板的要求，除了前文所述之基本要求外，還必須要求雙極板之厚度越薄、重量越輕越好。除此之外，現階段可攜式燃料電池所必須要克服的議題就在於如何開發出低成本之雙極板。

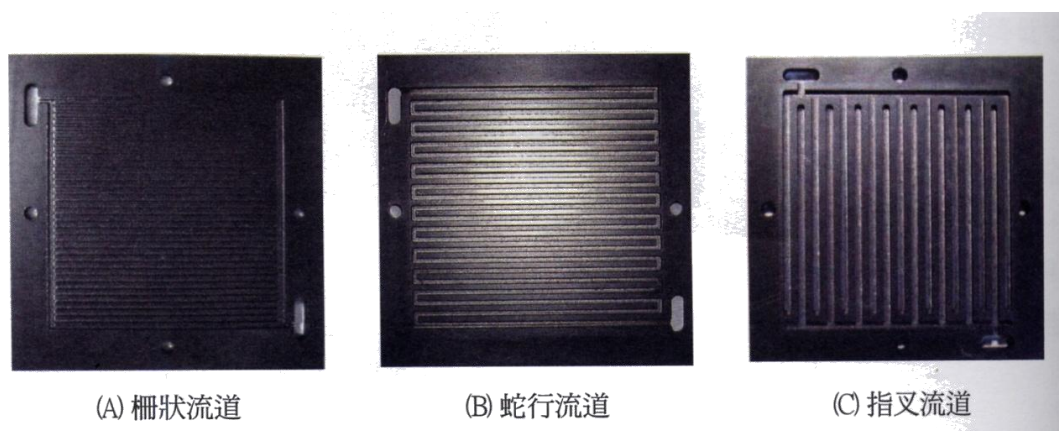


圖 2 雙極板上之微流道[1]



現階段已經有許多機構針對於雙極板的材料、微流道之幾何形狀以及成形方法進行了各種研究。近幾年來針對質子交換膜燃料電池（PEMFC）較常使用的雙極板材料有石墨（graphite）、石墨/聚合物複合材料（polymer-graphite composite）、石墨/石墨複合材料（carbon/carbon composite）以及不鏽鋼（stainless steel）等。

金屬雙極板由於其成本低、良好的機械、電以及熱的性質並且具有很好的成形性，且能成形的厚度較薄（0.1~0.5mm），而且可採用衝壓成形生產方法加工孔道與流場，有助於降低成本與提高體積功率。然而當金屬雙極板處於燃料電池的工作環境下時會有腐蝕跟溶解的情況發生[9][10][11]，因此常常必須在金屬表層鍍上一保護膜用來達到抗腐蝕的目的，並有效的延長電池之壽命[11][12][13][14]。因此保護膜必須選擇其熱膨脹率與金屬板材相近之材料，以避免微小裂縫與氣孔產生[10]。在本研究中，為了克服鍍膜之問題，將選用耐腐蝕性較佳之 SUS304。

### 1.1.2 靜水壓微成形技術

靜水壓成形是利用流體（高壓油）作為工作介質，利用壓縮流體特有的等向性（isotropic），對工作胚料進行等向性加壓成形，因此能夠給於工件胚料之表面施加一均勻之壓力，如圖 3 所示。

而相較於其他雙極板的製造技術，靜水壓成形包含了下列優勢



(1) 高深寬比，利用靜水壓成形所得之深寬比高於傳統沖壓成形之結果。(2) 對工件施加一均勻壓力，液壓具有等向性，因此四面八方所受到的壓力是一致的。(3) 只需製作單一模仁，與傳統沖壓成形相比，只需製作一個模仁即可。(4) 減小摩擦所造成之影響，由於只需一個模仁，因此與工件間的接觸面積減少，減少了對材料流動的影響。(5) 降低整體燃料電池之成本，使用靜水壓快速成形金屬雙極板之技術，能夠大幅降低其整體成本。

因為靜水壓成形擁有以上優點，所以已經被應用於各項微小金屬元件之製程，包括向來要求產品輕薄短小的 3C 產業。若能利用靜水壓成形的方式，依照所設計之模具流道幾何，找到適合的製程參數，如此一來微小結構的成形將會更容易且更精確，生產微結構元件的成本將可以大大地減少。

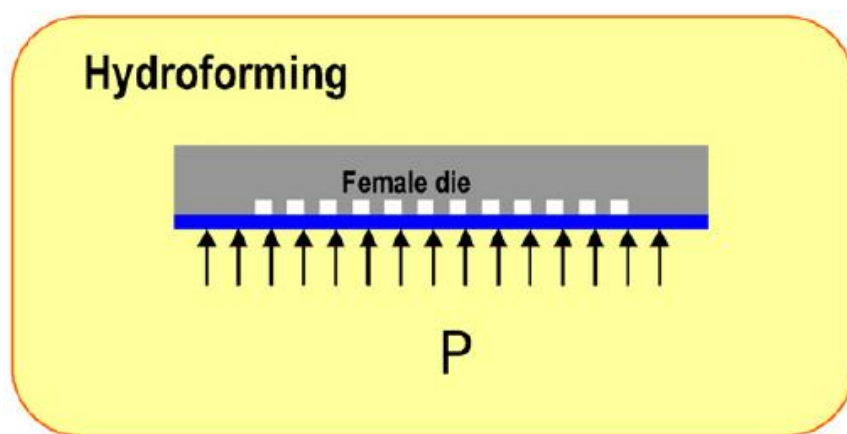


圖 3 靜水壓成形技術圖示[15]

## 1.2 文獻回顧

Mahabunphachai[15]在 2010 年針對成形 0.05mm 厚之金屬雙極板的傳統沖壓成形以及靜水壓成形進行比較。其實驗結果表示，靜水壓成形之微流道較一般傳統之沖壓成形之微流道為均勻(圖 4)。靜水壓成形之微流道在各流道間之差異約為 1.3%(圖 5)，而沖壓成形之微流道其各流道間之差異約為 4.1%，由此可知靜水壓成形在成形性以及重複性上優於傳統之沖壓成形。此外靜水壓成形技術所得到之深寬比亦優於沖壓成形之深寬比(圖 6)。

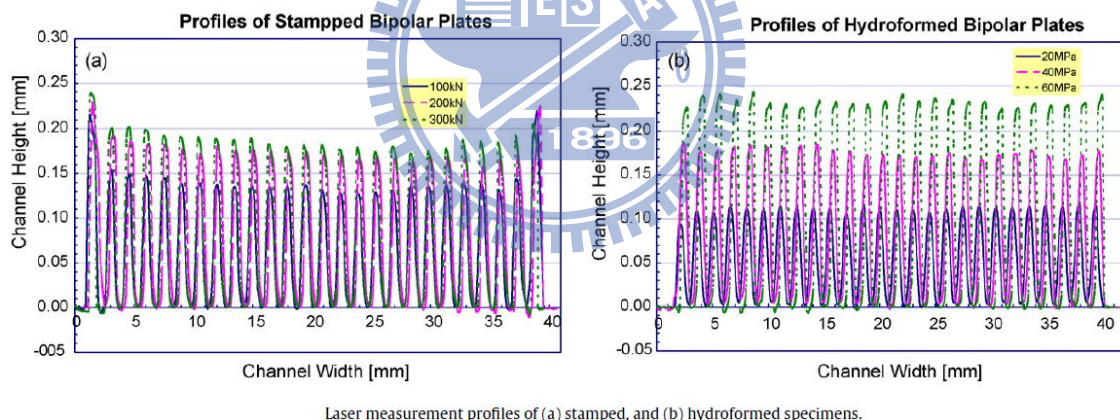


圖 4 (a)沖壓成形與(b)靜水壓成形微流道輪廓曲線[15]

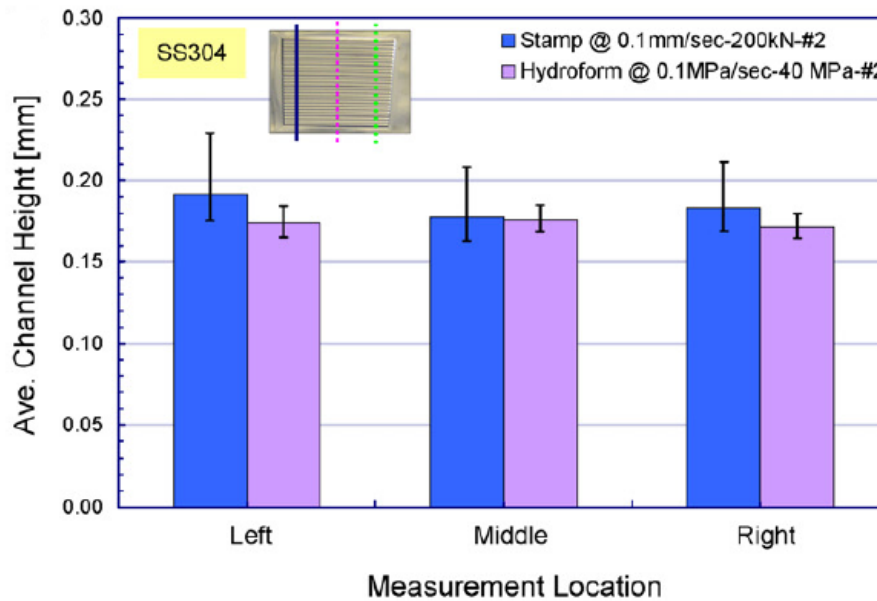


圖 5 沖壓成形與靜水壓成形在各流道間之高度差異[15]

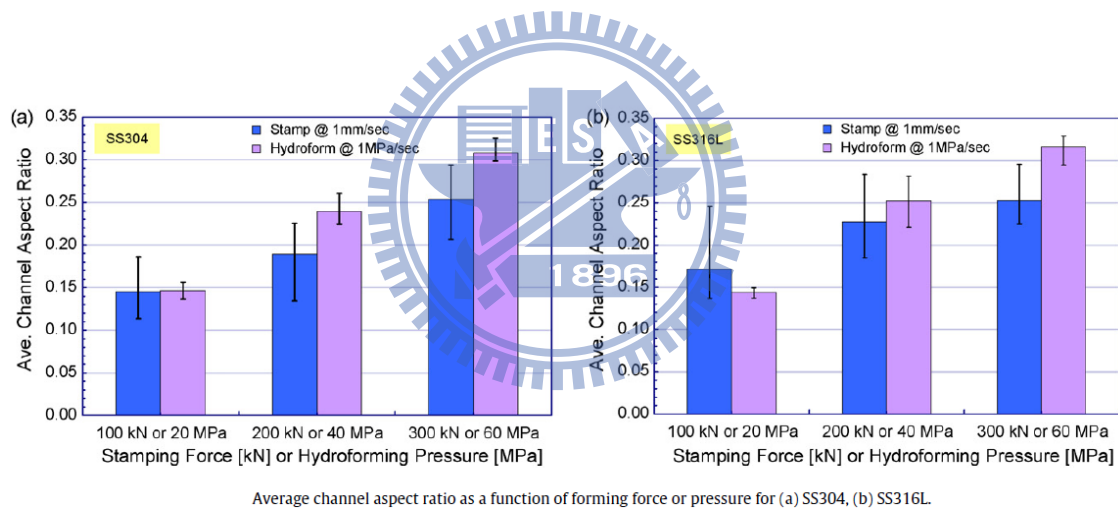


圖 6 沖壓成形與靜水壓成形之深寬比比較[15]

Koc 等人[10]之研究，利用靜水壓成形技術使用 55.2MPa 以及 82.7MPa 之液壓在板厚 0.051mm 金屬薄板上成形微流道，其結果顯示若想獲得高深寬比之微流道其必須要有大流道間距、少數量流道、較寬之流道、較高之液壓。其成形實驗結果如圖 7 所示。實線表示模具深度，而虛線則表示工件成形深度。

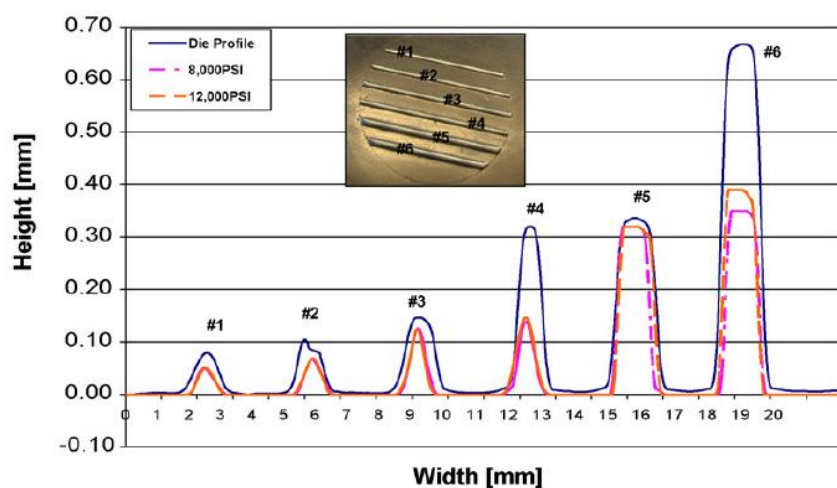


圖 7 利用雷射束針對微結構成品進行量測[10]

Koc 等人[16]則建立了一個有限元素模型，選擇的材料為 SUS304，並且利用描述材料流動的曲線( $\sigma = K\epsilon^n$ )找出其塑性變形的特性，將材料性質帶入有限元素模擬軟體模擬，並與實驗的數據做對照，以驗證此有限元素模型是可用的。其結果顯示，若想獲得高深寬比之微流道其必須有較大之流道間距、較寬之流道以及使用較高之液壓。而模擬結果(圖 8)也顯示想要成形較高之深寬比微流道，其所需施加之液壓將更大，深寬比定義為(1)式。然而此為模擬結果，尚無相關之實驗驗證。

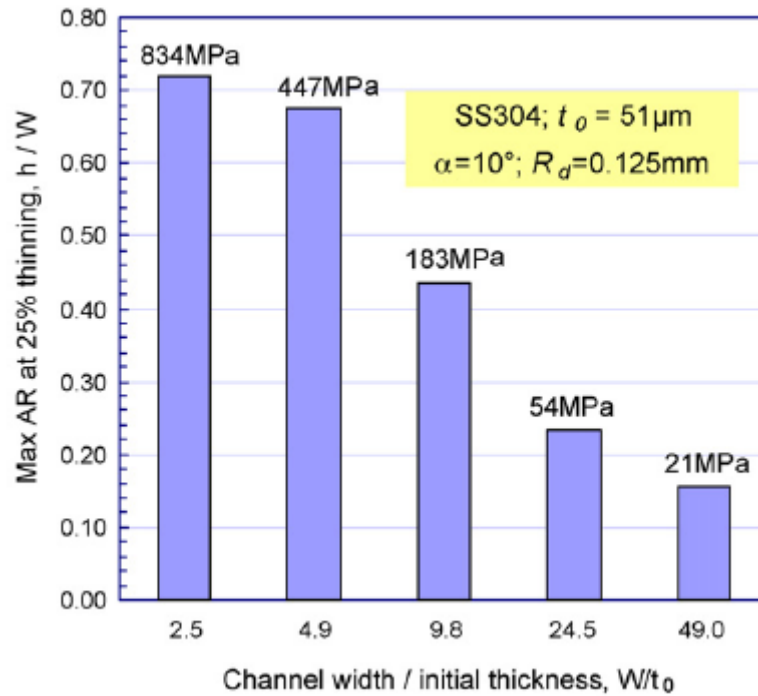


圖 8 靜水壓壓力與深寬比之關係圖[16]

$$\text{深寬比} = \frac{\text{最大成形深度}}{\text{流道寬度}} \quad (1)$$

Peng 等人[19]在能夠成形出微流道形狀的前提下，找出電池的最佳反應效率，為了得到最佳的反應效率與成形性（formability）之流道幾何設計，並提出了一個以靜水壓成形的金屬雙極板之流道幾何最佳化模型。藉由改變流道深度(h)、流道寬(w)、流道間距(s)和導圓角半徑(r)等幾何參數(如圖 9)，模擬反應效率(表 1)與成形性之結果(表 2)，再將這些數值各推得一迴歸方程式，(2)式為反應效率之方程式，(3)式為成形性之方程式，以反應效率為目標函數，成形性為限制條件。藉由最佳化方式得到最佳化之流道尺寸為，流道深度(h)為 0.5mm，流道寬(w)為 1.0mm，流道間距(s)為 1.6mm，導圓角半徑(r)

為 0.5 mm，得到的反應效率為 79%，成形性為 1，藉由此方法將可以  
改善金屬雙極板用靜水壓成形之燃料電池的效能。

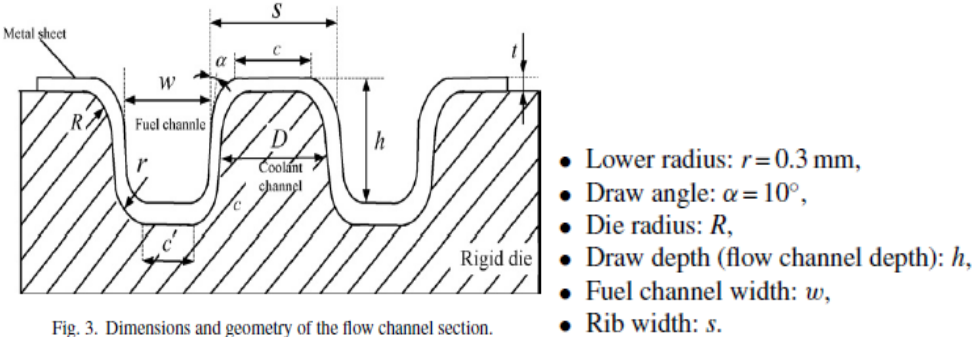


Fig. 3. Dimensions and geometry of the flow channel section.

圖 9 流道幾何參數示意圖[19]

表 1 不同流道幾何的反應效率[19]

Reaction efficiency (%) with various dimension of flow channel					
Depth of flow channel, $h$ (mm)	Width of land, $s$ (mm)	Width of flow channel, $W$ (mm)			
		0.5	1	1.5	2
0.5	0.5	78.5	80	82	80
	1	78.3	80	80	80
	1.5	77.8	80	80	80
	2	76.6	78.5	79.2	79
1.0	0.5	79	80	83	80.7
	1	80	81.5	82.6	81.5
	1.5	79.4	80.8	82	81.2
	2	77.7	78.8	80	80.2
1.5	0.5	81.5	82	84	82.3
	1	81.8	83.3	83.8	83.1
	1.5	81.2	83	83.3	83.1
	2	79.9	81.1	82.6	82.1
2.0	0.5	79.7	80.7	84	80.9
	1	80	82.1	82.9	81.8
	1.5	79.5	81	82.3	82
	2	78.5	79.8	81.1	80.8



表 2 不同流道幾何的成形性[19]

Design of experiments for hydroforming process simulations

No.	Width $w$ (mm)	Depth $h$ (mm)	Upper radius $R$ (mm)	Formability $f_d$
1	1.15	0.75	0.5	1.31
2	1.15	0.75	0.7	1.432
3	1.15	1.25	0.5	0
4	1.15	1.25	0.7	0
5	2.05	0.75	0.5	1.451
6	2.05	0.75	0.7	1.571
7	2.05	1.25	0.5	0.946
8	2.05	1.25	0.7	1.278
9	1.6	1.0	0.6	1.359
10	0.7	1.0	0.6	0
11	2.5	1.0	0.6	1.399
12	1.6	0.5	0.6	1.782
13	1.6	1.5	0.6	0
14	1.6	1.0	0.4	1.064
15	1.6	1.0	0.8	1.496

$$f_r = 71.444 + 7.228h + 2.398s + 6.759w - 2.489h^2 - 1.569s^2 - 2.331w^2 + 0.209hs + 0.277sw + 0.059wh \quad (2)$$

$$f_d = 1.725 + 0.529w - 1.965h + 0.567R + 0.782w^2 - 1.767h^2 - 1.319R^2 + 2.159wh + 0.467hR + 0.917Rw \quad (3)$$

### 1.3 研究動機與目的

隨著電子產品近年來小型化的趨勢，精密元件的需求越來越多，面對如此大的市場需求，將需要有一種可以量產的生產技術。雙極板是小型可攜式燃料電池中極為重要且昂貴的關鍵零件，而靜水壓微成形用於金屬板能夠降低燃料電池之成本、提高產量是極具前途之關鍵技術，尤其靜水壓微成形能夠降低微小化時摩擦所帶來之影響提高成品的成形效果。由文獻發現，目前利用靜水壓成形所使用的壓力值都

不高且都只能成形於 0.05mm 厚之金屬板上，故所能達到的成形性也就被限制住了。本實驗室已研發了一新型高靜水壓微成形機，理論上其最高液壓可到 1125MPa，因此能夠選擇較厚之金屬板材且強度較高。希望能透過有限元素及最佳化分析獲得最佳之幾何參數。首先求得在高靜水壓成形技術下，所能成形之最佳深寬比；另外，雙極板應用於燃料電池中，將在高靜水壓成形技術下求得其最佳氣體反應效率

## 1.4 研究方法

本研究使用本實驗室之新型靜水壓微成形機台，以厚度 0.1mm 之 SUS304 做為液壓成形之板件，使用五種壓力，再用雷射位移感測器量測成形後板件的流道深度，得到了板材在不同壓力下的成形性。

此外，透過材料試驗取得板材之機械性質，將取得的材料參數代入有限元素軟體 Abaqus/Standard 進行模擬分析，並針對不同壓力下的模擬結果與實驗成品之成形深度做比較。經過修正並且確認模型之準確性後，將此模型串聯至最佳化軟體，藉由改變不同製程參數來對板件做成形分析，以求得在靜水壓微成形技術下所能達成之深寬比最佳化，以及氣體反應效率最佳化。



## 1.5 論文架構

本研究第一章為文獻回顧、研究的動機及目的。第二章以各種材料試驗求得材料性質。第三章將使用有限元素軟體，建立出靜水壓微成形的模型。第四章將利用有限元素法模擬並與實驗之結果進行比較與驗證，再利用此驗證後的模型串連最佳化軟體求得流道深寬比最佳化與氣體反應效率最佳化。第五章將討論研究結果與未來工作。



## 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不銹鋼板材之成形做分析，因此將透過材料試驗求得不銹鋼板材之彈性係數、真實應力真實應變曲線與方向性等，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

本研究中所使用之不銹鋼板材的厚度為0.1mm，以此求得基本機械性質，如：彈性係數、塑性性質及方向性等，以此代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，而拉伸力透過換算可以得到材料的工程應力，然而在後續在模擬過程中，則是需要真實應力真實應變數據，因此透過(4)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是單軸拉伸，因此將不考慮頸縮後之數據。

$$\sigma_T = \frac{F}{A} e^{\varepsilon_T} \quad (4)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1 + e) \quad (5)$$

其中  $\sigma_T$ ：真實應力(MPa)、 $\varepsilon_T$ ：真實應變、F：荷重值(N)、

A：原截面積(mm<sup>2</sup>)、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(5)式扣除前段彈性部份，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)(6)式與其趨近，可利用此指數定律有效表示材料的機械性質[20]。

$$\sigma_T = K(\varepsilon_T^p)^n + \sigma_y \quad (6)$$

其中， $\varepsilon_T^p$ ：真實塑性應變、 $\sigma_y$ ：初始降伏應力、K, n：常數

### 2.1.3 實驗方法及結果

本研究之拉伸試驗是採用 MTS-810 萬能拉伸試驗機（圖 10），於試片貼上雙軸應變規，以測量其軸向應變及側向應變值。實驗所使用之應變規為 KYOWA 公司所生產之雙軸應變規 KFG-1-120-D17-11 L1M2S。



圖 10 MTS-810 拉伸試驗機

拉伸試驗之試片尺寸由 ASTM-E8 之拉伸規範決定，然而由於取得之不銹鋼試片尺寸過小( $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 0.1\text{mm}$ )，故將試片大小依原始試片尺寸做等比例縮小，拉伸試片尺寸如圖 11 所示。另外，考慮不銹鋼薄板的方向性，因此用了三種方向的拉伸試片，其配置如圖 12 所示。本實驗在常溫下進行，並設定拉伸速率為  $0.02\text{mm/s}$  將試片拉伸至斷裂，設定擷取器之擷取速率為  $50\text{times/s}$  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。

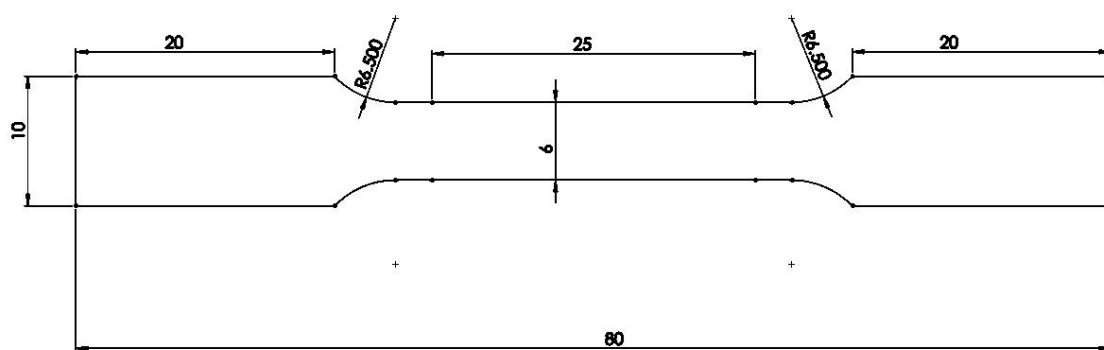


圖 11 拉伸試驗試片尺寸圖(mm)

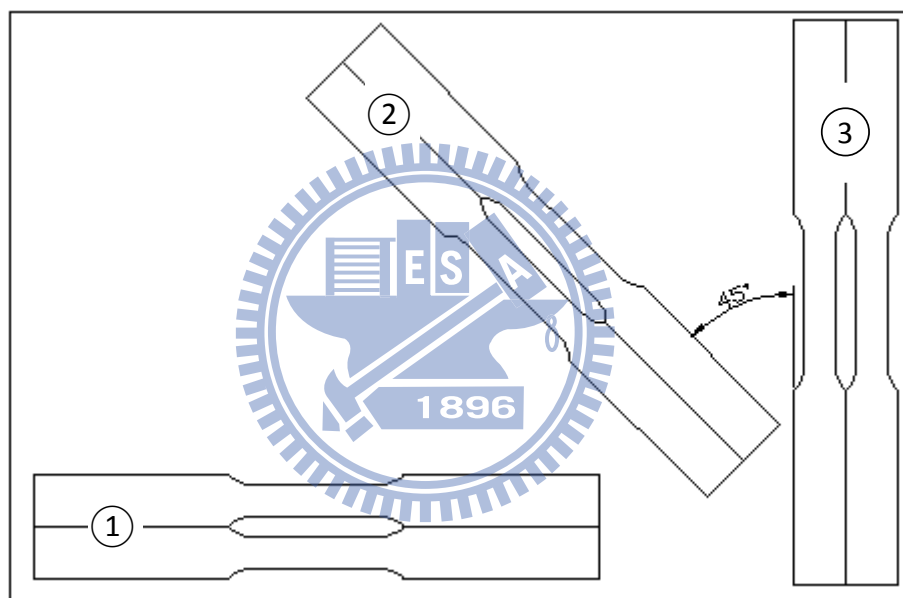


圖 12 SUS304 拉伸試驗試片配置圖

圖 13 為試片拉伸試驗所得到之不銹鋼 SUS304 在 1、2、3 三方向的真實應力真實應變曲線，考慮到材料較薄且材料較軟，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只有稍微不同，視為實驗操作上之誤差，因此由結果可知，其試片並無異向性存在，後續分析亦將不考慮板材之方向性。

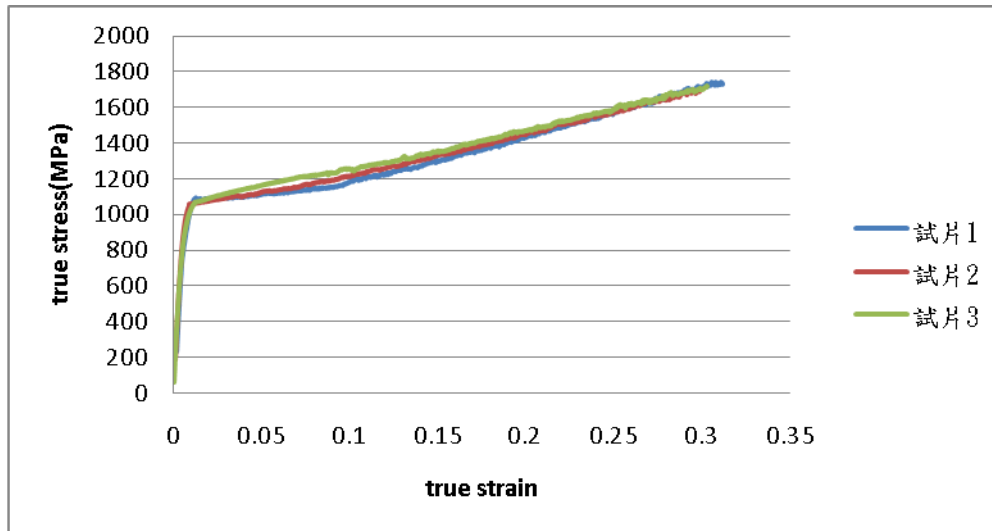


圖 13 熱處理前 SS304 真實應力真實應變曲線圖

## 2.2 材料熱處理

由一開始的拉伸試驗中發現不銹鋼板件之降伏強度遠大於手冊之值，初步判斷可能為板材經過冷滾軋後加工變形，將使內部晶粒因加工變形朝向某特定方位聚集造成材料之加工硬化，為了讓試片在成形時有好的成形性與讓所有的試片有同一基準點，因此需要經過固溶化熱處理使其再結晶。

SUS304屬沃斯田鐵系不銹鋼，再結晶溫度在 $850^{\circ}\text{C}$ 至 $1000^{\circ}\text{C}$ ，熔點約在 $1400^{\circ}\text{C}$ ，所以熱處理溫度要在再結晶溫度到熔點之間，即 $1000^{\circ}\text{C}$ 至 $1400^{\circ}\text{C}$ 。其固溶化熱處理的實驗委託政新金屬工業股份有限公司，其真空熱處理爐不銹鋼退火之加熱曲線如圖14所示，一開始以1分鐘 $10^{\circ}\text{C}$ 的升溫速度，從室溫加熱至 $600^{\circ}\text{C}$ ，經過30分鐘的持溫，讓

爐內的溫度均勻分布後，持續加溫到850℃，此階段之加溫是為了避開不銹鋼的敏化溫度，讓板件不會因為敏化而造成碳化鉻的析出，升溫至850℃在持溫30分鐘，接著升溫至1030℃，持溫30分鐘，最後用氮氣降溫，而熱處理後之材料性質如圖15所示，相關的材料性質如表其降伏強度為550MPa，強度明顯下降許多，後續將使用此數據作為模擬之用。

表 3 SUS304 材料性質

楊氏係數	蒲松比	降伏強度	K	N
195GPa	0.34	550MPa	2177.4	0.92

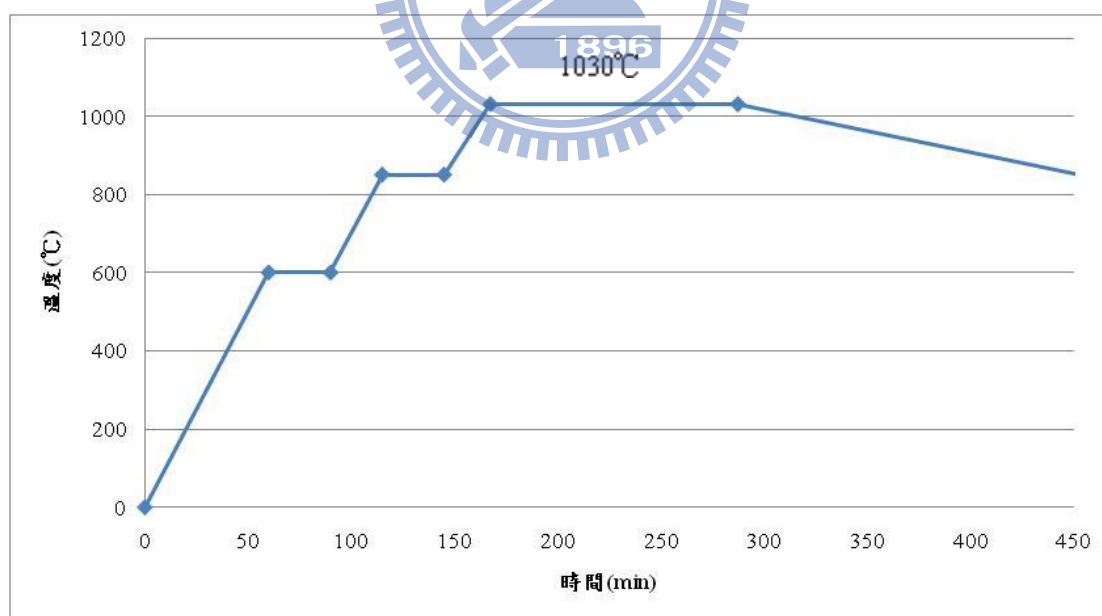


圖 14 熱處理加熱過程

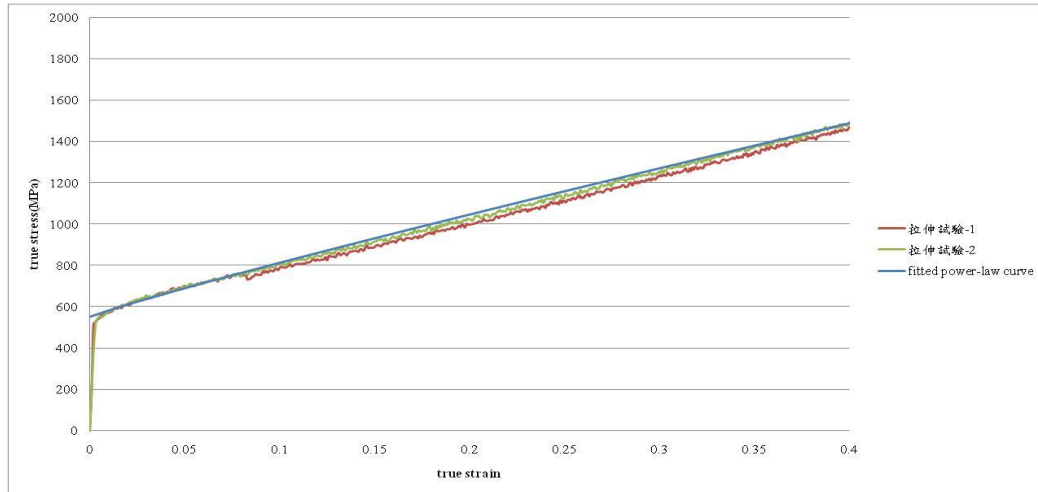


圖 15 熱處理後 SS304 厚度真實應力真實應變曲線

## 2.3 金相實驗

完成固溶化熱處理後的試片，將進一步進行金相微組織觀察。步驟如下：

- (1) 將欲觀察的試片切片鑲埋。
- (2) 以砂紙研磨，依序由粒度 240、400、600、800、1000、1200、1500，每道研磨後研磨方向與上一道方向轉 90 度進行研磨，並觀察確認上一道的磨痕完全被去除。
- (3) 研磨機換上拋光絨布，以 1 $\mu$ m 的氧化鋁水溶液進行拋光。
- (4) 經拋光後的試片再以清水洗淨，並速予吹乾，便可進行試片之晶界腐蝕。

金相的觀察上，SUS304 蝕刻液配方是參考 ASTM 規範 E407-70，成份如表 4 所示。試片腐蝕的時間約為 15 至 20 秒，使材料表面的晶



界顯露，腐蝕後的試片即可用光學顯微鏡觀察，並將影像擷取下來。

表 4 腐蝕液成份

成份	比例(%)
HNO <sub>3</sub>	50
HCl	25
H <sub>2</sub> O	25

完成晶界的腐蝕後之試片，可以清楚的觀察到晶粒的大小，而計算平均晶粒大小( $D$ )的方法是使用 ASTM 規範 E112 中所規定的線截斷法(linear intercept)，利用光學顯微鏡所拍攝的照片，於上面畫幾條水平線、垂直、傾斜 45 度的直線，計算量測長度內所截取到的晶粒個數，將得到的數據帶入(7)式，即可以求到平均晶粒大小：

$$D = \left(\frac{L}{N}\right) \times \frac{1}{M} \quad (7)$$

其中  $D$ ：平均晶粒大小

$L$ ：所畫線段的總長度

$N$ ：所截取的晶粒的個數

$M$ ：放大的倍率

板厚 0.1mm 之不銹鋼 SUS304 用光學顯微鏡所拍攝的金相圖如圖 16 所示，並用線截斷法計算出平均晶粒大小約為 43.86 $\mu\text{m}$ 。

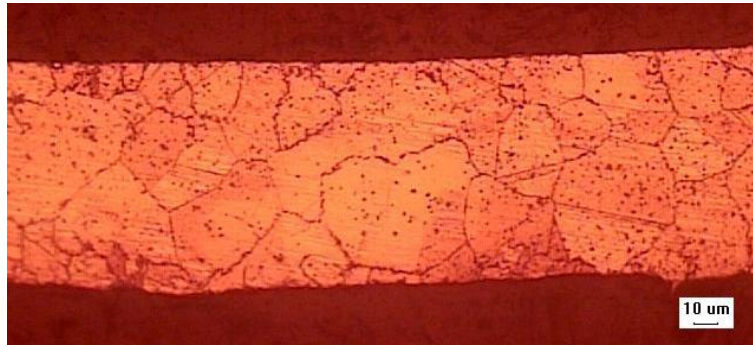


圖 16 板件熱處理後之金相圖

## 2.4 液壓膨脹實驗

由圖 17 看出利用液壓膨脹實驗所得到的材料性質，將可以得到較長之應力應變曲線，可以使成形模擬的準確度提高。

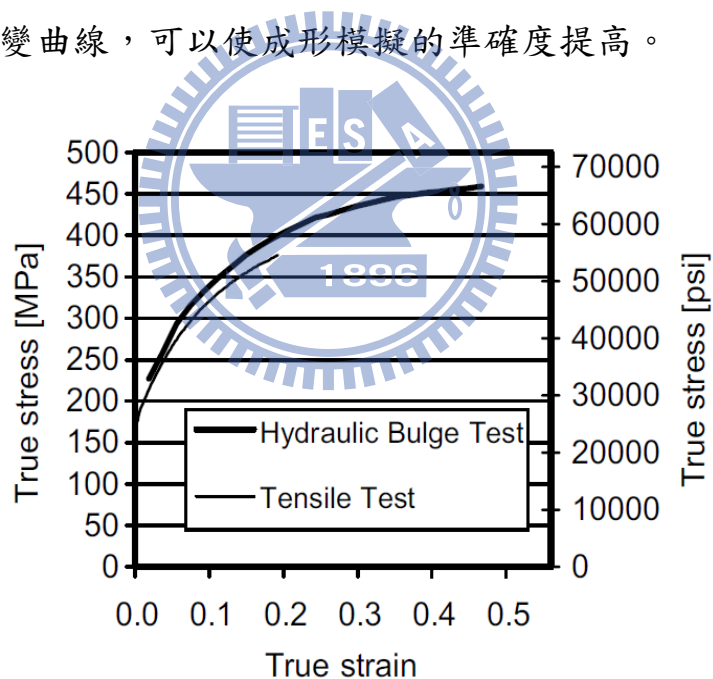


圖 17 aluminum AA 6111 之真實應力應變曲線[21]

而液壓膨脹實驗係為採用油體液壓進行之膨脹實驗（Bulging Test），經由對薄膜施加均勻液壓，當薄膜承受一均勻分布之側向液壓時，其變形狀況近似於球體，故可將其視為一球殼並用數學式將液體

壓力與薄膜撓度換算為應力與應變。其示意簡圖如圖 18 所示， $P$  為內部液壓， $R$  為薄膜近似球體膨脹之半徑。

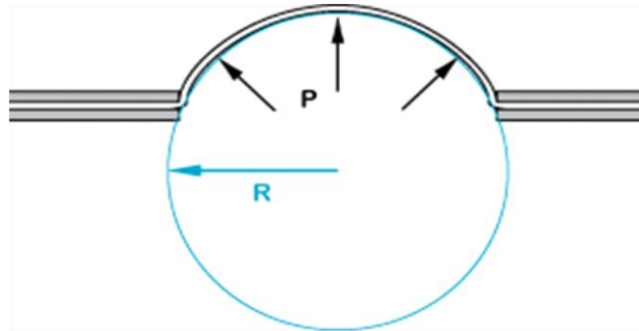


圖 18 液壓膨脹實驗示意簡圖[22]

由於實驗的相關準備正在進行中，目前將使用由單軸拉伸所得到之資料，並將這些資料經過外插法代入後續的模擬分析。



## 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。

而運用有限元素分析可以免除一般實驗分析所可能發生或是無法達成的問題，因此本章將針對微流道成形製程進行有限元素分析，並在下一章與實驗結果相互比對。

### 3.1 有限元素分析系統


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

本研究考慮到微流道成形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 Absqus/Standard 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 [23]。

### 3.2 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) 實際的成形過程中，如圖19，在Z方向的的變形趨近於0，所以將板件之變形視為平面應變，並視板材為一均質且具等向性性質之彈塑性（elasto-plastic）材料。
  - (2) 不考慮模具的變形，將其定義為剛體（rigid body）。
  - (3) 液壓考慮為均壓作用於板件。
  - (4) 不考慮液壓油洩漏問題所造成之壓力變化。

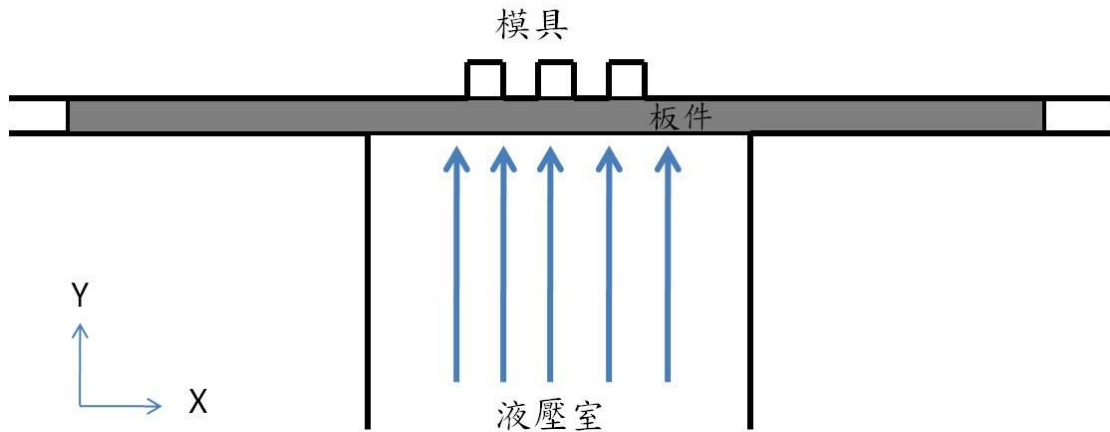


圖 19 靜水壓微成形示意圖

### 3.3 建立模型

#### 3.3.1 模具、板件外形與邊界條件設定

依照液壓實驗之模具與板件，建立起二維的模型。整個板件的長度為 100mm，成形的部分只有 60mm，為了減少模擬的計算時間，所以設板件的尺寸為全長 60mm，厚度為 0.1mm，在板件部分使用 2D Deformable Solid，又因視為平面應變問題，所以使用 CPE4R 二維四邊形元素，工件與模具的接觸設定參考 Mahabunphachai [16]，庫倫摩擦係數為 0.03，實際之模具被固定於機台上，故將其自由度都拘束住，而板件的邊緣因被機台所夾持，故在模擬中將兩端的水平方向的位移拘束住，並在工件上均勻地給予壓力後，再將壓力釋放。

模具參考 Mahabunphachai [15]，共有 27 個流道，每個流道寬、

流道間距、流道深度皆為 0.75mm，導圓角半徑為 0.2mm [15]，模具尺寸如圖 20、圖 21 所示。圖 22 為板件與模具幾何設計與配置圖，上方為模具，下方為工件。



圖 20 流道全圖

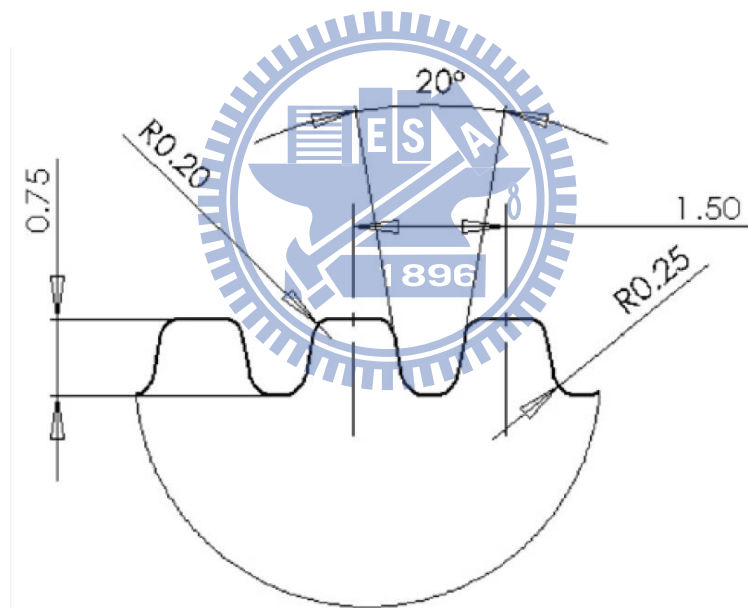


圖 21 詳細流道尺寸[15]



圖 22 模具與板件配置

### 3.3.2 材料性質設定

將模具視為剛體，而板件則根據第二章材料性質試驗所得之真實應力真實應變曲線，代入有限元素軟體模擬板材受力後的變形情形，並假設材料為均質性。

### 3.4 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。

在厚度方向分別劃分三至六層，壓力為 100MPa，由圖 23 至圖 26 可看出其應力分布都相當一致，而網格大小與最大成形深度之關係如圖 27 所示，其厚度網格數 4 層之最大深度後，其趨勢開始一致，故本研究採用網格尺寸為 0.025mm。



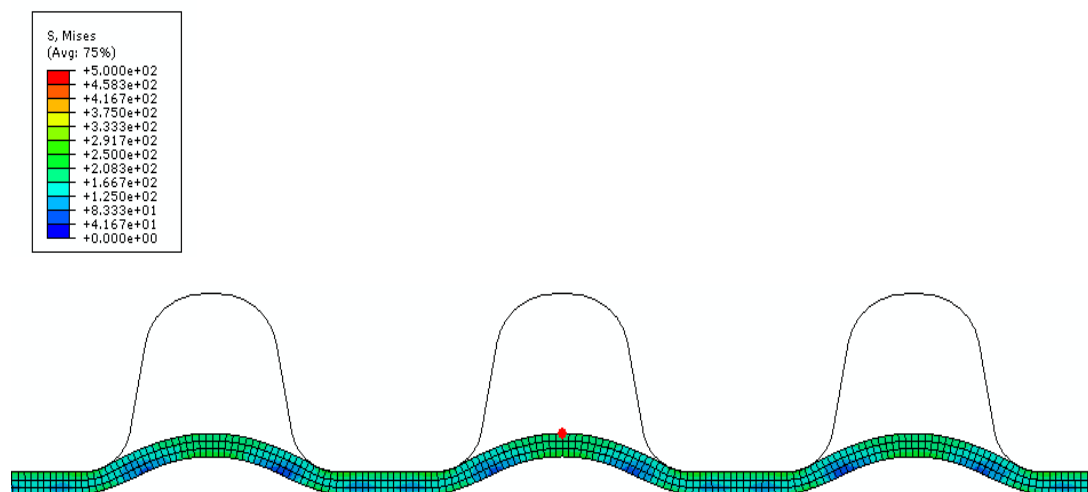


圖 23 壓力=100MPa，meshsize=0.034 之應力分布

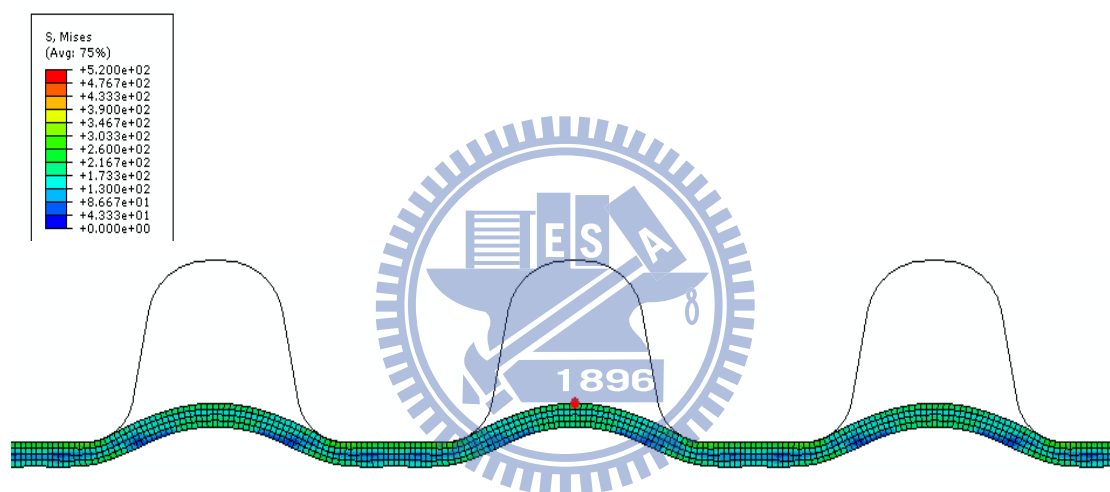


圖 24 壓力=100MPa，meshsize=0.025 之應力分布

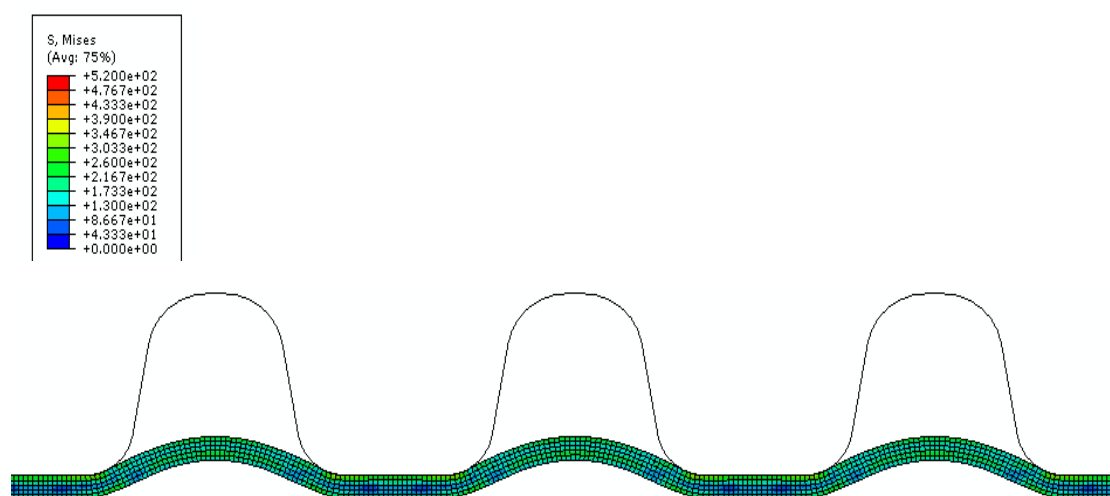


圖 25 壓力=100MPa，meshsize=0.02 之應力分布

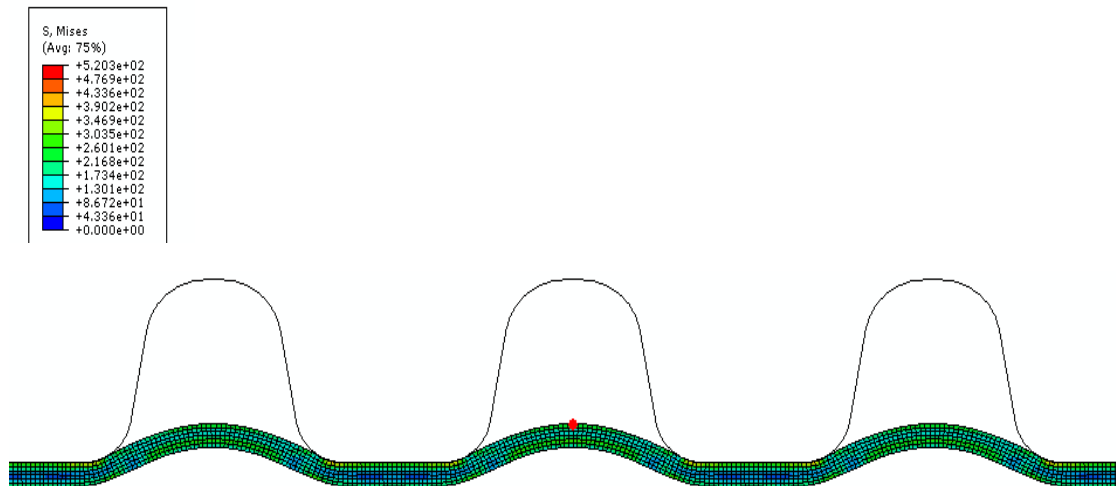


圖 26 壓力=100MPa，meshsize=0.0167 之應力分布

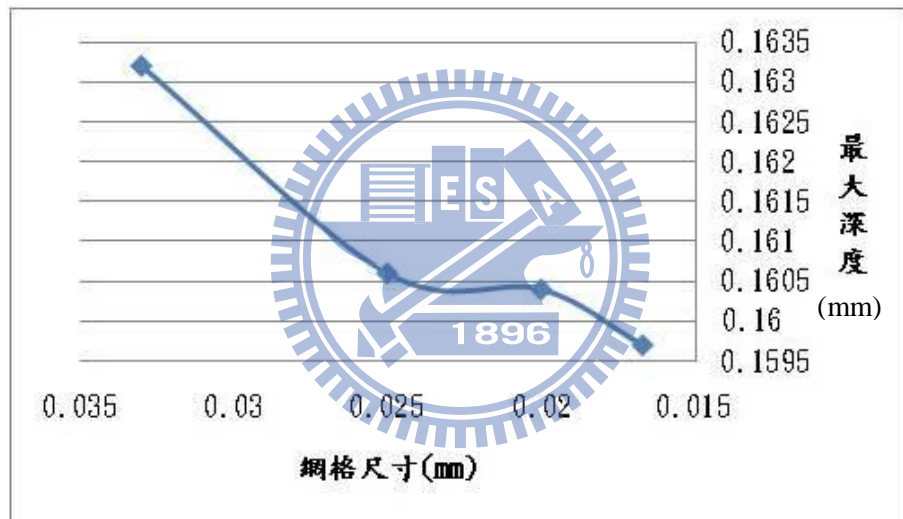


圖 27 網格大小與最大深度關係圖

### 3.5 後處理

經由分析收斂結果，在後處理器中可以將程式運算的結果，對於板件成形深度、板件應變及等效應力等數據，以圖形、曲線、表格或輸出文字檔的方式顯示。為了進行後續進行流道深寬比及電池反應效率之最佳化分析，必須將模具的流道寬、流道間距與板件的最大成形

深度的值輸出，以便代入氣體深寬比定義(1)式、反應效率公式(2)式，並藉由串聯最佳化的方式，求得靜水壓成形技術所能達到之最佳深寬比與最佳氣體反應效率。

### 3.6 最佳化分析系統

選擇適當的製程參數可使成形過程更加順利，並令產品性質符合要求，也可減少製作時所需的成本，而最佳化(Optimization)設計即為尋求最佳製程參數的方法。最佳化方法的發展至今亦有百年的歷史，最先始於 1904 年 Michell 即成功以數學方法，求出特定結構的最經濟設計，此被稱做為 Michell Structure；並在 1970 年代，NASA 已能使用大電腦自動進行最佳化設計運算。最佳化設計經過多年的發展，已開發出許多找尋最佳解的方法，如：基因演算法、梯度法等，透過給定不同的初始參數經過實驗或模擬計算後，從反映的結果，以不同方式去適當的改變初始參數，直到達到可接受甚至最佳的結果。圖 28 即為簡單示意圖[17]。

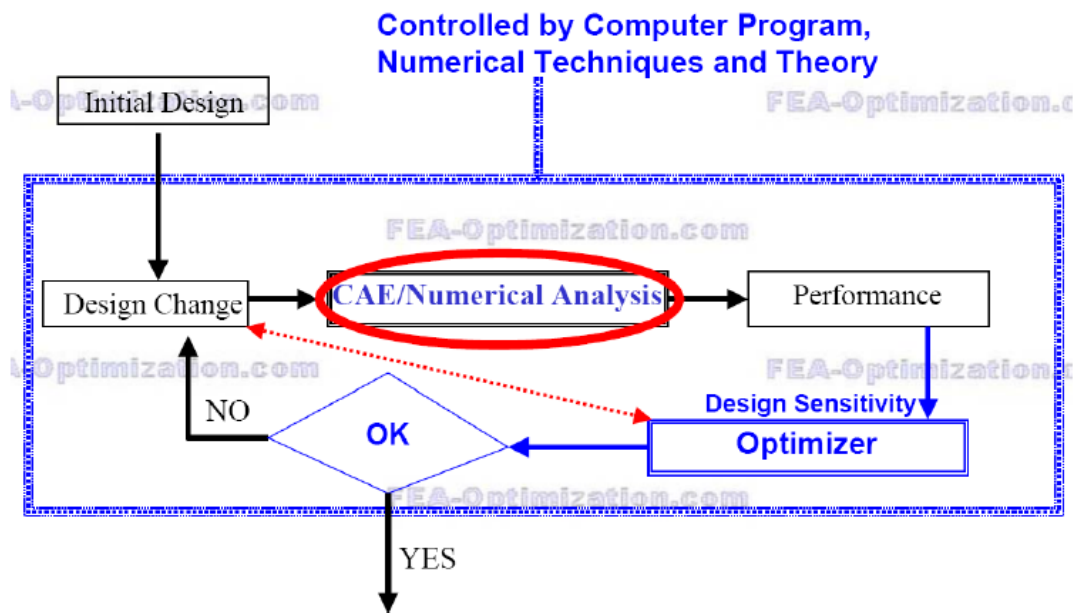


圖 28 最佳化設計基本原理[17]

### 3.7 最佳化軟體介紹—SmartDO

SmartDO為一設計自動化及最佳化之CAE軟體，以數值最佳化設計為核心基礎，它整合現有的FEA/CAE/CAD/CFD/CAX設計驗證流程，以智慧型之運算法控制設計參數，將整個流程變成自動最佳化設計系統，以穩定強大的智慧型演算法，探索產品設計的各種可能。

SmartDO具備以下數種特點：

- (1)容易使用(穩定強大的求解器，更具智慧、更快且更準確)。
- (2)自動學習不同領域及軟體之差異與變動。
- (3)專注於FEA/CAE/CAD/CFD/CAX類之整合應用。
- (4)由CAE分析專家所開發及測詢，真正瞭解CAE的問題與關鍵重

點。

(5)使用標準Tcl/Tk二次開發之程式碼可跨平台重覆使用。 目前

SmartDO已被應用在以下實務工作上：

- 產品減重,強化與突破創新設計
- 客制化全自動單鍵設計系統開發
- 產品瑕疵,誤差及破壞排除
- 實驗與分析校正(Test-Analysis Correlation)
- 決策及人工智慧

SmartDO最大的特色，是它自1994年開始，便歷經許多工業實務之考驗與測誦，成功範例眾多，尤其在FEA/CAE/CAD/CFD/CAx的整合應用經驗，堪稱居全球領先地位，且橫跨土木、航太、電子、醫藥、國防化工等領域[17]。

在Abaqus/Standard中，不論建模、施加邊界和接觸條件、網格畫分、乃至於後處理輸出資料，這些步驟都會被自動記錄於系統預設資料夾的記錄檔中，用SmartDO連接Abaqus/Standard需要手動去修改這個紀錄檔裡面的程式碼來串連；而使用SmartDO除了需要修改這個串連檔之外，尚需要目標函數、限制條件、以及變數初始值&上下界等三個程式檔，將這四個檔案準備好之後，才可以開始執行有限元素連接最佳化的模擬；如圖29，由使用者編寫一包含變數初始值的輸入檔，經Abaqus模擬後輸出結果給SmartDO，由SmartDO決定新的變數

值，如此循環計算直到SmartDO判斷結果已收斂為止。而往後若是要修改最佳化的目標或是限制條件，也必須回頭修改程式的設定，程式跑完的結果亦需要用Abaqus/Standard打開後處理檔案來查看其最佳化的結果是否與設定的條件符合，才能確保最佳化模擬的正確性。

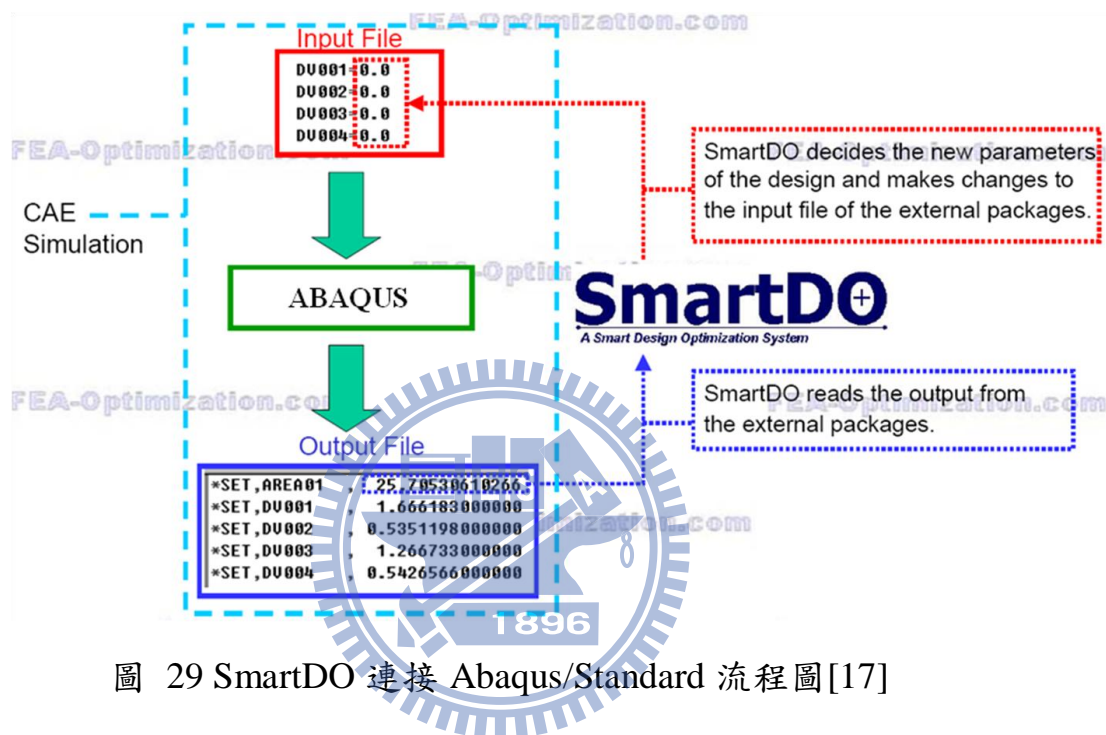



圖 29 SmartDO 連接 Abaqus/Standard 流程圖[17]

## 第四章液壓成形實驗與模擬

由於液壓成形的過程中，不同的模具輪廓設計與不同之成形壓力，不僅會影響板材之成形性，亦會影響後續的雙極板之效能。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，也能使雙極板擁有更好的氣體反應效率。透過驗證後之有限元素模型，經由改變各成形壓力、模具外形，來完成深寬比之最佳化與氣體反應效率之最佳化。

### 4.1 實驗機台與模具介紹

#### 4.1.1 靜水壓微成形機台



本實驗室製造出一新型靜水壓微成形機台(美國專利[18])，其示意圖如圖 30 所示。藉由下方壓力元件 14 進行增壓並推動擠桿使上方壓力元件 10 內之高壓流體受一高壓並對工件施加一均勻之壓力。此專利之概念是僅藉由簡單之機械構造即可完成金屬微成形壓印，在操作上比 Koc 等[10]所設計之機台更為簡單，因此更能夠降低製造成本。而本實驗室製造之機台，其施加壓力理論上可達 1125MPa，各部分之相關尺寸如圖 31 所示，其工作原理乃是最下方由機器給予 20MPa 之壓力推動第一擠桿，由於擠桿之上下截面積不同，利用帕斯卡原理使第一擠桿上方增壓至 80MPa，此為第一次增壓，同理可知，第二擠桿被往上推，第二擠桿上方被增壓為 1125MPa，此第二次增壓使最上方為均勻之高液壓。由於工件承受均勻之壓力及變形，故能讓成品具有良好之機械特性與表面品質。目前，初步將壓力感測器設置



於第一擠桿底部，並透過理論換算得出板件端之高壓油之液壓，目前實驗所使用的計算壓力為 60MPa、80MPa、100MPa、150MPa、200MPa 等五種壓力，每一種壓力分別做三次實驗，以確定其重現性。

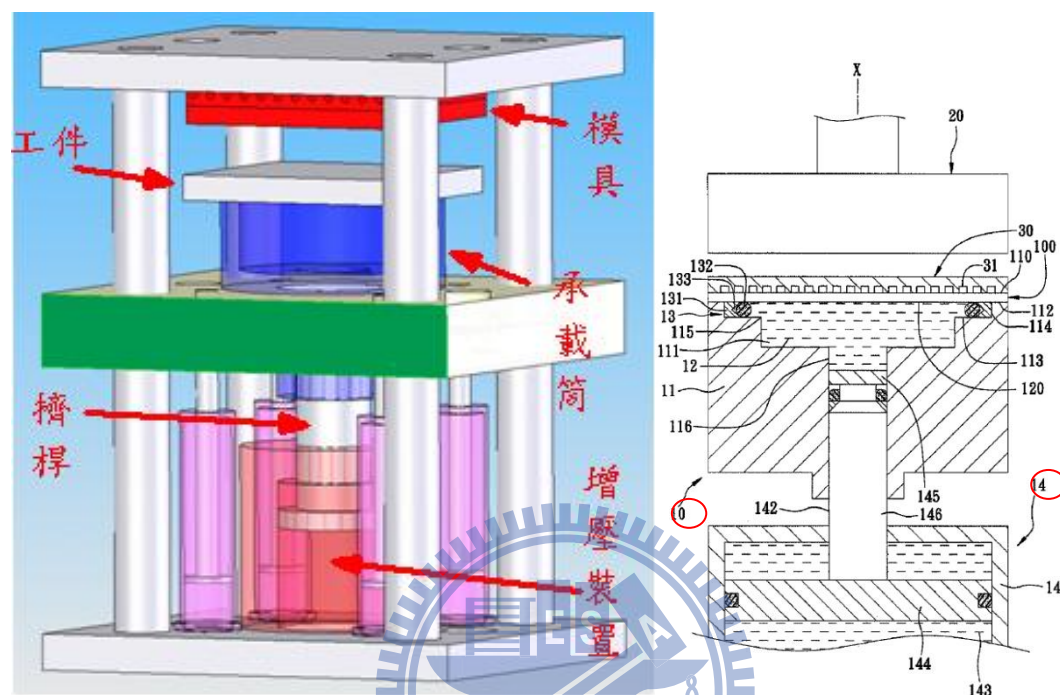


圖 30 靜水壓成形機台之示意圖[18]

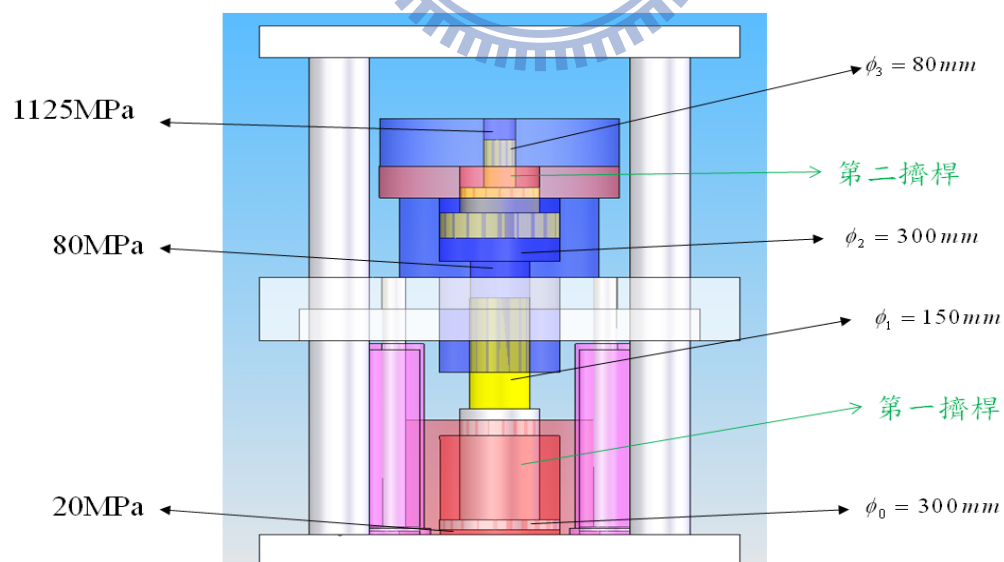


圖 31 靜水壓成形機台壓力與擠桿尺寸示意圖[18]



#### 4.1.2 模具

模具藉由線切割加工製作而成，使用的材料為工具鋼 SKD61，依照所設計之流道幾何加工，其加工後之微結構面積為  $40\text{mm} \times 40\text{mm}$ ，如圖 32。

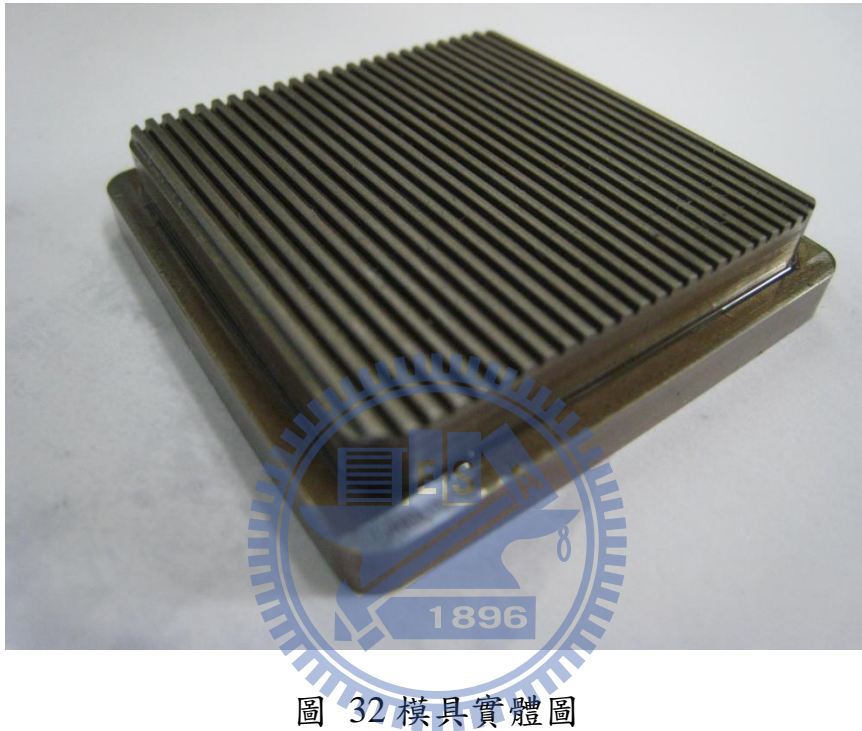


圖 32 模具實體圖

#### 4.1.3 量測儀器

為了量測液壓實驗後之板件流道深度，本研究以 KEYENCE 公司的 CMOS 雷射位移感測器(型號為 LK-H020)，如圖 33 所示，搭配螺桿定位平台，以每秒抓取 1000 個資料點，並同時前進  $0.6\text{mm}$  的速度掃過板件上的每一個流道，以量測其表面輪廓(圖 34)，其重複精度為  $\pm 0.02\mu\text{m}$ 。

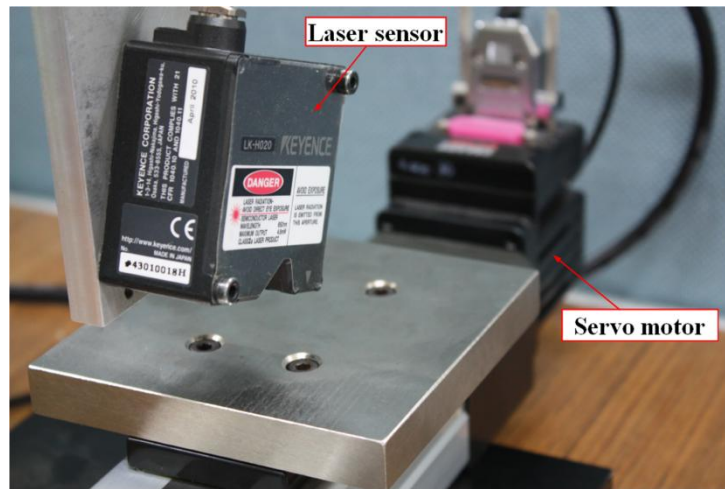


圖 33 CMOS 雷射位移感測器實體圖

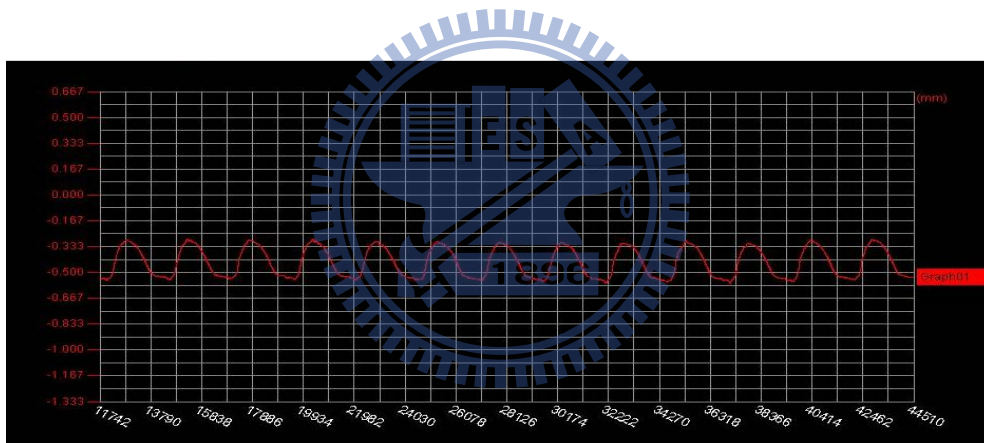


圖 34 液壓後板件流道輪廓之量測圖

## 4.2 初步有限元素模擬與實驗比較

實驗時將板件置於工作平台上如圖 35，分別使用五種壓力，每一種壓力各做三次，再將由位移感測器所量測出來的深度取其平均值，其實驗結果如表 5 所示，實驗成形後之板件如圖 36 所示。。

表 5 靜水壓實驗結果

成形壓力 (Mpa)	60	80	100	150	200
成形深度 (mm)	0.111	0.187	0.219	0.248	0.328
	0.158	0.189	0.231	0.245	0.294
	0.147	0.174	0.221	0.250	0.282

將實驗所使用的成形壓力代入先前所建立之有限元素模型進行模擬分析，並透過最大之成形深度來比較模擬結果與實驗成形深度之異同。

由圖 37 中，可發現模擬與實驗，在各壓力下都有些差距，其可能原因在於目前實驗所設定之液壓均是由理論計算所推得，因此導致與實際壓力有所出入，而未來亦將會針對液壓量測部分，做進一步的改良。由圖 38 發現，在模擬壓力再加上 30MPa 時所得到之成形結果與實驗值較相近，因此後續將使用液壓為 90MPa、110MPa、130MPa、180MPa、230MPa 做為後續研究。

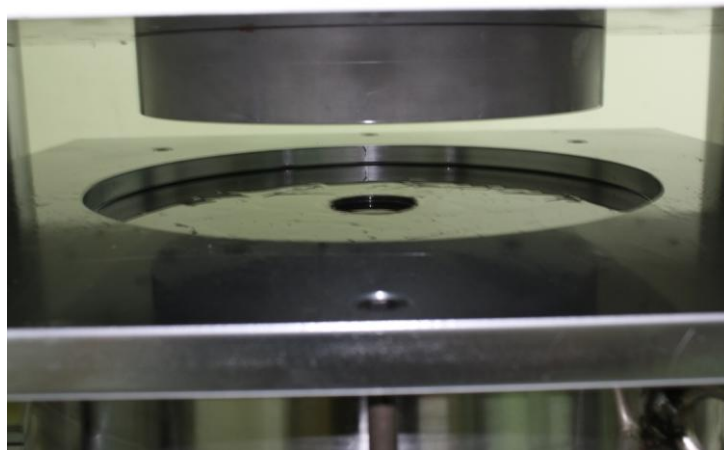


圖 35 靜水壓成型機台板件放置處

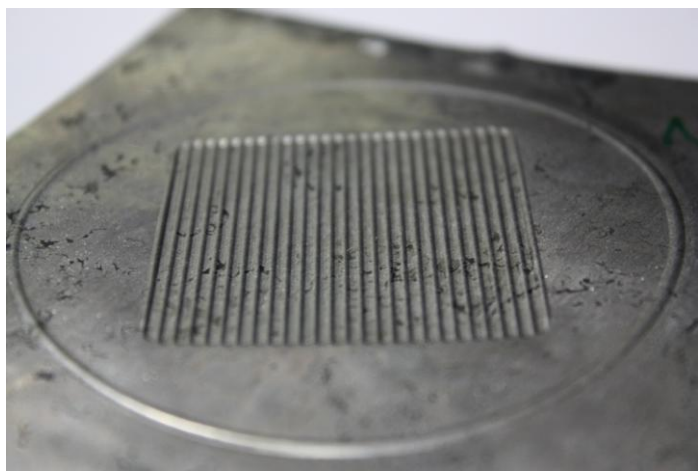


圖 36 成形後的板件圖

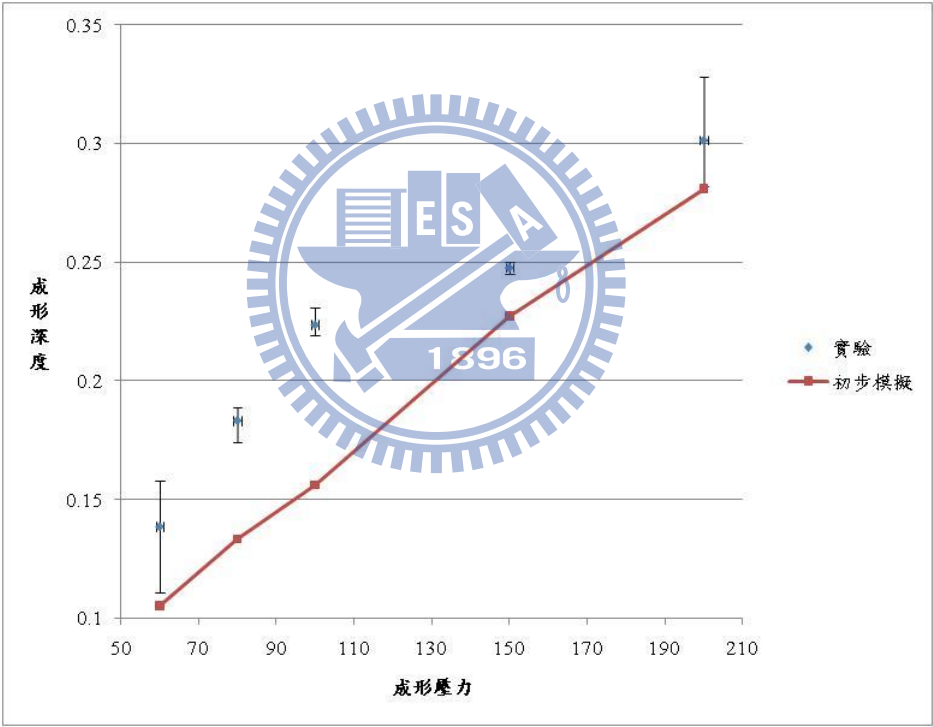


圖 37 實驗與修正前模擬成形比較圖

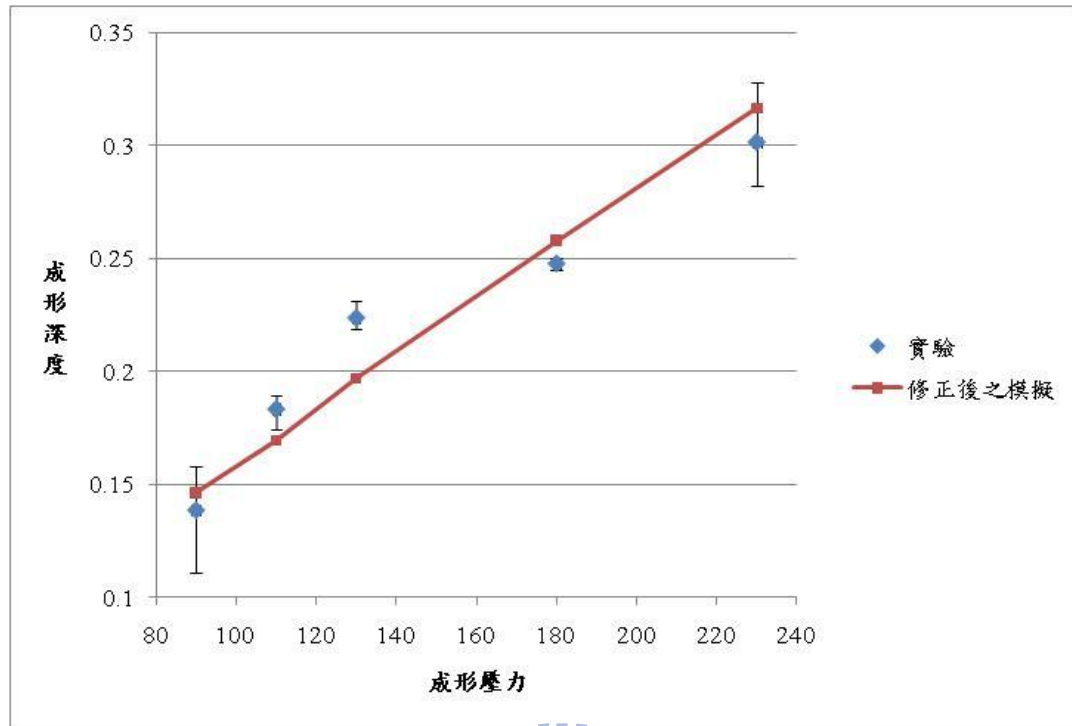


圖 38 實驗與修正後模擬成形比較圖

### 4.3 模型簡化之驗證

由於最佳化的步驟會一直不斷的疊代，模擬時間過長將會導致無法計算，又成形範圍只有中間的 40mm，中間流道的成形性都相當的均勻所以流道數對成形的影響不大，故將原本的有限元素模型的 27 個流道簡化為 5 個流道，並取最中間之流道之深度來驗證此模型的合理性。由圖 39 可發現此簡化模型與原本模型的模擬差異不大，故後面將採用此簡化模型來做後續的最佳化處理。

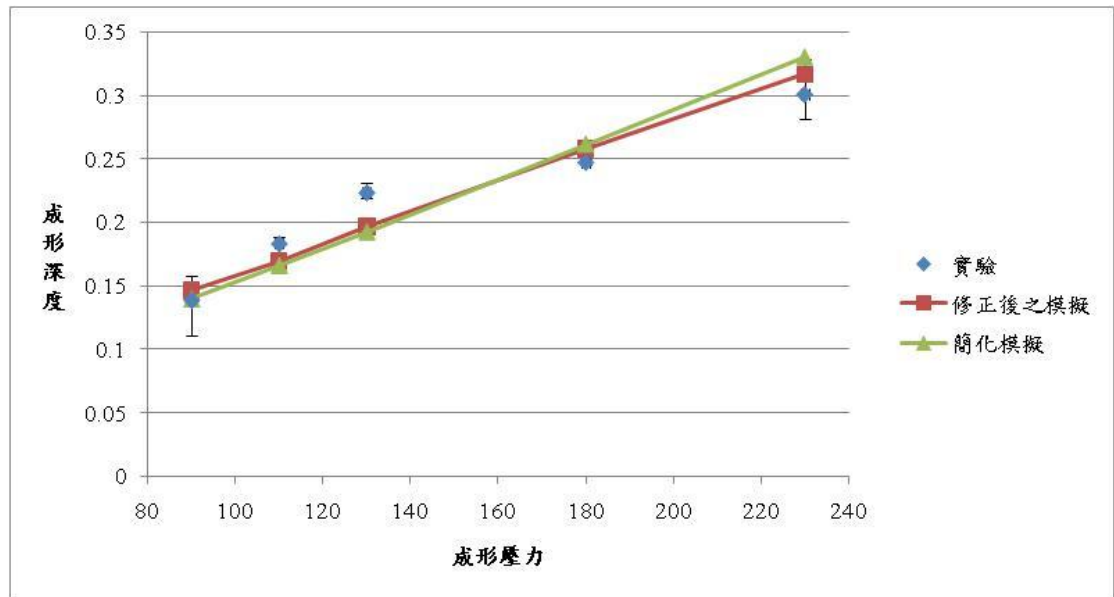


圖 39 實驗與簡化模擬比較圖

#### 4.4 最佳化分析

在文獻 Koc[16]中提到要成形出較高深寬比之流道，需要更大的壓力，而利用本實驗室之液壓成形機台擁有的高壓能力，將有能力製造出深寬比更高之流道幾何，首先求出在高壓靜水壓成形技術下，所能成形之最佳深寬比，再進一步將分析結果與文獻比較。

而流道的幾何關係著氣體的反應效率，反應效率優劣對燃料電池有很大的影響。為了提高氣體的反應效率，就必須設計其流道的幾何，再能夠成形出微流道的前提下，提升反應效率，不過在相關文獻顯示深寬比越高並非有高反應效率，所以在本節第二部分，將氣體反應效率做為目標函數，以求得反應效率最大又可使其成形之模具幾何外形。



以下將利用有限元素軟體 Abaqus/Standard 串聯最佳化軟體 SmartDo 來模擬出高流道深寬比最佳化及高氣體反應效率最佳化之製程參數

由於本研究與 Peng[19]所使用之板件材料與最大可用的成形壓力皆不同，故將不使用此文獻所推得之成形性方程式做為以下最佳化的成形限制。而經前述模擬修正後，實驗中使用最大的壓力為 230MPa，由模擬得到最大的等效應變值為 0.439，為了避免板件變形過大，以致於板件變的過薄以至於破裂或強度太低，因此設定等效應變  $\leq 0.439$  為其最佳化之限制條件。

而使用 SmartDO 除了需要修改串連檔外，尚需要目標函數、限制條件、以及變數初始值&上下界等三個程式檔，表 6 為模具最佳化模具設計變數[19]，表 7 為模擬最佳化限制條件，其模具深度皆為 1mm，導圓角半徑  $r$  皆為 0.2mm[15]，表 8 為後續兩個最佳化之設計變數初始值，示意圖如圖 40 所示，圖 41 為最佳化前之等效應變分布與模具外形。

表 6 最佳化設計變數

流道口寬 $w$ (mm)	0.5-1.55
流道間距 $s$ (mm)	0.5-1.55
成形壓力(MPa)	100-230
流道底寬 $c$ (mm)	0.3-1.55

表 7 最佳化限制條件

等效應變 $\leq 0.439$
脫膜角 $\alpha \leq 7^\circ$

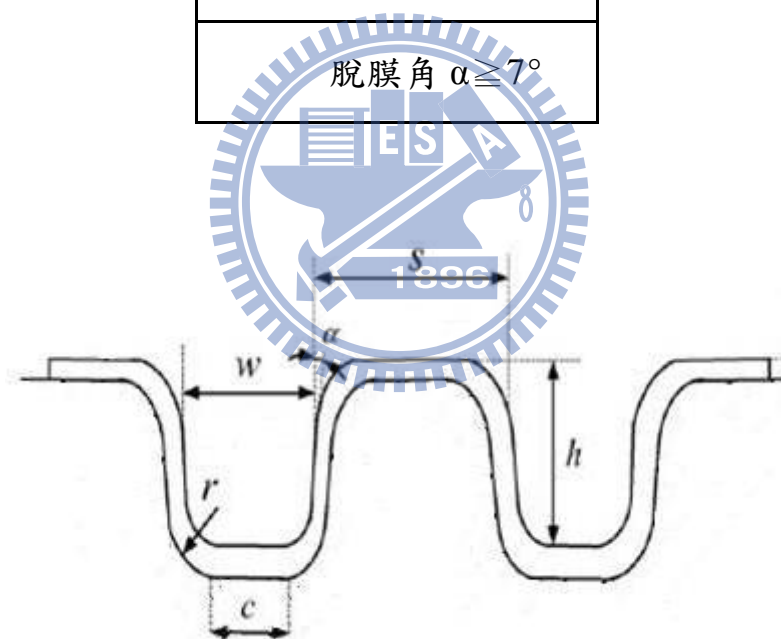


圖 40 流道幾何示意圖



表 8 最佳化前製程參數、成形深度

	初始值
流道寬(mm)	0.75
流道間距(mm)	0.75
脫模角(度)	10
成形壓力(MPa)	230
成形深度(mm)	0.317
深寬比	0.422
最大等效應變	0.439

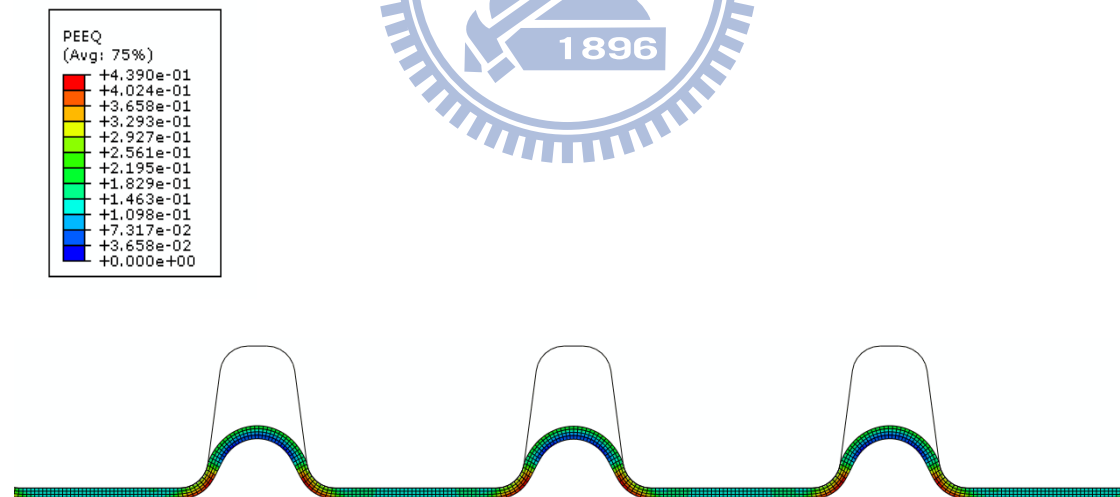


圖 41 最佳化前之等效應變分布

#### 4.4.1 深寬比之探討

本研究目前實驗所使用的模具參考 Mahabunphachai[15]使用的

模具，此文獻所使用的壓力最大為 60MPa，模具流道寬為 0.75mm，成形的最大深度約為 0.24mm，深寬比約 0.32。而目前本研究之實驗也使用過板厚為 0.05mm，壓力為 180MPa，所成形之最高深度為 0.295mm，深寬比為 0.39，不過其厚度變的過薄，因此採用 0.1mm，壓力為 230MPa，所成形之最高深度為 0.328mm，深寬比為 0.43，如表 9 所示。

表 9 實驗結果與文獻比較

	板件厚度 (mm)	壓力(Mpa)	成形深度 (mm)	深寬比
Mahabunphachai[23]	0.051	60	0.24	0.32
本研究之實驗 1	0.05	180	0.295	0.39
本研究之實驗 2	0.1	230	0.328	0.43

表 10 為深寬比最佳化後之製程參數，模擬的有效應變結果與模具外形如圖 42 所示，得到的最大應變為 0.358，在允許的應變範圍內，所得到之深寬比為 0.478，最佳化後得到的深寬比明顯的增加，均優於文獻中的 0.32 及實驗的 0.43。可看出流道的幾何改變還有壓力的增加將可以使深寬比更大，可以將此成形能力不僅僅是用在燃料電池，在未來也有可能運用在其他的領域上。

表 10 深寬比最佳化後的製程參數、成形深度

	深寬比最佳化
流道寬(mm)	0.763
流道間距(mm)	0.658
脫模角(度)	7.57
成形壓力(MPa)	230
成形深度(mm)	0.364
深寬比	0.478
最大等效應變	0.358

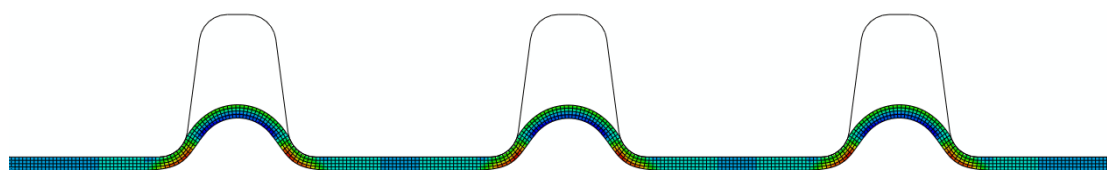
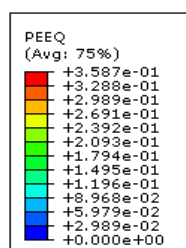


圖 42 深寬比最佳化後之等效應變分布

#### 4.4.2 反應效率之探討

微流道是燃料電池中影響效能的因素之一，所以氣體反應效率越好，電池的效能將會提升，而 Peng[19]建立不同流道幾何之模型來模擬其反應效率，其推得一反應效率迴歸方程式(2)式。由 Peng[19]得知，深寬比越高反應效率並非越好，因此利用此方程式進一步求得最佳之氣體反應效率。

此流道成形後，主要將應用於燃料電池的雙極板，所以須成形出可以增加燃料電池性能之流道幾何。本研究以反應效率(fr)迴歸方程式(2)式當做目標函數，以找出本實驗室目前可以成形出且反應效率最高之流道幾何設計與所需要的壓力。表 11 為反應效率最佳化後的製程參數、成形深度與反應效率，模擬的結果如圖 43 所示，得到的最大等效應變為 0.439 在允許的應變範圍內，經過最佳化後，原始幾何的反應效率為 76.4%提升至 81.1%，透過此方法將有助於燃料電池效能的提升。

表 11 反應效率最佳化後的製程參數、成形深度

	性能最佳化
流道寬(mm)	1.550
流道間距(mm)	1.135
脫模角(度)	7.53
成形壓力(MPa)	123.71
成形深度(mm)	0.639
反應效率(%)	81.1
最大等效應變	0.439

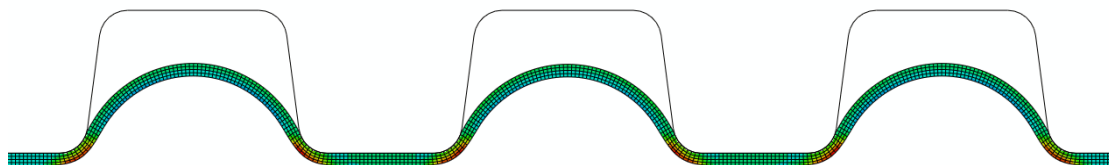
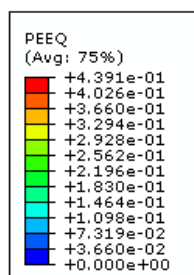


圖 43 反應效率最佳化後之等效應變分布

#### 4.4.3 深寬比與反應效率之結論

實驗、最佳化的結果與相關文獻的比較如表 12，由深寬比最佳化得到模具的流道寬為 0.763mm，流道間距為 0.658mm，脫模角為 7.57°，成形深度為 0.364mm，深寬比為 0.478，與 Mahabunphachai [15] 所達成的 0.32 和目前實驗達成的 0.43 相比已有很明顯的改善。而深寬比最佳化得到之反應效率只有 77.9%，代表深寬比高不一定擁有高反應效率。

由反應效率最佳化得到模具的流道寬為 1.55mm，流道間距為 1.135 mm，脫模角為 7.53°，成形深度為 0.639 mm，反應效率為 81.1%，與 Peng[19]最佳化的反應效率 79%和原始的反應效率 76.4% 相比有明顯的改善。而反應效率最佳化得到之深寬比只有 0.413，代表反應效率高不一定擁有高深寬比，不過也比目前文獻中之深寬比高上許多，所以也要有足夠的成形能力。

設計變數方面，參考 Peng[19]所設計之變數，不過此雙極板將運用到可攜式燃料電池上，故將相關流道幾何範圍做一些合理的修正。而本研究之實驗所使用的壓力最大為 230MPa，故將其最大值設為 230MPa。

深寬比最佳化其所需的壓力為 230 MPa 已為設計之最大值，其因為在安全考量下，目前實驗所使用的最大壓力為 230 MPa，未來將使

用更大的壓力來成形，將可得到更大之深寬比。而在反應效率最佳化結果，其流道寬已到設計變數之最大值，其因為 Peng 尚未討論流道數對反應效率的影響，若流道寬或間距過大，將會使其流道數過少，在未來將蒐尋相關的文獻與實驗的驗證，來增加其幾何限制條件，並以組裝後的燃料電池來進行驗證。

表 12 實驗、最佳化的結果與相關文獻的比較

	實驗	深寬比 最佳化	Mahabunphachai	性能 最佳化	Peng
流道寬 (mm)	0.75	0.763	0.75	1.550	1
流道間距 (mm)	0.75	0.658	0.75	1.135	1.6
脫模角 (mm)	10	7.57	10	1.286	10
成形壓力 (MPa)	230	230	60	123	未知
成形深度 (mm)	0.328	0.364	0.24	0.639	0.5
導圓角半 徑(mm)	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5
反應效率	76.5	77.9	未知	81.1	79
深寬比	0.43	0.478	0.32	0.413	0.5

## 第五章結論與未來工作

### 5.1 結論

在文獻 Mahabunphachai [16]中，經由模擬推論成形壓力越大，得到的深寬比將越高。而在與 Mahabunphachai[15]相同模具下，本研究使用厚度 0.1mm 之 SUS304，施加 230MPa 之液壓，其流道深度已可到 0.3275mm；深寬比已達到 0.48，證實了高靜水壓成形技術的可行性。本研究同時建立了有限元素模型，將此模擬結果與實驗修正並驗證，再由模擬經由最佳化軟體調整幾何參數，找出達到最佳深寬比與最佳反應效率之製程參數。

能成形的深寬比越高，能運用的範圍將更廣，所以本研究初步針對本實驗室所研發之高靜水壓技術所能達到之最佳深寬比進行分析。最佳化以深寬比當作目標函數，經過最佳化後，深寬比由原始模擬之 0.422 提升至 0.478，由最佳化前後的幾何與壓力，和所達成的深寬比，可看出流道的幾何改變還有壓力的增加將可以使深寬比更大，在未來可以將此成形能力不僅僅是用在燃料電池，也可以將此能力運用在其他的領域上。

然而深寬比高不一定會有比較好的氣體反應效率，為了提高燃料電池的性能，雙極板微流道的幾何設計是很重要的，同時需要兼顧氣



體的反應效率和微流道的成形性。因此在能夠成形出微流道的前提，以氣體的反應效率當作目標函數，其模擬最佳化反應效率由初始實驗之 76.4% 提升至 81.1%，如此就能成形出反應效率較高之流道幾何，達到增加燃料電池性能的目的。

## 5.2 未來工作

1. 目前實驗所設定之液壓均是由理論所推算，因此導致與實際壓力有所出入，而後續亦將會針對液壓量測部分進行改良。  
目前規畫在模具上方裝設荷重元，以量測真實液壓。
2. 目前液壓膨脹實驗所需要之設備的準備正在進行中，利用液壓膨脹實驗將可以得到更長的應力應變曲線，成形的模擬的準確度將可以提高。
3. 後續將針對深寬比最佳化後與反應效率最佳化後之模具進行液壓成形測試，並將其成形性與模擬結果做驗證。
4. 在未來將組裝一可使用之燃料電池，並由此燃料電池的效能來進行驗證其性能最佳化的結果。
5. 在可攜式燃料電池中，其微流道面積有限，流道寬、流道間距與流道數是互相限制的。未來將探討流道數對性能的影響，並代入最佳化的設計參數中。
6. 為了安全因素，目前實驗使用的壓力最大到 230MPa，雖然已

經比許多文獻大上許多，不過若繼續增加其壓力，將可以成形出深寬比更高的流道，可以應用的範圍將更廣泛。



## 參考文獻

- [1] 翁芳柏，徐耀昇，燃料電池實驗教材，亞太燃料電池科技股份有限公司，民國95年。
- [2] 尤如瑾，燃料電池商業化前景探索，經濟部技術處，民國96年。
- [3] 尤如瑾等編著，我國燃料電池發展策略研究與分析，經濟部技術處，民國91年。
- [4] I. Bar-On, R. Roth, "Technical cost analysis for PEM fuel cells", J. Power Sources, 109, pp.71-75, 2002.
- [5] P. Costamagna, S. Srinivasan, "Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000 Part I. Fundamental scientific aspects", J. Power Sources, 102, pp.235-269, 2001.
- [6] H. Tawfik, Y. Hung, D. Mahajan, "Metal bipolar plates for PEM fuel cell-A review", J. Power Sources, 163, pp. 755-767 , 2007.
- [7] 台灣燃料電池資訊網， <http://www.tfci.org.tw>
- [8] X. Li, I. Sabir, "Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs", Int. J. Hydrogen Energy, 30, pp. 359-371, 2005.
- [9] A.Hermann, T. Chaudhuri, P. Spagnol, "Bipolar plates for PEM fuel cells:A review", Int. J. Hydrogen Energy, 30, pp. 1297-1302, 2005.
- [10]Muammer Koc, Sasawat Mahabunphachai, "Feasibility investigations on a novel micro-manufacturing process for fabrication of fuel cell bipolar plates: Internal pressure-assisted embossing of

- micro-channels with in-die mechanical bonding", *J. Power Sources*, 178, pp. 725-733, 2007.
- [11]B. Cunningham, D.G. Baird, "The Development of Economical Bipolar Plates for Fuel Cells", *J. Mater. Chem.*, 16, pp. 4385–4388 , 2006.
- [12]J. Wind, R. Spah, W. Kaiser, G. Boehm, "Metallic bipolar plates for PEM. fuel cells", *J. Power Sources*, 105, pp. 256–260, 2002.
- [13]J.P. Allen, "Bipolar Separator and Current Collector Design and Manufacture", *2000 Fuel Cell Seminar Abstracts*, pp. 55–58,2000.
- [14]M.C. Li, C.L. Zeng, S.Z. Luo, J.N. Shen, H.C. Lin, C.N. Cao, "Electrochemical corrosion characteristics of type 316 stainless steel in simulated anode environment for PEMFC", *Electrochim. Acta*, 48,pp. 1735–1741, 2003.
- [15]Sasawat Mahabunphachai, Ömer Necati Cora, Muammer Koc, "Effect of manufacturing processes on formability and surface topography of proton exchange membrane fuel cell metallic bipolar plates", *J. Power Sources*, 195,pp. 5269–5277, 2010.
- [16]Sasawat Mahabunphachai, Muammer Koc, "Fabrication of micro-channel arrays on thin metallic sheet using internal fluid pressure: Investigations on size effects and development of design guidelines", *Journal of Power Sources*, 175, pp. 363–371, 2008.
- [17]S. Y. Chen, *smartDO Version 2.0 Manuals*, FEA-Opt Technology, 2008.
- [18]J. C. Hung, C. H. Hung, "uniform pressing apparatus for use in a

micro-nano imprint process", United States Patent, US7462029, 2008.

[19] Linfa Peng, Xinmin Lai, Dong'an Liu, Peng Hua, Jun Ni, "Flow channel shape optimum design for hydroformed metal bipolar plate in PEM fuel cell", J. Power Sources, 178, pp. 223-230, 2008.

[20] 林樹均等編著，材料工程實驗與原理，初版，全華，民國89年。

[21] Gerhard Gutscher, Hsien-Chih Wu, Gracious Ngaile, Taylan Altan, "Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test", Journal of Materials Processing Technology, 146, pp. 1-7, 2004.

[22] 黃詠，「鞋氣墊吸震試驗之有限元素分析」，國立交通大學機械工程學系碩士論文，民國98年。

[23] 愛發股份有限公司，ABAQUS實務入門引導，初版，全華，民國91年。