

應用於二氧化碳冷媒壓縮機之多孔擠製管

二次加工分析與模擬

研究生：邱世璿

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

摘要

天然冷媒中， CO_2 不僅有低 GWP 與 ODP 值，與氨氣(NH_3)、丙烷(C_3H_8) 等天然冷媒相比更多出了無毒、不可燃等特性。其熱比容約為其他冷媒之五~八倍，可以較少之冷媒流率達到同樣的冷凍能力，機構因此可以設計得比較小。二氧化碳系統的工作壓力高壓約在 90~120 bar 之間。在如此之高壓下，進行熱交換所使用的導管需要有足夠的強度來承受冷媒的壓力。

本研究針對二氧化碳冷媒壓縮機熱交換系統所使用的多孔擠製管，在不同變形長度與變形曲率等情況下，對其二次加工性與進行分析與模擬，並且與目前業界所使用之經驗值及實驗值進行驗證。結果證明現今所使用之變形過程不會對內孔造成明顯之影響，仍可以承受 400 bar 之高壓測試。並且得到改變變形長度與曲率對變形結果之影響，可提供給業界改良製程時參考。

Analysis and Simulation on Secondary-forming of Multi-port Extrusion Tubes Used in CO₂ Air-Condition Systems

Student : Shih-shyuan Chiou

Adviser : Dr. Chinghua Hung

National Chiao Tung University
Department of Mechanical Engineering

ABSTRACT

Among all natural refrigerants, CO₂ not only has low GWP and ODP value but also is non-toxic and non-flammable in comparison with NH₃ and C₃H₈. Its heat capacity is five to eight times of other natural refrigerants so that it has the same cooling ability with less flow rate; also, the device using CO₂ can be designed smaller for this reason. The high pressure of CO₂ air-condition system is between 90~120 bar. In such a high-pressure environment, the tubes used for heat exchange must have enough strength to endure high stresses from the compressed refrigerant.

This research focuses on the MPE (Multi-port Extrusion) tube used in CO₂ air-conditioning systems. The analysis and simulation of their secondary-forming abilities are conducted with different deformation lengths and curvatures. The results are verified with both experimental values obtained from manufacturer practice and our experiments. The primary results prove that current deformation process will not decrease the capacity of microchannels in MPE tube under 400 bar pressure test condition. During the research, the effects of different deformation length

and curvature are also obtained.



誌謝

轉眼間兩年半又過去了，當年大學剛畢業的時候我完全沒想過我還會回來系上讀研究所，而且指導教授還是與我亦師亦友的洪景華老師。回首過去，認識老師到現在已經八年了，這段期間老師不僅在課業上教導我許多事情，許多生活上的小事情也不厭其煩地一一指點我。這份論文能夠完成，首先當然要感謝老師，不但從一開始引導我研究的方向，最後遇到瓶頸的時候給予我許多寶貴地建議。

實驗室的宇中、煌基、麒禎學長在我進行模擬碰到困難時給予我許多建議，最後模型的建立與模擬方式更是在他們的大力協助下才得以完成的。政誠、正展、銘傑、彥彬學長對於我的研究也很關心予以指導，對我的論文內容提出了相當多的建議。志嘉、運賢以及俊羿三位同學在這兩年多的期間內彼此互相學習勉勵、互相幫助，對於這份研究也是功不可沒。聖平、時恆、建榮、麒翔等幾位學弟也熱心地在我們為了論文忙到焦頭爛額的時候幫忙處理各種瑣事，讓我可以專注於研究。此外，特別感謝工研院的楊鏗忠先生、王柏欽先生、余培煜學長、湯岳儒學長，沒有你們的幫助就不會有這份研究結果。

目錄

第一章 序論	1
1.1 二氧化碳冷媒壓縮機簡介	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 研究動機與目的	7
1.4 論文結構	15
第二章 剛塑性有限元素法理論 與有限元素軟體簡介	16
2.1 剛塑性有限元素法理論	16
2.2 有限元素軟體 DEFORM™3D 簡介	20
2.3 模擬材料與性質	21
第三章 有限元素模擬與實驗驗證	24
3.1 研究步驟	24
3.2 模型建立	25
3.3 MPE Tube 之變形過程	27
3.4 初步模擬設定與問題	30
3.5 簡化模擬條件	33
3.6 初期模擬結果	34
3.7 實驗驗證與結果討論	38
3.8 其他成型參數對變形之影響	44

第四章 結論與未來展望	56
4.1 結論	56
4.2 限制因素	57
4.3 未來展望	57
參考文獻	58
附錄 A 有限元素模型之簡化過程	60



圖目錄

圖 1 - 1 美國專利 US 4087893	4
圖 1 - 2 美國專利 US 5186250	4
圖 1 - 3 美國專利 US 6216343	4
圖 1 - 4 美國專利 US 6293333	5
圖 1 - 5 美國專利 US 4313327	5
圖 1 - 6 美國專利 US 2002/0121120	6
圖 1 - 7 美國專利 US 5567493	6
圖 1 - 8 冷機循環圖[4]	10
圖 1 - 9 冷暖氣兩用系統循環圖[4]	10
圖 1 - 10 二氧化碳熱交換器外型[5]	11
圖 1 - 11 蒸發器示意圖[4]	11
圖 1 - 12 多孔擠製管之折彎扭曲變形圖	12
圖 1 - 13 MPE tube 截面圖	12
圖 1 - 14 MPE tube 人工折彎扭曲之制具	13
圖 1 - 15 MPE tube 使用制具變型後之成品	13
圖 1 - 16 焊接完成之 MPE tube 熱交換模組	14
圖 2 - 1 HA9108 材料性質 (塑性)	22
圖 2 - 2 HA9108 材料性質	23

圖 2 - 3 DEFORM™3D 物件性值	23
圖 3 - 1 研究步驟	24
圖 3 - 2 MPE tube 截面圖 (單位: mm)	25
圖 3 - 3 MPE tube 立體模型	25
圖 3 - 4 MPE tube 截面網格圖	26
圖 3 - 5 MPE tube 網格圖	26
圖 3 - 6 MPE tube 變形之固定方式	27
圖 3 - 7 初步模擬所使用之模型	30
圖 3 - 8 DEFORM 3D 自動產生網格之圓孔外形	31
圖 3 - 9 DEFORM 3D 自動產生網格之截面形狀	31
圖 3 - 10 僅中間部分元素加密之 MPE tube 模型	32
圖 3 - 11 僅中間部分有內部圓孔之 MPE tube 模型	32
圖 3 - 12 模擬設置圖	33
圖 3 - 13 折彎 180°	34
圖 3 - 14 沿 X 軸平移 10 mm	35
圖 3 - 15 再沿 Z 軸平移-10 mm	35
圖 3 - 16 管壁施加壓力後應力分佈	36
圖 3 - 17 管壁施加壓力後應力分佈截面圖	36
圖 3 - 18 MPE tube 變形模擬彎曲處之切面	37

圖 3 - 19 驗證實驗所彎曲之 MPE tube 成品	38
圖 3 - 20 MPE tube 進行線切割放電加工時所使用之輔具	39
圖 3 - 21 MPE tube 實驗切割位置圖	39
圖 3 - 22 用來觀測實驗結果之光學顯微鏡	40
圖 3 - 23 變形參數改變圖	44
圖 3 - 24 熱交換器模組	44
圖 3 - 25 折彎曲率變化與孔直徑之關係	45
圖 3 - 26 圓棒直徑 9 mm 之應力分佈	48
圖 3 - 27 圓棒直徑 9 mm 之應變分佈	48
圖 3 - 28 圓棒直徑 7 mm 之應力分佈	49
圖 3 - 29 圓棒直徑 7 mm 之應變分佈	49
圖 3 - 30 圓棒直徑 5 mm 之應力分佈	50
圖 3 - 31 圓棒直徑 5 mm 之應變分佈	50
圖 3 - 32 變形端長度 30 mm 之應力分佈	51
圖 3 - 33 變形端長度 30 mm 之應變分佈	51
圖 3 - 34 變形端長度 40 mm 之應力分佈	52
圖 3 - 35 變形端長度 40 mm 之應變分佈	52
圖 3 - 36 變形端長度 45 mm 之應力分佈	53
圖 3 - 37 變形端長度 45 mm 之應變分佈	53

圖 3 - 38 變形帶動的扭轉角度 (長度 30mm)	54
圖 3 - 39 變形帶動的扭轉角度 (長度 40mm)	54
圖 3 - 40 變形帶動的扭轉角度 (長度 45mm)	55
圖 A - 1 DEFORM 3D 自動產生網格之圓孔外形	60
圖 A - 2 DEFORM 3D 自動產生網格之截面形狀	60
圖 A - 3 使用 HyperMesh 產生網格之圓孔外形	61
圖 A - 4 使用 HyperMesh 產生網格之截面形狀	61
圖 A - 5 原始所使用模型之一	62
圖 A - 6 原始所使用模型之二	63
圖 A - 7 簡化後模擬所使用之模型	63
圖 A - 8 DEFORM™3D 模擬錯誤	64

表目錄

表 1 - 1 冷媒相關環保影響指數[1]	2
表 1 - 2 各種冷媒性質比較[1]	2
表 3 - 1 MPE tube 折彎扭曲之變形過程	28
表 3 - 2 初期模擬之設定	34
表 3 - 3 MPE tube 變形之模擬結果	37
表 3 - 4 MPE tube 彎曲處截面各圓之直徑	42
表 3 - 5 MPE tube 未彎曲處截面各圓之直徑	43
表 3 - 6 模擬改變之參數與範圍	45
表 3 - 7 不同折彎曲率下 MPE tube 各孔之直徑改變量(單位： mm)	46
表 A - 1 模擬錯誤原因整理表	65

第一章 序論

1.1 二氧化碳冷媒壓縮機簡介

自從 1974 年發現氟氯碳化合物會破壞地球臭氧層之後，人類不斷地尋找替代的環保冷媒。1987 年通過的蒙特婁議定書，內容對於會破壞臭氧層的化學品訂出管制時程，特別是對於廣泛應用於冷媒的 CFC（氟氯碳化合物）及 HCFC（氫氟氯碳化合物）。之後由於全球暖化問題，1997 年 12 月的京都議定書製訂了對溫室氣體排放減量的條例，原本做為替代冷媒之一使用的 HFC（氫氟碳化合物）也陸續被各國列入禁用，天然冷媒的應用成為新趨勢。

天然冷媒中，CO₂ 不僅有低 GWP 與 ODP 值（表 1-1），與氨氣（NH₃）、丙烷（C₃H₈）等天然冷媒相比更多出了無毒、不可燃等特性。其熱比容約為其他冷媒之五~八倍（表 1-2），可以較少之冷媒流率達到同樣的冷凍能力，機構因此可以設計得比較小。加上其常溫下因為工作壓力較大而使用較細之多孔導管[2]，整體的機構得以縮小和減輕許多。因為小體積和質量輕的特性，CO₂ 冷凍空調系統發展在車用系統可以獲得特別大的好處，汽車市場上因此有不少廠商已經開發出以 CO₂ 為冷媒的空調系統。

表 1-1 冷媒相關環保影響指數[1]

冷媒種類		ODP 臭氧層破壞	GWP 全球暖化趨勢
CFCs	CFC-11(R-11)	1	4000
	CFC-12(R-12)	1	8500
HCFCs	HCFCs-22(R-22)	0.055	1700
	HCFCs-141b, R-141b	0.11	630
HFCs	HFC-134a, R-134a	0	1300
	R-407C(HFC-32/125/134a)	0	1600
	R-410A(HFC-32/125)	0	2200
天然冷媒	CO ₂ (R-744)	0	1
	氨 NH ₃ (R-717)	0	0
	異丁烷(R-600a)	0	3
	丙烷(R-290)	0	3

表 1-2 各種冷媒性質比較[1]

	R-12	R-22	R-134a	R-407C ^a	R-410A ^b	R-717	R-290	R-744
ODP/GWP ^c	1/8500	0.05/1700	0/1300	0/1600	0/1900	0/0	0/3	0/1
Flammability/toxicity	N/N	N/N	N/N	N/N	N/N	Y/Y	Y/N	N/N
Molecular mass (kg/kmol)	120.9	86.5	102.0	86.2	72.6	17.0	44.1	44.0
Normal boiling point ^d (°C)	-29.8	-40.8	-26.2	-43.8	-52.6	-33.3	-42.1	-78.4
Critical pressure (MPa)	4.11	4.97	4.07	4.64	4.79	11.42	4.25	7.38
Critical temperature (°C)	112.0	96.0	101.1	86.1	70.2	133.0	96.7	31.1
Reduced pressure ^e	0.07	0.10	0.07	0.11	0.16	0.04	0.11	0.47
Reduced temperature ^f	0.71	0.74	0.73	0.76	0.79	0.67	0.74	0.90
Refrigeration capacity ^g (kJ/m ³)	2734	4356	2868	4029	6763	4382	3907	22545
First commercial use as a refrigerant [14]	1931	1936	1990	1998	1998	1859	?	1869

1.2 文獻回顧

CO₂ 是一取得容易、成本低廉的自然物質，早在二十世紀初期就已使用在工業與漁業的冷凍系統中。後來因為壓力太大以及效率問題，被 CFC、HCFC 等冷媒所取代。經過百年來科技的進步，加上環保問題近年來逐漸獲得重視，CO₂ 冷媒再度成為大家的焦點。

1992 年 Lorentzen 和 Pettersen 提出了 CO₂ 冷凍做為新一代車用空

調系統[2]，實驗用的雛型機種能夠與使用R-12之系統性能相近。之後Pettersen等人發展出使用微小導管（microchannel）技術的小型熱交換器，並且應用於CO₂空調系統上[3]。

多孔金屬管主要用於冷凍空調與熱機系統之冷凝器與蒸發器，主要做為熱導管與外界進行熱交換。美國專利局資料庫中搜尋有關小尺寸熱導管的製造，可以發現有Sata et al. [6], Takamura et al. [7]等提出在胚料內填充易溶解之物質（如鹽類），擠製之後再將填充物溶解分離形成中空管（圖 1-1），重點在於微小的熱導管內壁的毛細管能夠在成型後維持一定的形狀精度，且填充物容易與工件分離，製造過程相較於傳統使用蝕刻等方式簡單。

另外有Ouch et al. [8], Leland et al. [9], Ponnappan et al. [10]等提出將大塊金屬板彎折成型之後再銲接至金屬管的兩段成型方式（圖 1-2、圖 1-3、圖 1-4），此種方式強調能夠快速生產，而且相較於使用擠製等方式成本更低。

O' Connor[11], Kraft et al. [13], 等也分別提出使用熱擠製（hot extrusion）法製造多孔金屬管的方式（圖 1-5、圖 1-6）。Imai et al. [12]專利中提到使用熱擠製時，因為模具兩側的壓力不同造成成型瑕疵與模具壽命縮短（圖 1-7），對此提出了改良的模具設計。

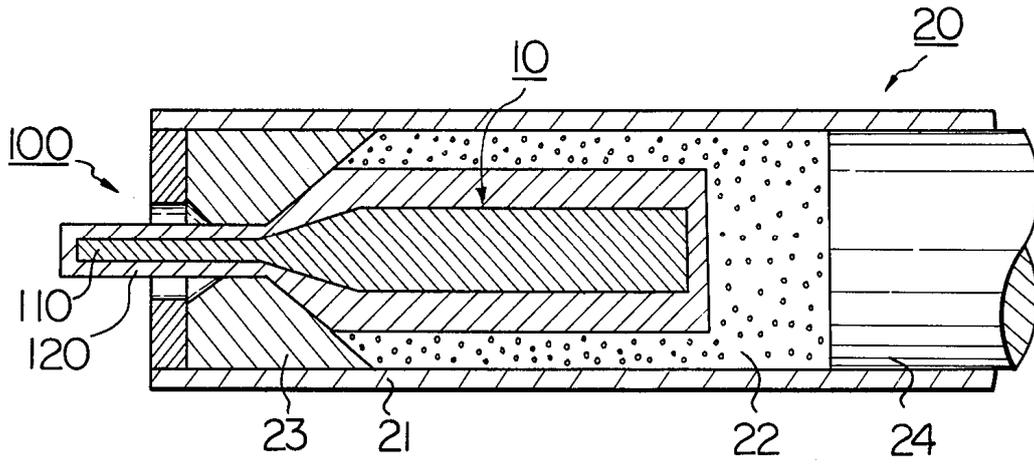


圖 1 - 1 美國專利 US 4087893

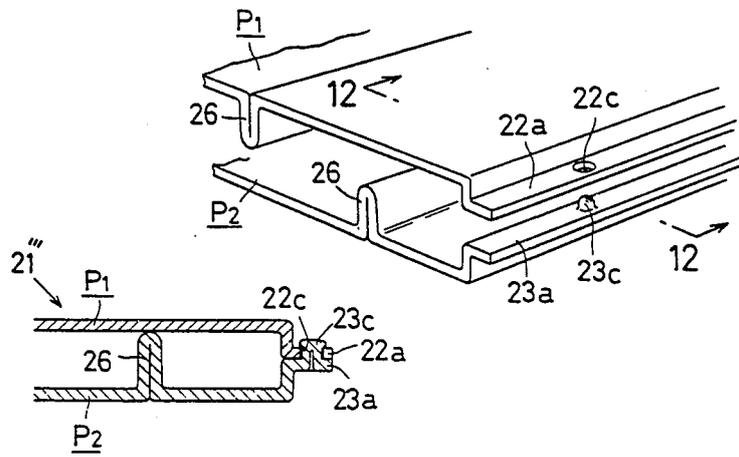


圖 1 - 2 美國專利 US 5186250

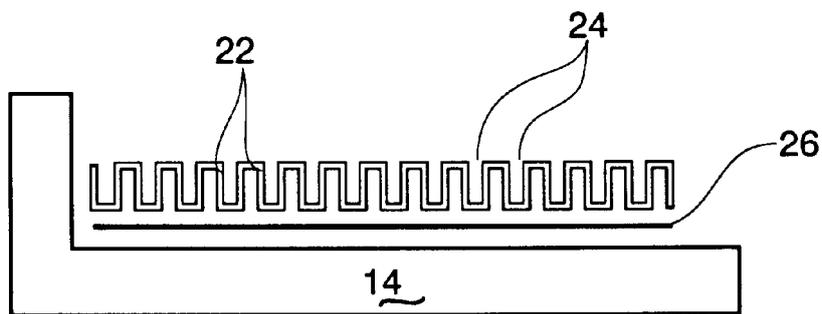


圖 1 - 3 美國專利 US 6216343

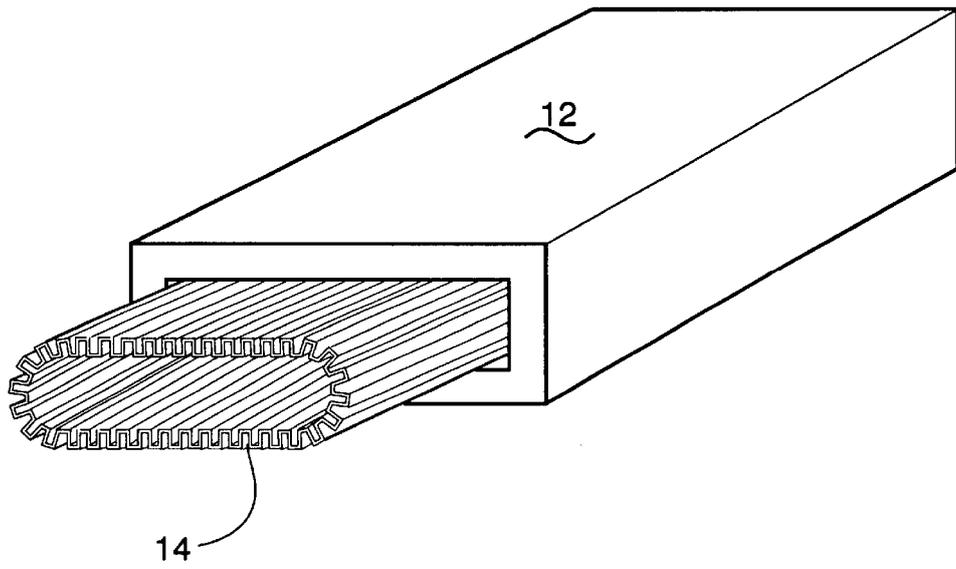


圖 1 - 4 美國專利 US 6293333

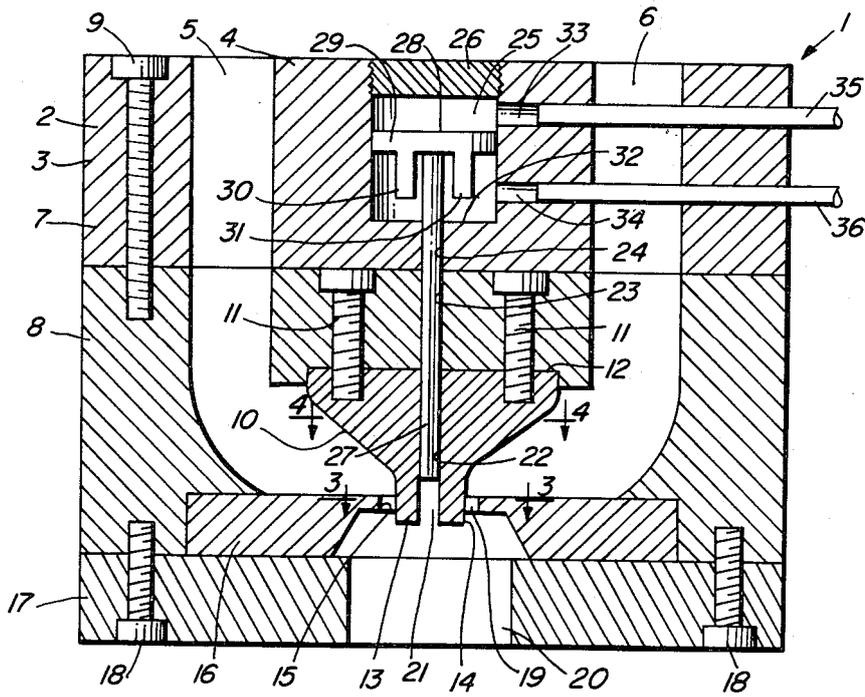


圖 1 - 5 美國專利 US 4313327

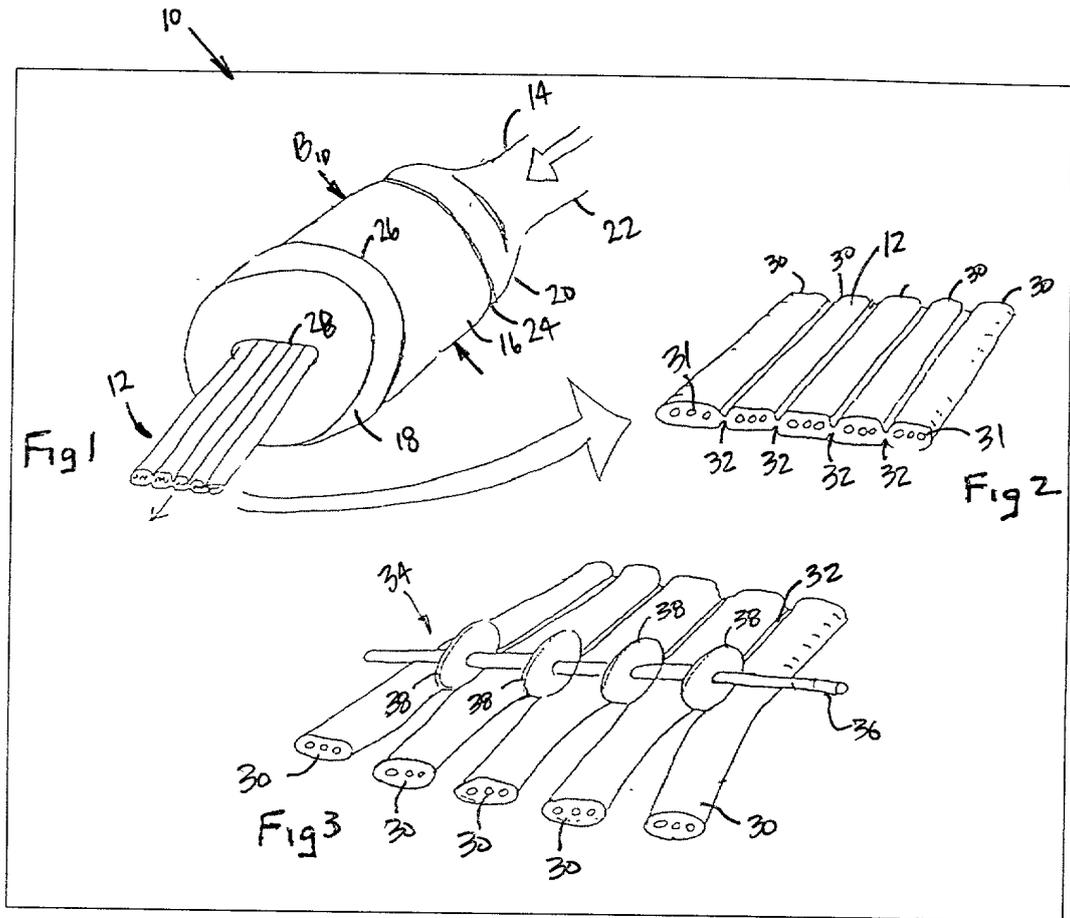


圖 1 - 6 美國專利 US 2002/0121120

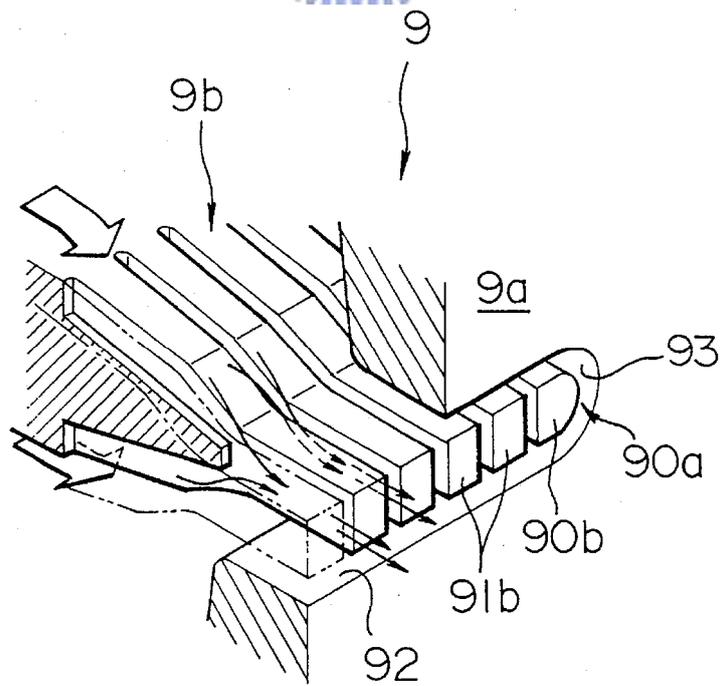


圖 1 - 7 美國專利 US 5567493

1.3 研究動機與目的

冷機循環過程中，冷媒在蒸發器裡面會藉由吸熱膨脹，再進入壓縮機（如圖 1-8）。在本研究中所使用的冷機是以二氧化碳為冷媒，二氧化碳的臨界溫度相當低（表 1-2），與台灣夏季環境溫度接近，要進行熱交換往往需要提高到 45°C 才能將熱散至大氣中。而二氧化碳的臨界壓力又相當高（73.8 bar），因此二氧化碳系統的工作壓力高壓約在 90~120 bar 之間。在如此之高壓下，進行熱交換所使用的導管需要有足夠的強度來承受冷媒的壓力。以 CO₂ 為冷媒設計以車用空調系統選擇使用孔數多、孔徑較小的 microchannel 以減少體積。使用 microchannel 不但有體積小的優勢，而且可以增加許多表面積加強與外界熱交換之能力。多個孔徑小的導管壓力分佈也低於單一的大導管，在縮小體積的同時也降低導管所承受之正向力，是個利多於弊的選擇。此外，二氧化碳冷媒壓縮機系統可以藉由加裝少量零件即可形成加熱（暖氣）裝置（圖 1-9），效率亦較傳統裝置為優。因此此一系統在歐洲已經被大量使用，在日本亦有公司（Daikin, Denso, Sanyo 等）生產、販售相關產品。

本研究起源於國內工業技術研究院與挪威研究機構 SINTEF 合作，計畫引進二氧化碳冷媒壓縮機之技術於國內發展。初期實驗用之原型機，壓縮機部分向日本松下公司購買已上市之機型使用，散熱器部分

藉由 SINTEF 所開發之設計軟體自行設計，使用由挪威 Norsk Hydro 公司生產之 microchannel 導管。

由於CO₂做為冷媒所需要的工作壓力較高，需要使用孔徑較小且強度足夠的導管，其製造方式及之後的二次加工所帶來的問題有許多地方值得探討。如熱交換器中，傳統設計為將microchannel分為多段連接在兩端大型導管 (manifold)，外面連接散熱鰭片增強與外界熱交換能力 (如圖 1-10 所示)。但是此種設計需要將多段microchannel加工連結至兩端，焊接時導管容易受熱產生變形；且焊接處強度較弱，高壓之二氧化碳容易從加工處產生洩漏。

因為上述原因，實做之二氧化碳熱交換器改採用圖 1-11 之方式，將多孔導管經由多次扭曲折彎 (圖 1-12) 再連結至大導管以減少焊接次數。此種做法的困難之處則在於管子的扭曲與折彎對強度造成之影響，可能會因為強度分佈或是管幾何形狀改變造成壓力局部集中超過原本設計之負荷，或是因為加工過度管內流道變形造成內部成型缺陷，影響散熱過程中之壓力降。

目前業界多採實驗與實際加工經驗去求出此種加工量之極限，耗費時間與金錢求出的經驗值往往只能適用於單一材料與尺寸，對於不同材料及尺寸又需要重覆實驗求得。此外，針對不同場合的系統會發展出不同尺寸、材料的導管，其孔數、孔徑、管厚等方面的改變都會

對後面二次加工性有所影響。各種鋁合金的物理性質也不盡相同，不同的鋁合金成份和不同尺寸的導管搭配也會影響二次加工性。因此，對此種導管的二次加工性進行一有系統的分析與整理求出其趨勢是有必要的。

本研界所探討之導管為一多孔擠製管 (Multi-Port Extrusion tube，以下簡稱為MPE tube，外型及截面如圖 1 - 13所示)，其經過人工輔以制具 (圖 1 - 14) 折彎扭曲變形之後 (圖 1 - 15)，再以焊接方式結合成一熱交換器模組 (圖 1 - 16)。此製程在我國尚未有學術界及工業界之經驗，故本論文中將針對折彎與扭曲兩種二次加工性質做數值分析與實驗驗證，以建立未來業界在設計MPE tube二次加工製程之參考。



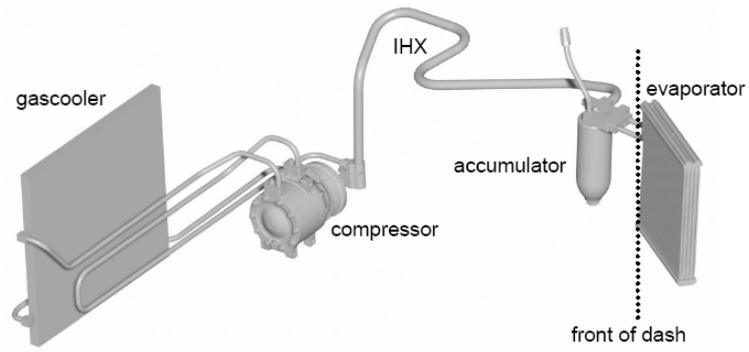
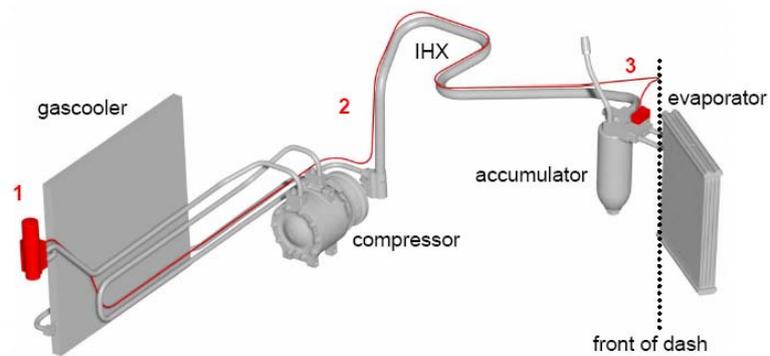


圖 1 - 8 冷機循環圖[4]



Additional components for heating: 1 3/2-way valve
 2 Capillary tube
 3 T-junction

圖 1 - 9 冷暖氣兩用系統循環圖[4]

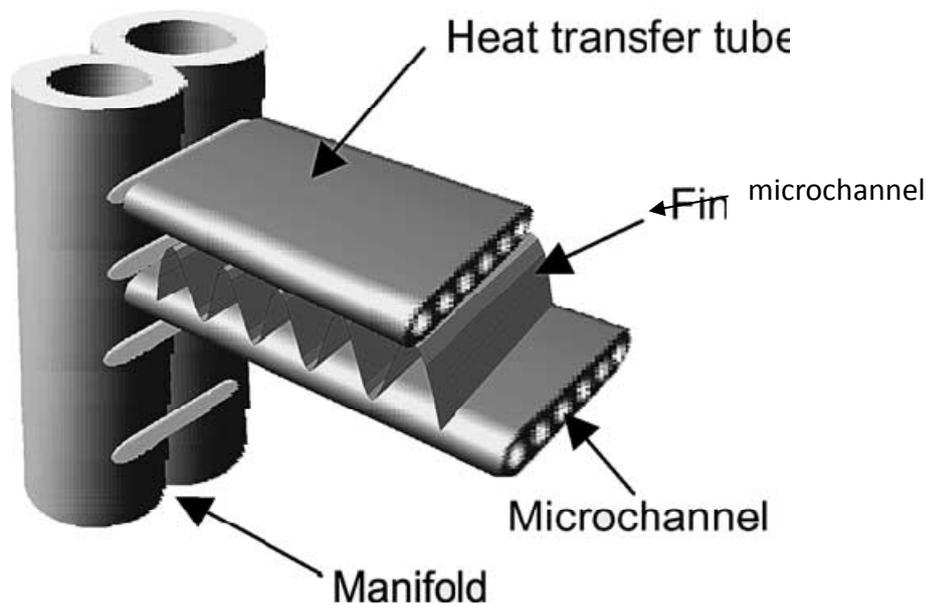


圖 1 - 10 二氧化碳熱交換器外型[5]

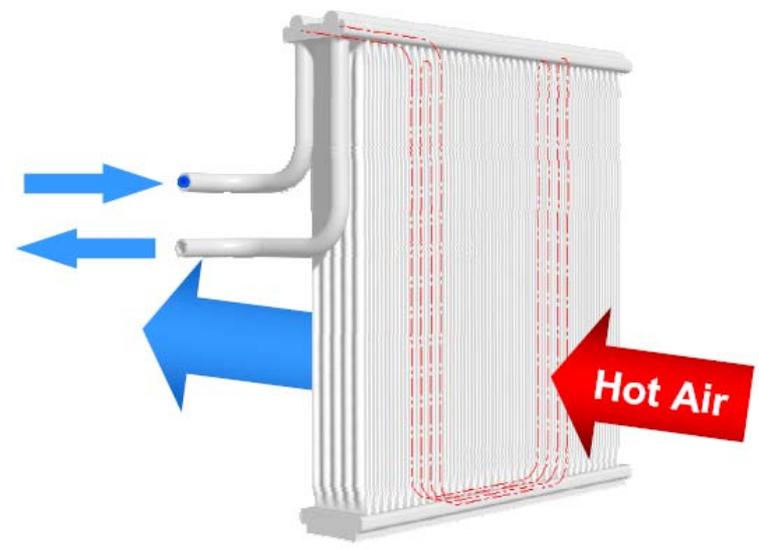


圖 1 - 11 蒸發器示意圖[4]



圖 1 - 12 多孔擠製管之折彎扭曲變形圖



圖 1 - 13 MPE tube 截面圖

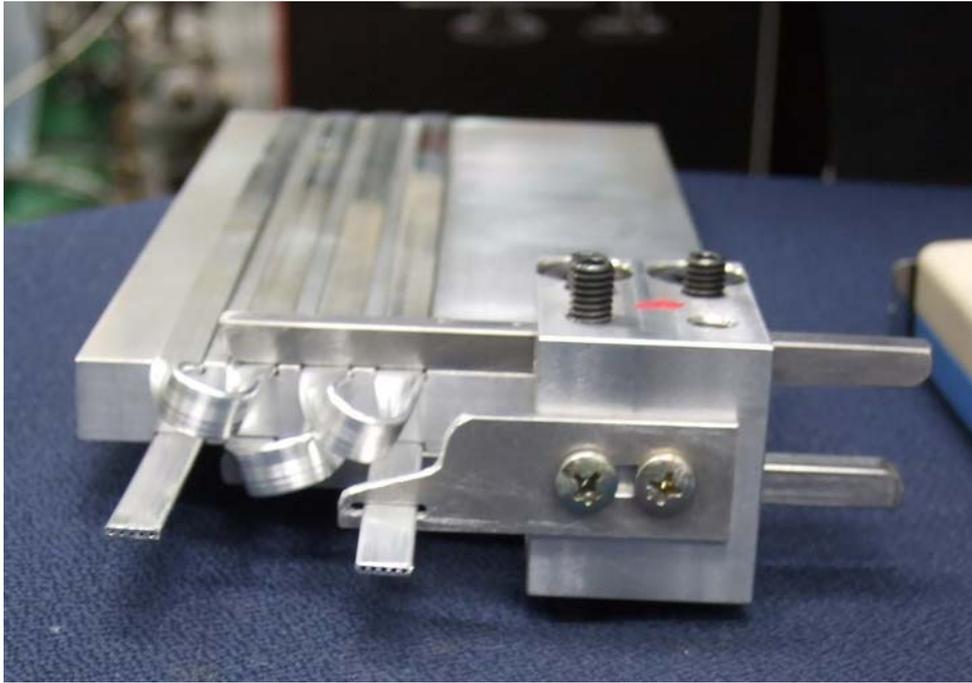


圖 1 - 14 MPE tube 人工折彎扭曲之制具



圖 1 - 15 MPE tube 使用制具變型後之成品



圖 1 - 16 焊接完成之 MPE tube 熱交換模組



1.4 論文結構

本論文一共分為四章：第一章為研究動機及文獻回顧；第二章為有限元素軟體與塑性變形理論；第三章為模型與網格之建立，模擬條件設定以及模擬成果；第四章為結論與未來展望。



第二章 剛塑性有限元素法理論

與有限元素軟體簡介

金屬成型的過程中，塑性變形量通常遠大於彈性變形的部分，在材料的回彈量很小可以忽略時候可以用剛塑性 (rigid-plastic) 來取代真實的彈塑性 (elasto-plastic) 變形，此法不僅被用於塑性變形的解析解求解法以簡化問題，也被用在電腦有限元素分析法中以簡化計算量。

2.1 剛塑性有限元素法理論

剛塑性材料的塑性變形統御方程式可整理如下：

- equilibrium equations: $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0$ (2-1)

- yield criterion, $f(\sigma_{ij}) = C$: $\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2}(\sigma_{ij}'\sigma_{ij}')} = \bar{\sigma}(\bar{\epsilon}, \dot{\bar{\epsilon}})$ (2-2)

- constitutive equations: $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda}$, $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\bar{\sigma}} \sigma_{ij}'$ with $\dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3} \epsilon_{ij} \epsilon_{ij}}$ (2-3)

- compatibility conditions: $\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ (2-4)

要求得同時滿足上面方程式的解相當困難，因此一般解析解法均為某些假設條件下的近似解法，而在有限元素法中採用變分原理

(variational principle) 來求解。

首先求一可容許速度場 u_i 滿足 compatibility condition、不可壓縮性和速度邊界條件，其解可使下列泛函數呈一靜定值

(stationary value):

$$\pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\varepsilon} dV - \int_{S_F} F_i u_i dS \quad (2-5)$$

其一階變分為：

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2-6)$$

上式中不可壓縮性的限制條件可利用 Lagrange multiplier 將 $\int \lambda \dot{\varepsilon}_v dV$ 帶入泛函式消除 (其中 $\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_{ii}$)。改寫後原式之一階變分為

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV - \int_{S_F} \lambda \delta \dot{\varepsilon}_v dS + \int_V \dot{\varepsilon}_v \delta \lambda dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2-7)$$

另一消除不可壓縮性限制條件的方法為使用 penalty constant，改寫後一階變分為：

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\varepsilon} dV + K \int_V \dot{\varepsilon}_v \delta \dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2-8)$$

另外，由平衡方程式之 weak form 可得

$$\int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \delta u_i dV = 0 \quad (2-9)$$

部分積分後

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j} dV - \int_V \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} \delta u_i) dV = 0 \quad (2-10)$$

因為 stress tensor 的對稱性並且使用 divergence theorem

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2-11)$$

上式面積分中，邊界條件 $\delta u_i = 0$ on S_u 及 $\sigma_{ij} n_{ij} = F_i$ on S_F 均已被考慮進去。再代入 $\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \delta_{ij} \sigma_m$ (hydrostatic stress $\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_{kk}$) 可得：

$$\int_V \sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2-12)$$

由 constitutive equation 及 $\dot{\epsilon}$ 的定義可得知， $\sigma'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\sigma} \delta \dot{\epsilon}$ ，

代入得：

$$\int_V \dot{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2-13)$$

再將不可壓縮性之條件 $\epsilon_v = 0$ in V 帶入，最後結果如下：

$$\int_V \dot{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + \int_V \sigma_m \delta \dot{\epsilon}_v dV + \int_V \delta \sigma_m \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_F} F_i \delta u_i dS = 0 \quad (2-14)$$

上式和使用變分法求得之式子(2-7)(2-8)比較可得知 Lagrange multiplier $\lambda = \sigma_m$ ，且 $K = 2 \frac{\sigma_m}{\epsilon_v}$ 為一類似 bulk modulus 之常數。

(2-7) (2-8) 兩式為剛塑性有限元素法的基本方程式，當滿足此基本方程式之速度場求出時，相對應之應力即可藉由 flow rule 和已知的應力分佈求得。

在有限元素法中，(2-7) 或 (2-8) 兩非線性方程式經過離散化 (discretization) 後利用高斯積分法 (Gaussian quadrature formula) 積分，利用直接疊代法 (direct iteration method) 以及

Newton-Raphson 法求解。

在 S_F 上的力邊界條件一般為無作用力或是均勻的靜水壓作用，然而在模具-工件界面 S_C 的邊界條件卻是混合邊界條件。在這個介面上無法完整地給定速度及作用力大小與方向的邊界條件，因為摩擦力方向與模具-工件兩者相對速度的方向相反，但是此相對速度卻無法預先知道。

對於某些情況，如擠製或是抽拉的時候，材料與模具的相對速度方向是可以預先知道的，因此這類加工的邊界條件可以藉由給定摩擦應力，如庫倫摩擦定律 $f_s = \mu p$ 或是定剪摩擦力 $f_s = mk$ 獲得解決，其中 p 為模具壓力， k 為降伏剪應力（ $k = \frac{Y}{\sqrt{3}}$ ）。

在模具-工件相對速度未知的情況下，如環壓縮、輓軋、鍛造等，處理的方式是以一個與速度相關之摩擦應力方程式做為近似的邊界條件。模具-工件界面 S_C 上材料速度的方向與模具面呈垂直，牽引力邊界條件表示為

$$f_s = mkl \cong mk \left\{ \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{|u_s|}{u_0} \right) \right\} l \quad (2-15)$$

其中 f_s 為摩擦應力， l 為與模具-工件兩者相對滑移方向相反之單位向量， u_s 為材料相對於模具之滑移速度，而 u_0 為一相對於 u_s 之較小正數。此法被用於解決有限元素法中接近中立點（neutral point）的邊界問題。

此外，前述 (2-7) (2-8) 兩式僅適用於材料為塑性變形時，金屬成型時材料可能會有剛性區 (rigid zone) 存在，當此區域的點出現在控制體積內時，(2-7) (2-8) 的第一項會因為等效應力值在等效應變率趨近於零為未定義而無法唯一決定。解決此問題之方法為假設應力-應變率之關係近似於

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3\dot{\epsilon}_0}{2\bar{\sigma}_0} \sigma_{ij}', \text{ with } \bar{\sigma}_0 = \sigma(\epsilon, \dot{\epsilon}_0), \text{ for } \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_0 \quad (2-16)$$

其中 $\dot{\epsilon}_0$ 為一給定的界限值，如 10^{-3} 。如此剛性區中 (2-7) (2-8) 的第一項便改為

$$\int \left(\frac{\bar{\sigma}_0}{\dot{\epsilon}_0} \right) \dot{\epsilon} dV, \text{ for } \dot{\epsilon} \leq \dot{\epsilon}_0 \quad (2-17)$$

此式可用於處理近似剛性區域。

2.2 有限元素軟體 DEFORM™ 3D 簡介

DEFORM™ 全名為 Design Environment for FORMing，為美國 SFTC (Scientific Forming Technologies Corporation) 所開發的有限元素分析軟體。其前身為 Battelle Columbus Lab. 在美國空軍贊助之下開發的 ALPID (Analysis of Large Plastic Incremental Deformation)，是一個應用上一節所述之塑性變形理論處理大變形塑性加工問題的有限元素分析軟體。DEFORM™ 可以用來分析鍛造、擠製、輥軋、抽拉等多種塑性加工以及熱傳過程，並且有自動網格重建 (automatic remeshing) 的功能，對於使用有限元素分析大變形有

很大的幫助。

DEFORM™3D 分為前處理 (Pre Processor)、模擬器 (Simulator)、後處理 (Post Processor) 三大部分。進行分析時首先開啟前處理器輸入工件和模具之幾何外型、邊界條件，以及材料性質。接著交由模擬器進行運算分析，最後結果則藉由後處理器可以得到應力、應變、溫度分佈等多種分析結果，並且可以顯示圖形或是輸出成數值資料。

2.3 模擬材料與性質

本研究所使用之MPE tube為Norsk Hydro公司所製造，根據網頁上資料[14]得知，MPE tube可依不同需求使用不同的鋁合金製造，並且依照成品形式（線圈狀或是長條狀）會有不同的機械性質。本研究所使用之MPE tube採用之材料為Norsk Hydro發表[15]之鋁合金HA9108，屬於鋁合金 3000 系列，在取得其材料性質後輸入DEFORM™3D 中（圖 2-1與圖 2-2）。

在性質方面，DEFORM™3D中可以設定之物件性質 (Object Type) 有剛體 (rigid)、彈性 (elastic)、塑性 (plastic)、彈塑性 (elasto-plastic)、多孔性 (porous) 等類型，在模擬時分別有其適用的模擬類型及條件（圖 2-3）。

DEFORM™中 rigid 為不會變形之剛性物體，在模擬時為了減少運算量，在模具降伏強度遠大於工件的時候會設定為 rigid 加快模擬運

行速度。本研究中，上下端的夾具設定為 rigid。

DEFORM™ 中 elastic 為完全彈性體，材料行為完全依照楊氏系數 (Young' s modulus) 與蒲松比 (Poisson' s ratio) 來決定。通常在工具的變形量對工件加工有顯著的影響的時候，會將工具設定為 elastic 以求得應力和變形量。

Plastic 在 DEFORM™ 裡面是指套用剛塑性理論的物體，此理論假設在一定應變率之下物體之應力之增加量隨應變率成線性關係，進行塑性變形。在彈性回復量可以忽略的模擬中，此種性質能夠模擬出相當好的材料行為。但是在彈性回復量很重要的模擬中，就不能將此種性質應用於其中。本研究中，MPE tube 的部分即是採用此 rigid-plastic 設定進行模擬。

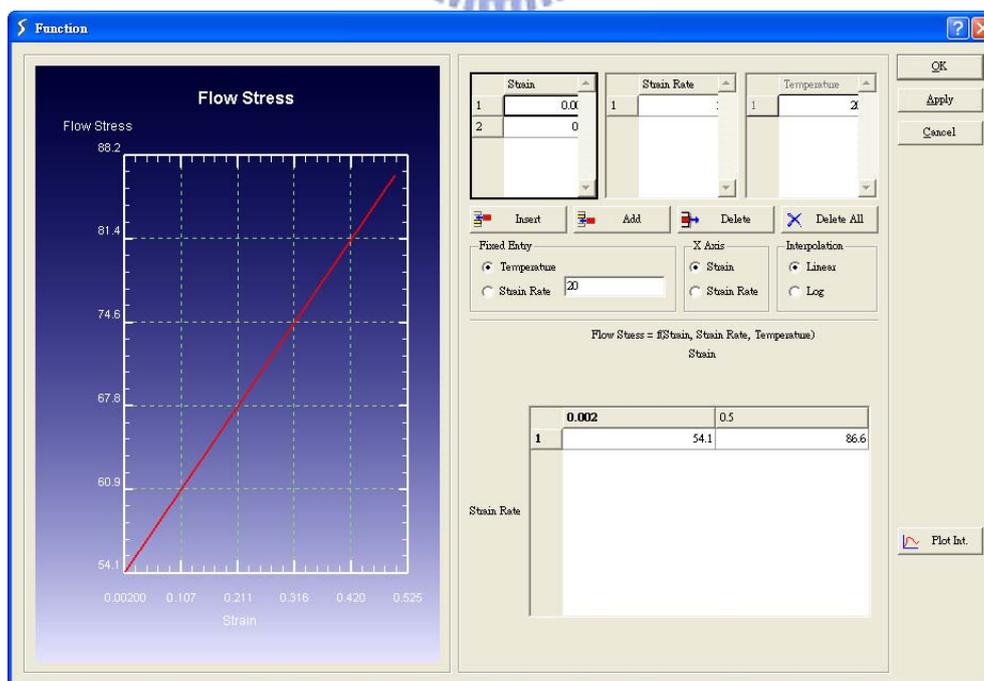


圖 2 - 1 HA9108 材料性質 (塑性)

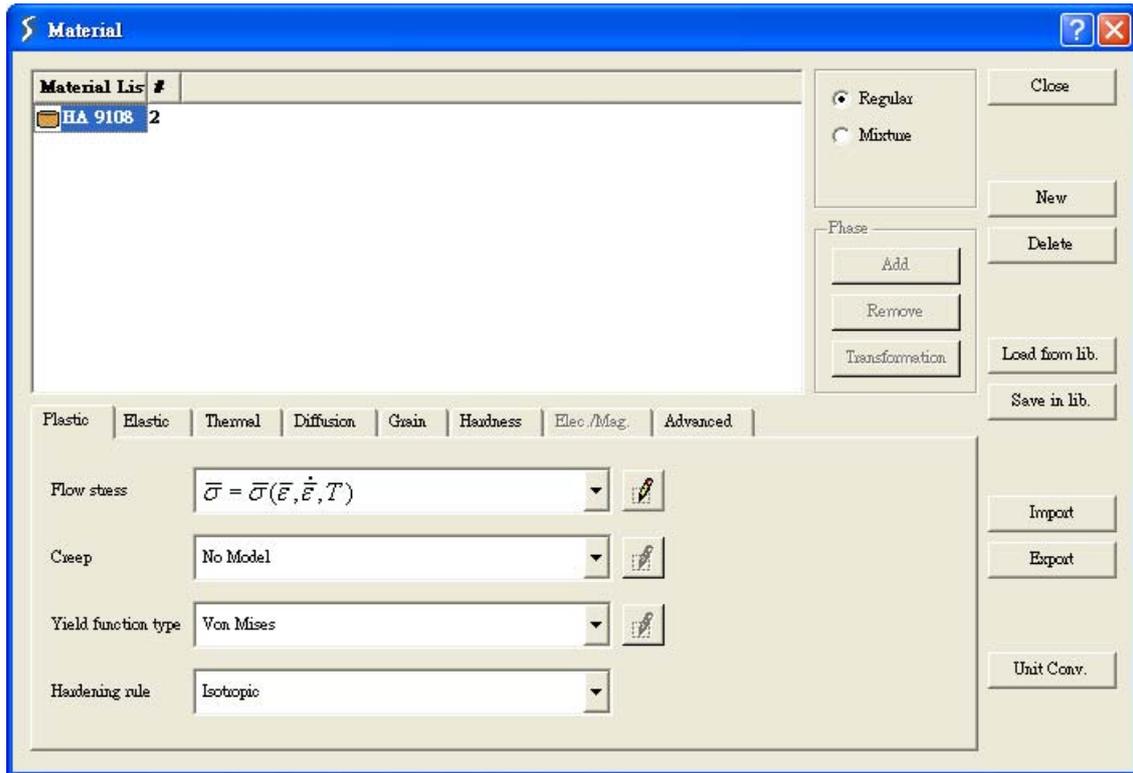


圖 2 - 2 HA9108 材料性質

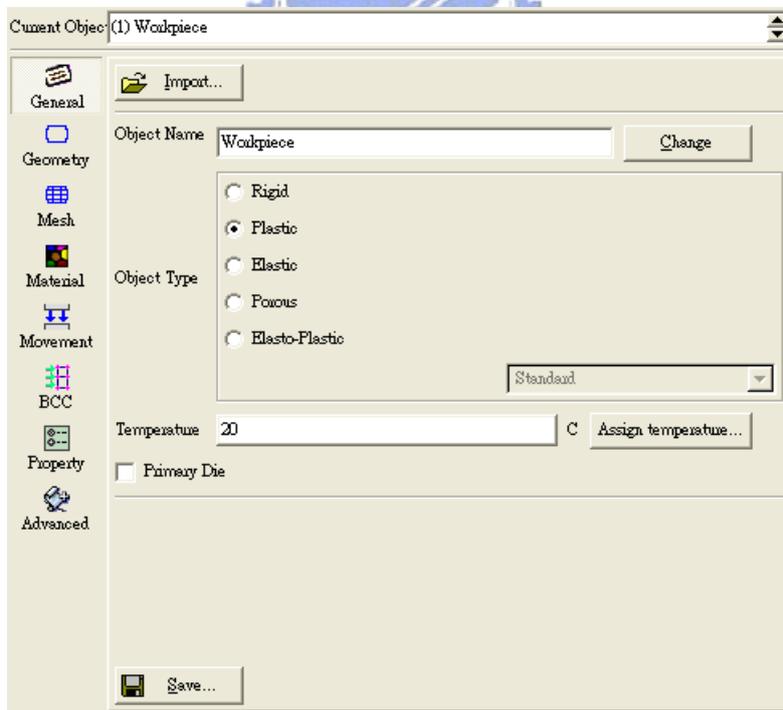


圖 2 - 3 DEFORM™3D 物件性值

第三章 有限元素模擬與實驗驗證

3.1 研究步驟

本研究先使用 CAD 軟體 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 建立 MPE tube 之 3D 模型，再將其匯入 HyperWorks 之 HyperMesh 軟體產生網格，最後匯入有限元素軟體 DEFORM™3D 5.0 中進行模擬與分析，初期將現今之加工參數與條件帶入模擬中，並且經由實驗比對結果，確認模擬結果之合理性。後續之模擬將對不同變形端長度與折彎曲率分析其對二次加工性造成的影響，以及加工後 MPE tube 本身之性質，求出改變參數對應之變形趨勢，以及其對加工性之影響。

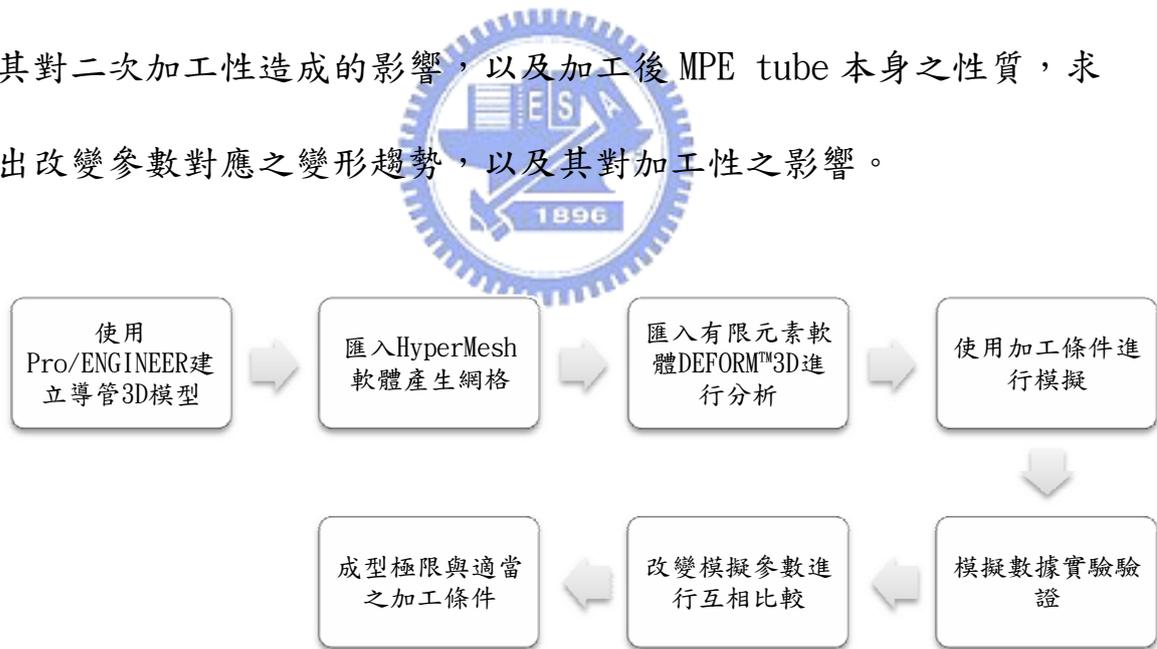


圖 3-1 研究步驟

3.2 模型建立

進行模擬前首先需要建立 3D 模型，本研究使用 3D CAD 軟體 Pro/ENGINEER 繪製 MPE tube 模型與夾具。圖 3-3 為 MPE tube 之模型，MPE tube 之設計圖為工研院能環所提供。MPE tube 截面幾何如圖 3-2 所示，長度為 30mm。完成之後輸出成 IGES 檔匯入 HyperMesh 中建立網格。

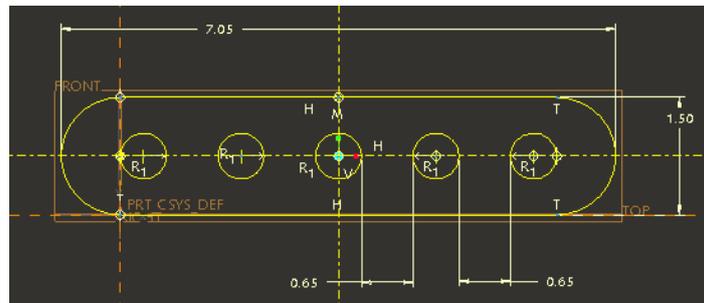


圖 3-2 MPE tube 截面圖 (單位：mm)

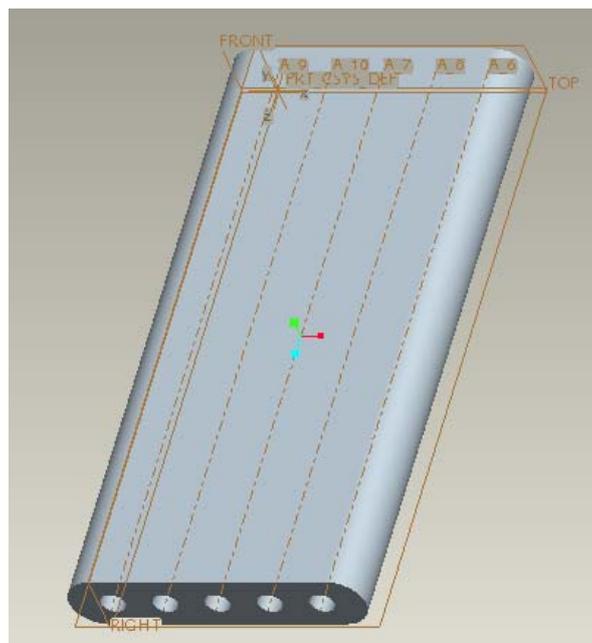


圖 3-3 MPE tube 立體模型

Pro/ENGINEER 產生之 IGES 檔之幾何形狀匯入 HyperMesh 之後，利用其 automesh 及 solidmap 等功能，在保留 MPE tube 各細部形狀情況下建立四面體網格，產生成 IDEAS 所使用之格式給 DEFORM 前處理器匯入，並且設定模擬與邊界條件。

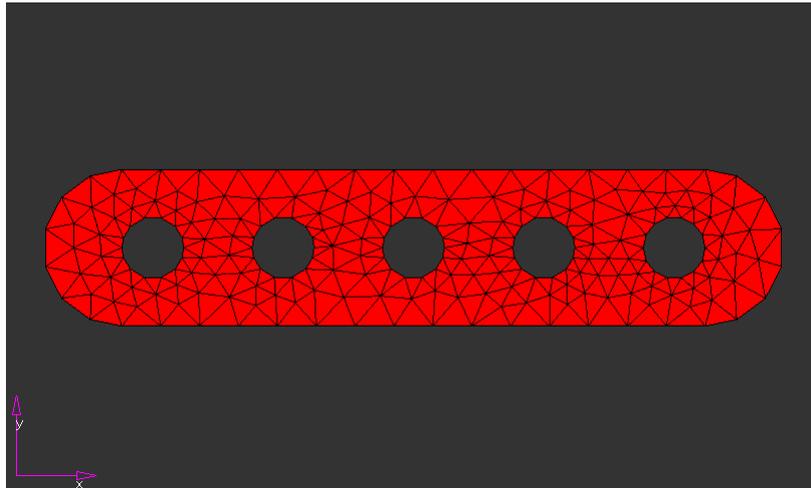


圖 3-4 MPE tube 截面網格圖

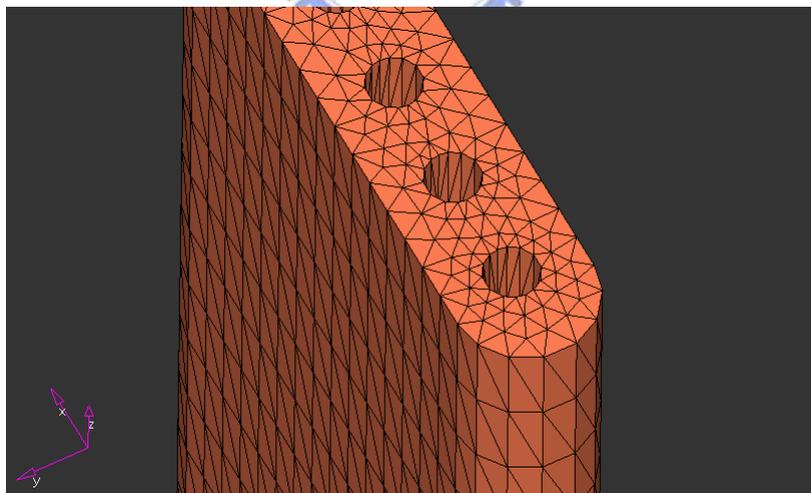


圖 3-5 MPE tube 網格圖

3. 3MPE Tube之變形過程

MPE Tube之變形需藉由一輔助具幫助（圖 3-6），此一輔助具由工研院能環所設計，將MPE tube固定在輔助具之後再加以折彎和扭曲，整個過程與模擬時對應之條件如表 3-1所列。

然而此一變形過程並非完善，成型之 MPE tube 可清楚看見輔助具帶動扭轉的過程中與 MPE tube 表面擠壓所造成之變形痕跡，故在進行模擬時對此一過程做小幅度之修改，並將此一修改過程提供給工研院參考。

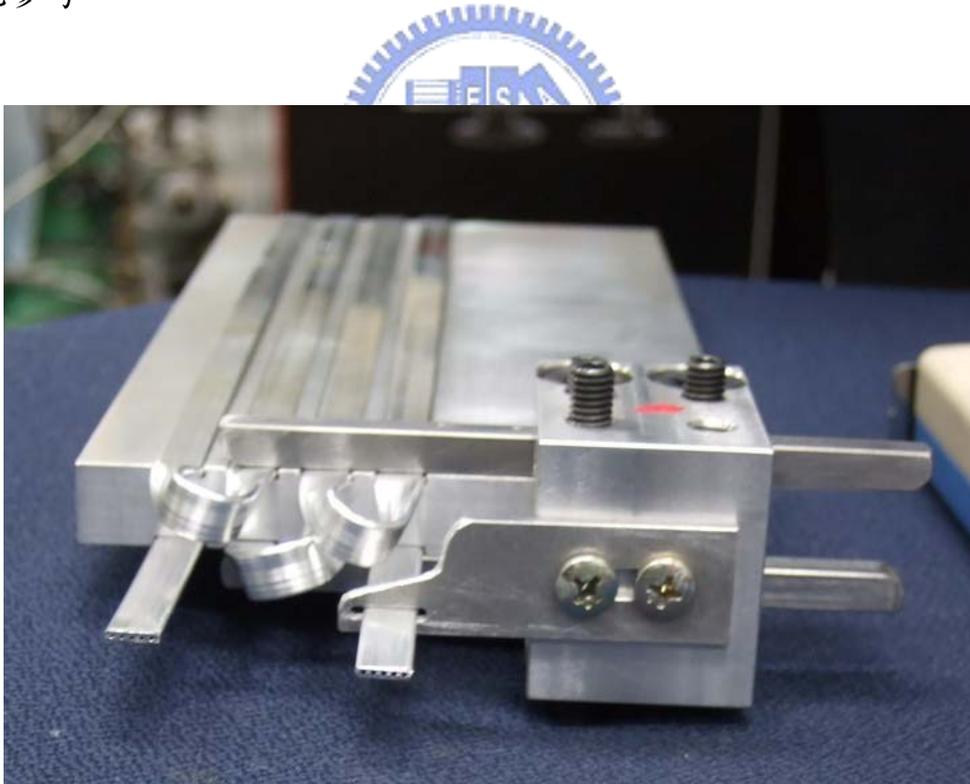
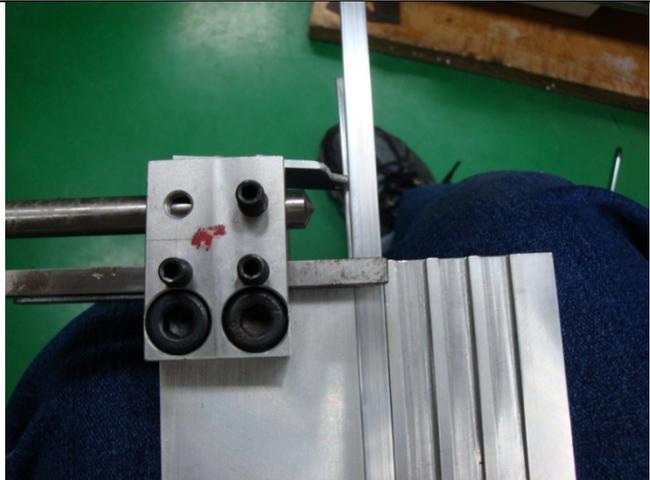
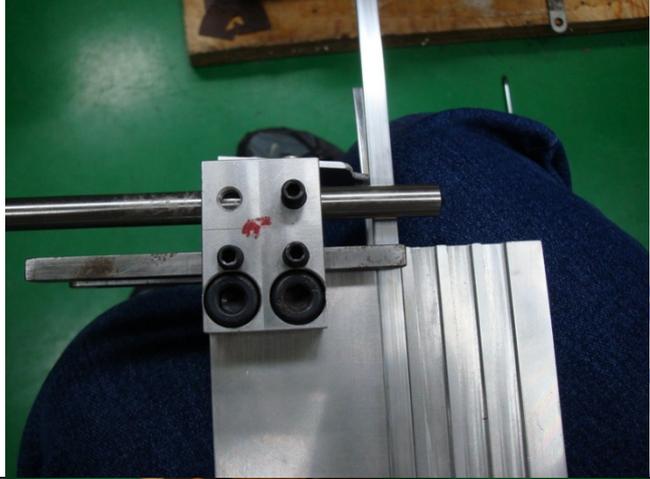
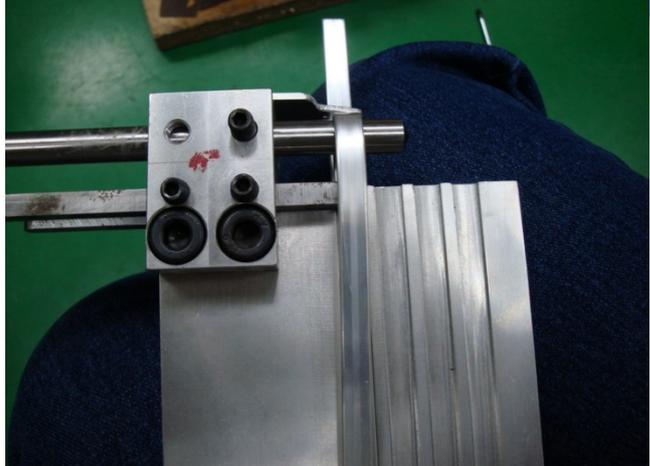
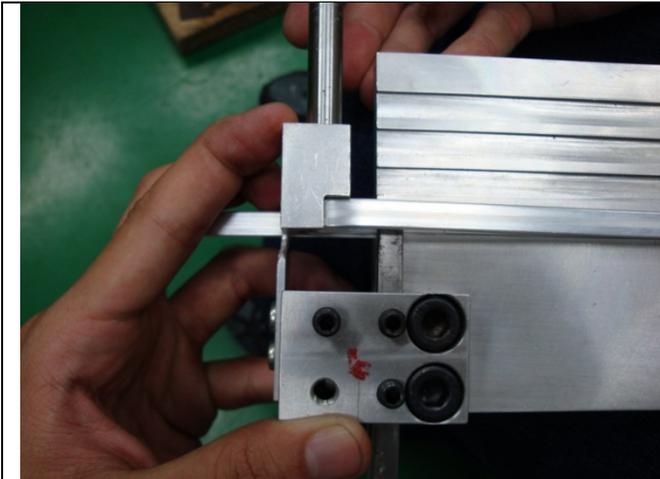


圖 3-6 MPE tube 變形之固定方式

表 3-1 MPE tube 折彎扭曲之變形過程

	<p>用橫桿將 MPE tube 固定在溝槽內</p> <p>模擬相關條件： MPE tube 與溝槽間摩定剪摩擦因子 1.0</p>
	<p>將圓棒固定在 MPE tube 上方</p> <p>模擬相關條件： MPE tube 與圓棒間摩定剪摩擦因子 0.12</p>
	<p>將 MPE tube 沿圓棒折彎 180 度</p>



將扭轉用扣具安置於 MPE tube 上

模擬相關條件：

扣具與 MPE tube 摩定剪摩擦因子 0.12



用扣具將 MPE tube 頭扭轉

模擬相關條件：

扣具對 MPE tube Z 軸方向旋轉 90 度



用叉狀扳手將 MPE tube 另一腳旋轉

模擬相關條件：

MPE tube 一端對 Z 軸旋轉 90 度

3.4 初步模擬設定與問題

MPE tube之網格匯入DEFORM™之後，其與夾具相對位置初步設定如圖 3-7。MPE tube材質依照取得之HA9108 材料性質設定，與下端之固定具定剪摩擦因子設定為 1.0，並且在接觸條件設定為sticking；與中間之圓棒以及上端固定具之定剪摩擦因子設定為 0.12，此為DEFORM™3D中對於金屬間磨擦力定剪摩擦因子的建議值。MPE tube之性質設定為plastic (rigid-plastic)，兩端固定具及圓棒則設定為rigid。

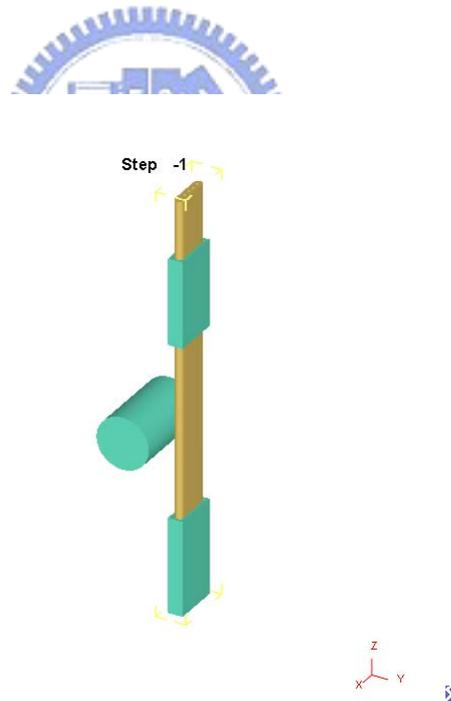


圖 3-7 初步模擬所使用之模型

然而此模型因為DEFORM™3D程式本身的問題與限制無法如期進行。DEFORM™3D中對一物體 (object) 之元素量限制為 20 萬個，但是因為模型中MPE tube本體體積較大，以此數量之元素建立之網格無法清楚

表現出內部圓孔之形狀 (圖 3-8、圖 3-9)，因此本研究最後改採用 HyperMesh 軟體建立網格而不使用 DEFORM™3D Pre-Processor 內之網格自動建 (auto mesh) 立功能。

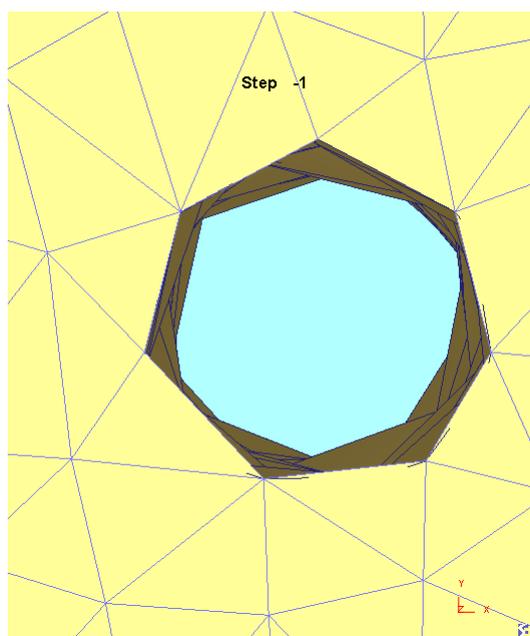


圖 3-8 DEFORM 3D 自動產生網格之圓孔外形

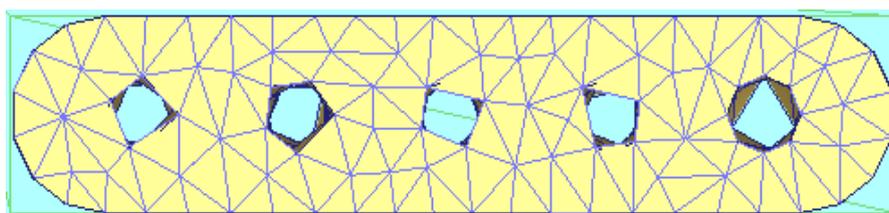


圖 3-9 DEFORM 3D 自動產生網格之截面形狀

為了建立符合限制元素數量的模型，本研究嘗試使用 HyperMesh 建立將 MPE tube 模型僅中間部分元素加密 (圖 3-10) 以及僅中間部分有內部圓孔 (圖 3-11) 之模型。然而 DEFORM™3D 對於此兩種模型之處理亦有問題，此二模型 DEFORM™3D 會在開始進行運算之前的 step

-1 就進行remesh的動作，造成無法使用HyperMesh建立之網格進行後續的模擬計算。

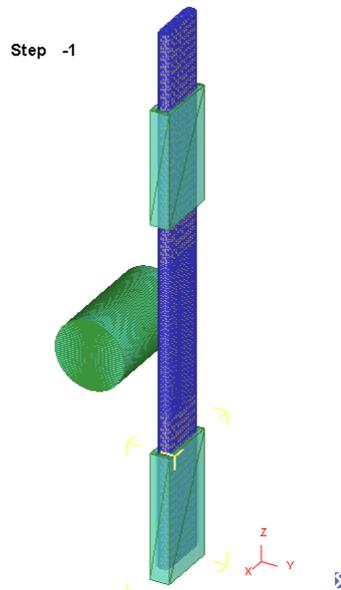


圖 3-10 僅中間部分元素加密之 MPE tube 模型

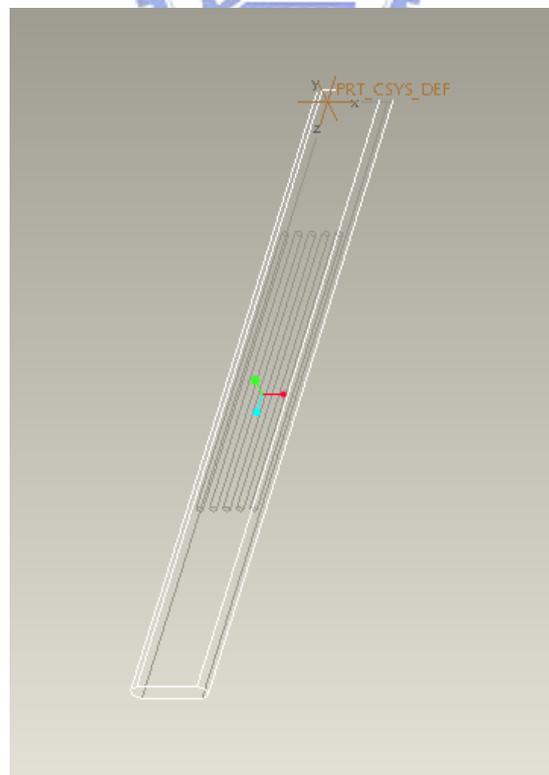


圖 3-11 僅中間部分有內部圓孔之 MPE tube 模型

3.5 簡化模擬條件

因為前述之問題，圖 3-7 之模型無法用來進行模擬，故本研究對於該模型再進行簡化。由於本研究探討之 MPE tube 變形主要在於彎曲部分，故模型簡化以不影響 MPE tube 彎曲部分之變形為最優先考量。經過簡化後改為如圖 3-12 所示。接觸條件設定改為兩端固定具與 MPE tube 之間為 sticking，即和 MPE tube 之間沒有滑動現象；MPE tube 與圓棒之間之定剪摩擦因子依舊為 0.12。HyperMesh 產生之 MPE tube 網格如圖 3-4、圖 3-5 與圖 3-12 所示，一共 11,770 個元素。

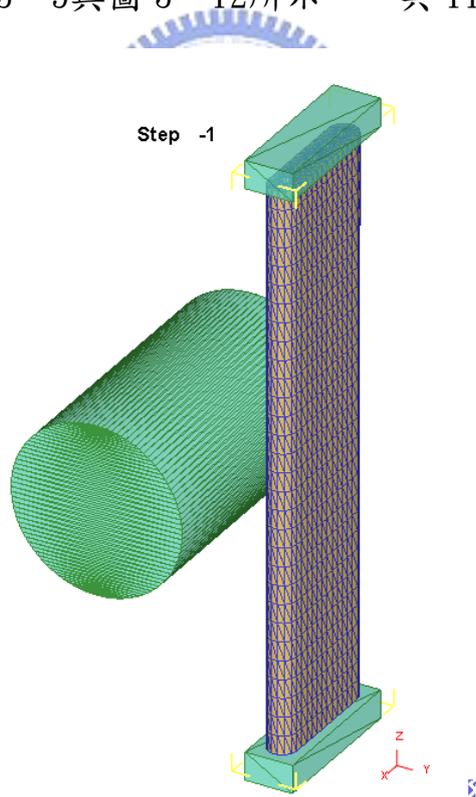


圖 3-12 模擬設置圖

3.6 初期模擬結果

模擬之設定為上下方固定具對X軸，每個step以角速度 $1^\circ/\text{sec}$ ，一共進行 90 step來進行折彎 90° 之模擬（圖 3-13）。之後再將原上方之固定具以 $1\text{ mm}/\text{sec}$ 之速度沿X軸平移 10 mm （圖 3-14），再沿Z軸平移 -10 mm ，最後之變形結果如圖 3-15。接著在MPE tube的五個內孔管壁施加壓力 40 MPa ¹，模擬通入高壓後MPE tube變形情況（圖 3-16、圖 3-17）。

表 3-2 初期模擬之設定

材料	HA9108
位移速率	$\pi/180$ (rad/sec); $1(\text{mm}/\text{sec})$
網格數	11,770 個
定剪摩擦因子	0.12 ²

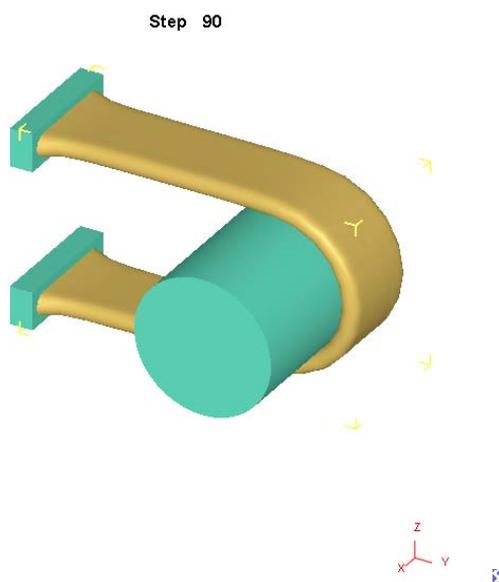


圖 3-13 折彎 180°

¹ 二氧化碳壓縮機之工作壓力約 133 bar ，根據與工研院合作之 SINTEF 經驗，導管爆破壓力約為工作壓力三倍，故實際測試時通入壓力約 400 bar （即 40 MPa ），本研究在模擬時亦採用此經驗值。

Step 100



圖 3-14 沿 X 軸平移 10 mm

Step 110

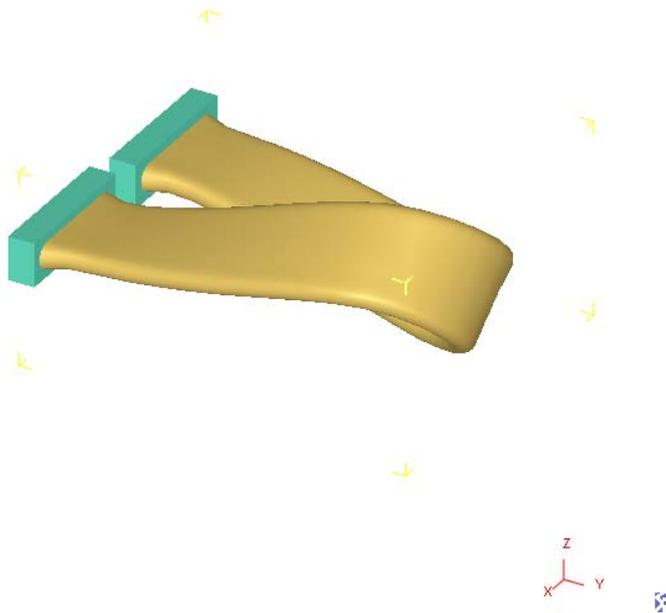


圖 3-15 再沿 Z 軸平移-10 mm

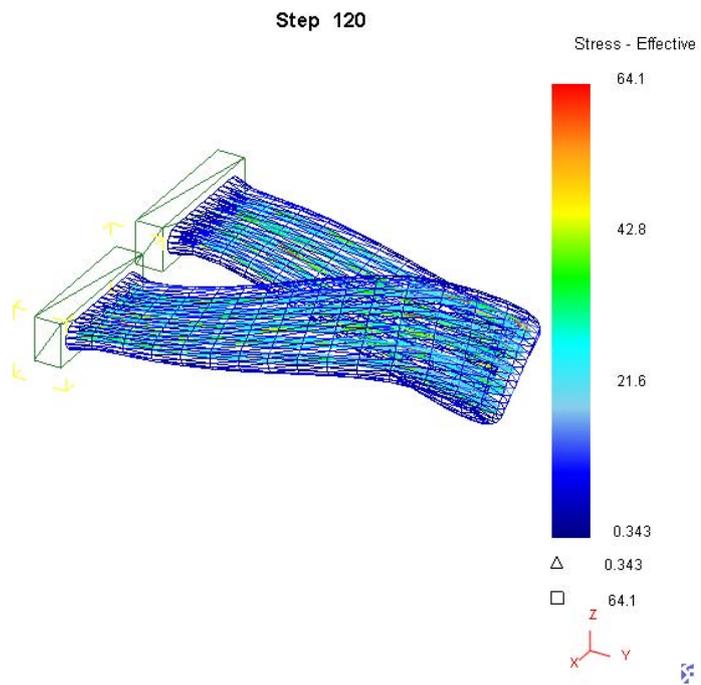


圖 3-16 管壁施加壓力後應力分佈

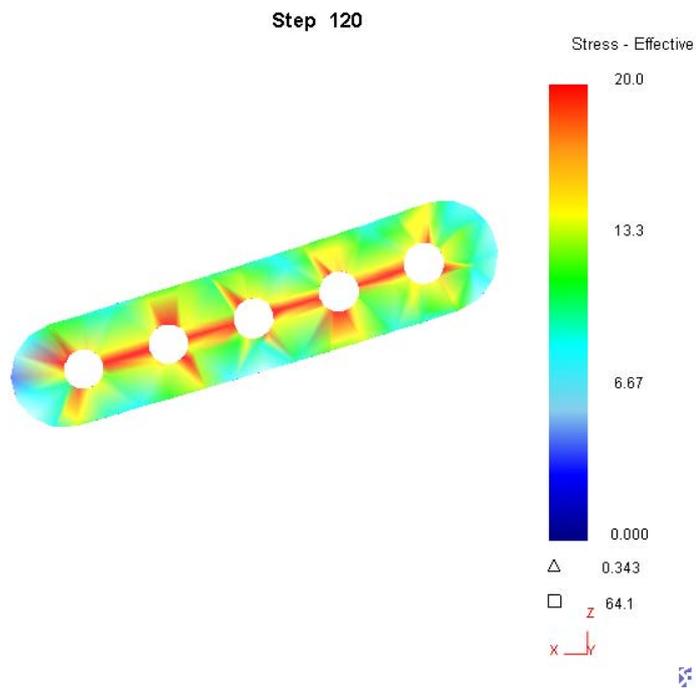


圖 3-17 管壁施加壓力後應力分佈截面圖

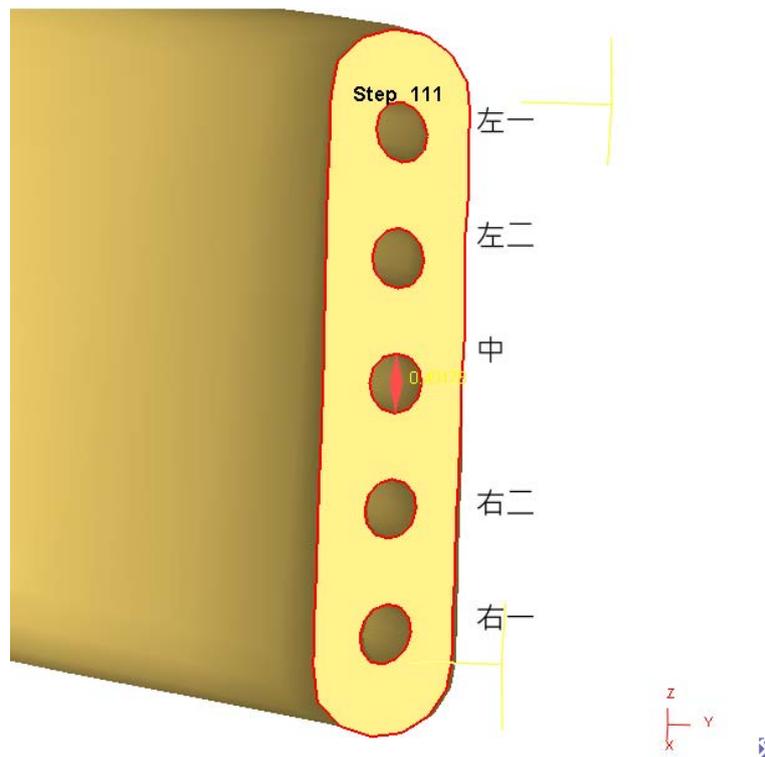


圖 3-18 MPE tube 變形模擬彎曲處之切面

表 3-3 MPE tube 變形之模擬結果

位置	孔直徑 (單位: mm)
左一	Min:0.411, Max:0.511
左二	Min:0.439, Max:0.501
中	Min:0.431, Max:0.493
右二	Min:0.423, Max:0.491
右一	Min:0.412, Max:0.539

初期模擬結果如圖 3-18 與表 3-3 所示，後面將針對此模擬進行一相同之實驗對此數據進行比對與分析。

3.7 實驗驗證與結果討論

驗證之過程中，首先由工研院能環所取得以HA9108 製造之MPE tube，接著藉由圖 3-6 之輔助具之幫助，進行如模擬（圖 3-13 至圖 3-15）之變形過程，產生之成品如圖 3-19。為了方便使用線切割放電加工切割MPE tube，另外製造了一夾持用之輔具（圖 3-20、圖 3-20），方便使用線切割放電加工時切割MPE tube的彎曲處（圖 3-21）。切割過後使用光學顯微鏡觀測截面之變形結果（表 3-4），並起與另一未經過變形之截面比較（表 3-5）。

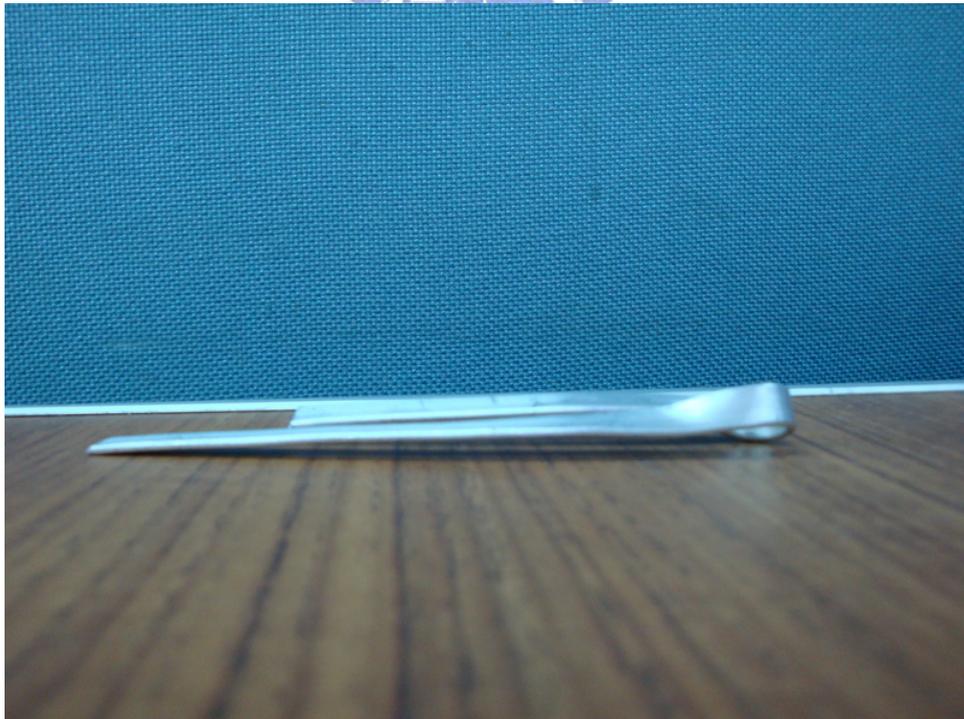


圖 3-19 驗證實驗所彎曲之 MPE tube 成品

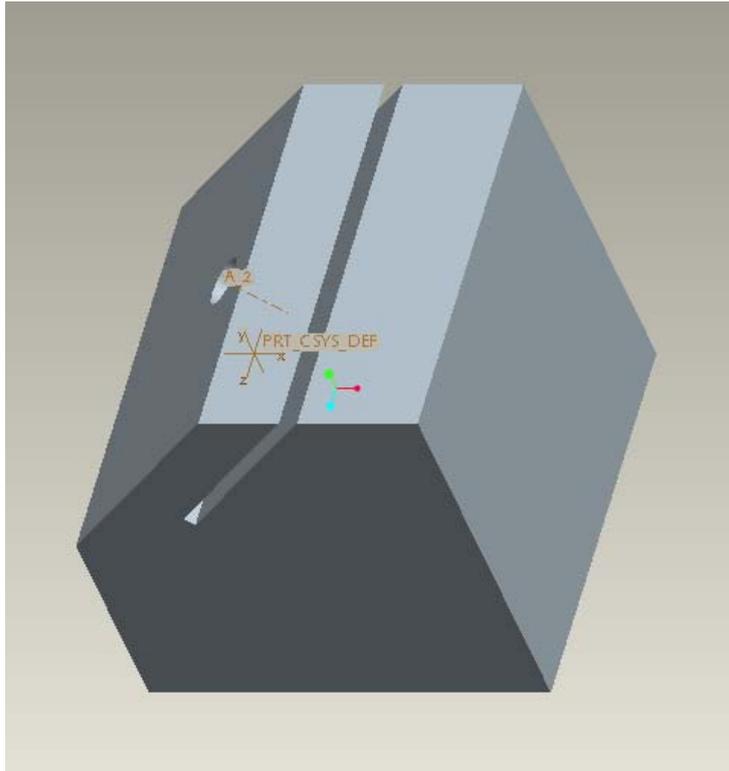


圖 3 - 20 MPE tube 進行線切割放電加工時所使用之輔具

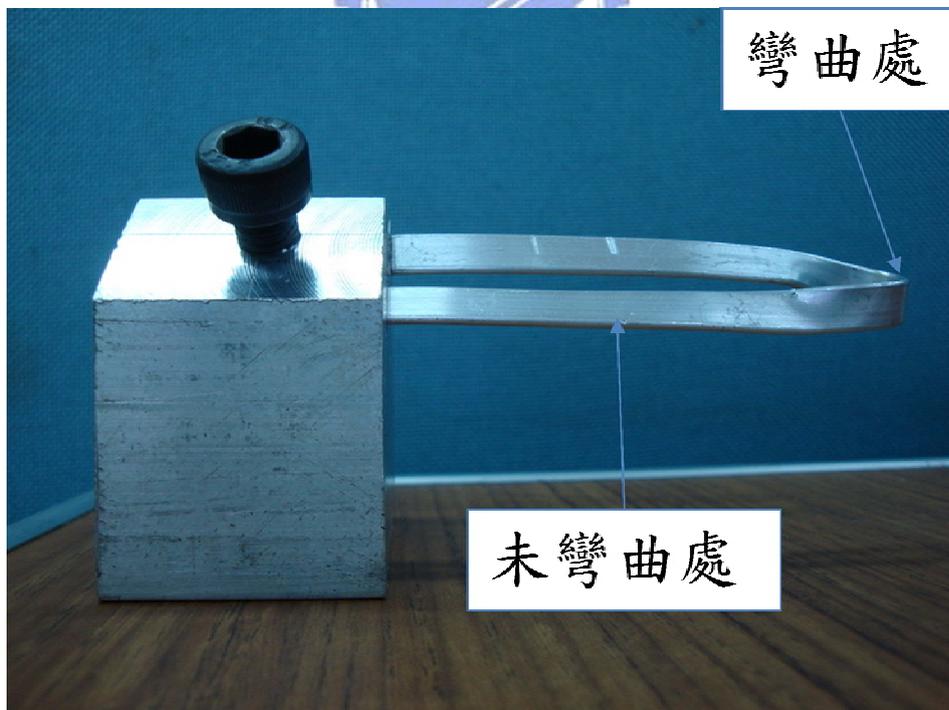


圖 3 - 21 MPE tube 實驗切割位置圖



圖 3 - 22 用來觀測實驗結果之光學顯微鏡



比較實驗結果（表 3-4 與表 3-5）可知，MPE tube 之內孔變型後之直徑（0.584~0.661 mm）與變形前之直徑（0.584~0.651 mm）幾乎沒有太大的變形。再考量原本設計的內孔直徑（0.6 mm）與所量測到的變形前 MPE tube 內孔直徑之間的關係，變形前後兩者之間的差距與製造上的精度誤差相當，故本實驗參數下 MPE tube 之變形對於內孔直徑之影響應可忽略。

而模擬之圓孔直徑變形後（圖 3-18）約在 0.411~0.539 mm 之間（表 3-3），與上述實際觀測到的結果差距約 0.1 mm。造成差距的原因可能是因為模擬用的簡化條件：使用 sticking 條件拘束 MPE tube 兩端，此一過度拘束會造成整個 MPE tube 在變形的過程中厚度方向產生變形，影響到內部圓孔在該方向的變形量。此外，模擬中所用的模型因為軟體元素總數的限制和收斂性的影響，精確度沒辦法達到實際上所量測的 10^{-3} mm 這麼小的尺度。但是除此之外，模擬的變形結果與真實變形狀況相當接近，故模擬結果所得之數據仍有一定的參考價值。

綜合模擬和實際實驗所得的結果，確認此一變形條件下折彎方式是可以使用的，該變形對於 MPE tube 在高壓下並不會影響其原本之功用。

表 3-4 MPE tube 彎曲處截面各圓之直徑

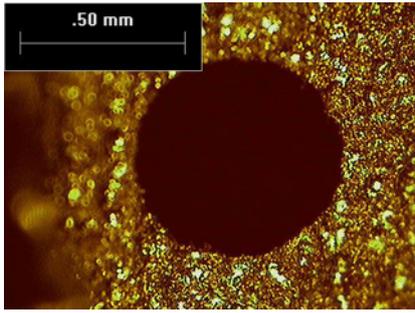
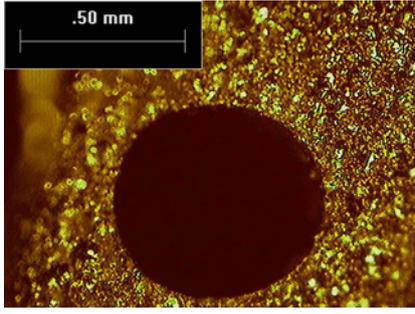
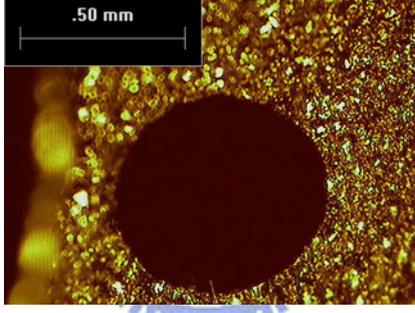
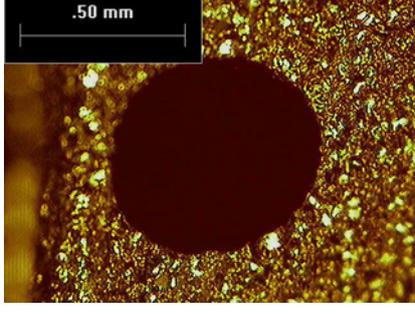
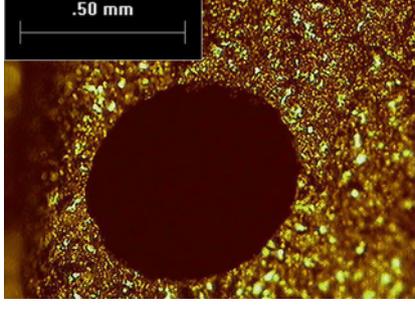
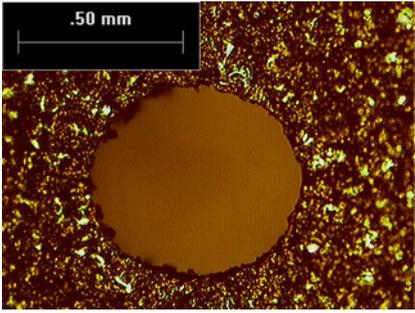
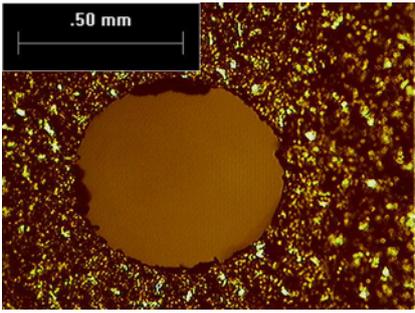
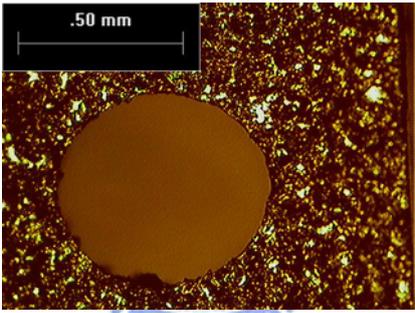
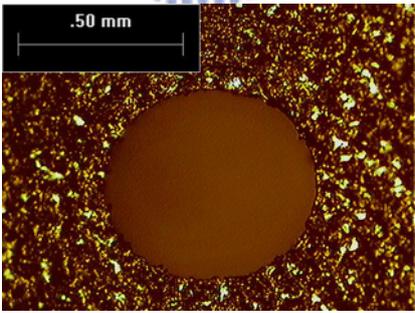
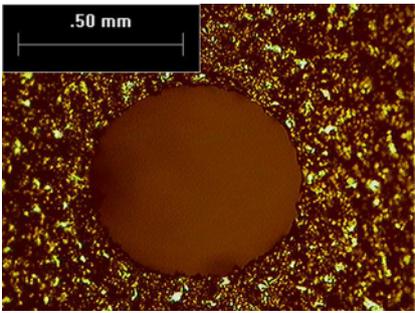
左一		最小直徑：0.600 mm
		最大直徑：0.631 mm
左二		最小直徑：0.592 mm
		最大直徑：0.649 mm
中		最小直徑：0.600 mm
		最大直徑：0.653 mm
右二		最小直徑：0.584 mm
		最大直徑：0.657 mm
右一		最小直徑：0.590 mm
		最大直徑：0.661 mm

表 3-5 MPE tube 未彎曲處截面各圖之直徑

左一		最小直徑：0.588 mm
		最大直徑：0.645 mm
左二		最小直徑：0.588 mm
		最大直徑：0.627 mm
中		最小直徑：0.592 mm
		最大直徑：0.651 mm
右二		最小直徑：0.584 mm
		最大直徑：0.649 mm
右一		最小直徑：0.584 mm
		最大直徑：0.649 mm

3.8 其他成型參數對變形之影響

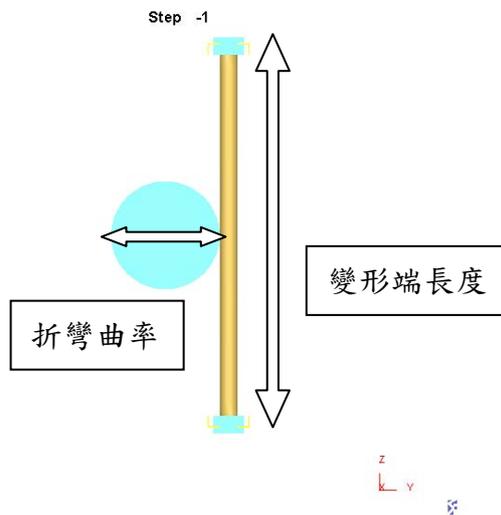


圖 3 - 23 變形參數改變圖



圖 3 - 24 熱交換器模組

確定現今之折彎變形方式可行之後，為求能使MPE tube變形後熱交換器（圖 3-24）之體積更小但是又不影響其效率，本研究改變了圖 3-23中折彎變形的曲率以及變形端長進行模擬，觀察此二參數改變對於整個變形過程所造成的影響，提供工研院與廠商改良設計時參考。改變之參數如表 3-6，模擬之變形結果如圖 3-25與表 3-7所示。

表 3-6 模擬改變之參數與範圍

改變參數	範圍
折彎曲率	(直徑) 9 mm, 7 mm, 5 mm
變形端長度	30 mm, 40 mm, 45 mm

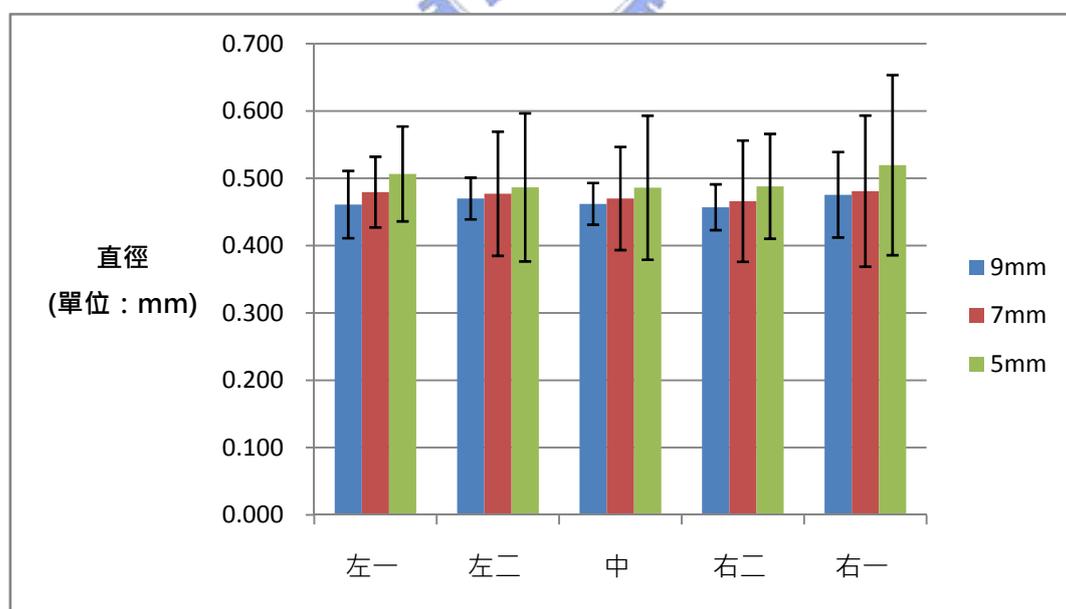


圖 3-25 折彎曲率變化與孔直徑之關係

表 3-7 不同折彎曲率下 MPE tube 各孔之直徑改變量 (單位: mm)

	9mm	7mm	5mm
左一	Min: 0.411 mm Max: 0.511 mm	Min: 0.427 mm Max: 0.532 mm	Min: 0.436 mm Max: 0.577 mm
左二	Min: 0.439 mm Max: 0.501 mm	Min: 0.433 mm Max: 0.521 mm	Min: 0.433 mm Max: 0.540 mm
中	Min: 0.431 mm Max: 0.493 mm	Min: 0.434 mm Max: 0.506 mm	Min: 0.434 mm Max: 0.538 mm
右二	Min: 0.423 mm Max: 0.491 mm	Min: 0.424 mm Max: 0.508 mm	Min: 0.450 mm Max: 0.526 mm
右一	Min: 0.412 mm Max: 0.539 mm	Min: 0.427 mm Max: 0.535 mm	Min: 0.450 mm Max: 0.589 mm

比較縮小圓棒直徑之模擬結果，整體之應力、應變均有提升之現象，且應變在兩固定端處有變大之現象（圖 3-26 至圖 3-31）。由此結果可以推知，在折彎時圓棒的直徑越小，兩端也會有較大應變，需要將此處之變形強度也納入考量。

比較MPE tube變形端長度變化的結果，MPE tube變形端拉長會使整體的應變減小，但是應力會上升且分佈範圍變廣（圖 3-32 至圖 3-37），此一現象與縮小圓棒直徑之結果有些類似。但圓棒直徑縮小亦影響到彎曲端之局部變形量，故在彎曲處之應力應變分部會有所不同。此外，變形端的長度增加會影響變形時帶動的扭轉角度變大（圖 3-38 至圖 3-40），此一扭轉變形量會使變形後MPE tube之高度使得體積增加，亦會影響應力應變之分佈。

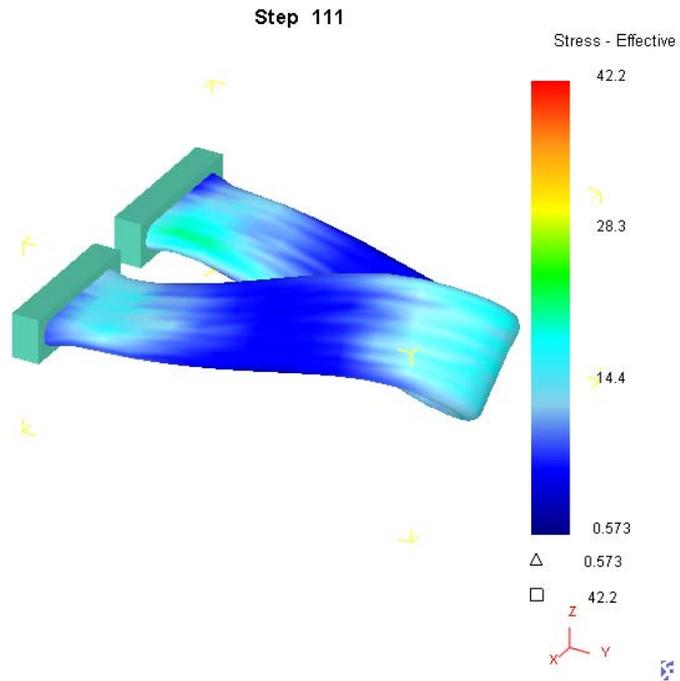


圖 3 - 26 圓棒直徑 9 mm 之應力分佈

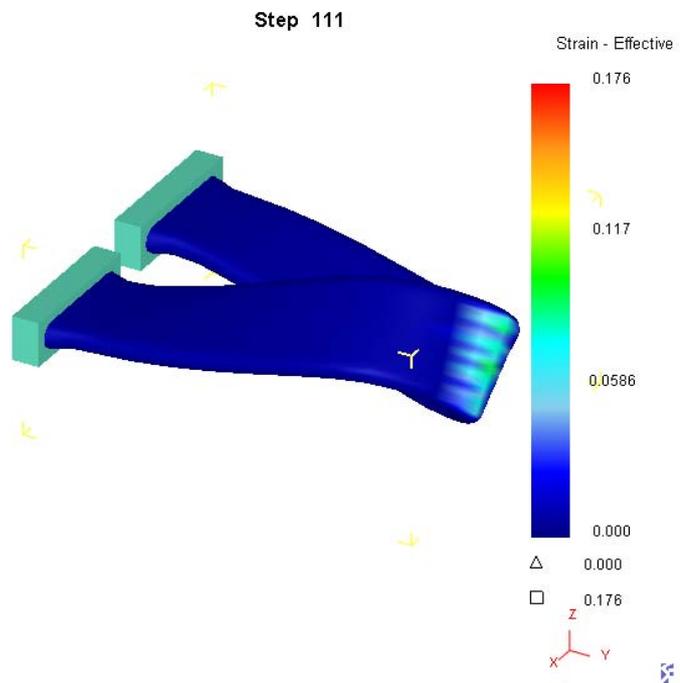


圖 3 - 27 圓棒直徑 9 mm 之應變分佈

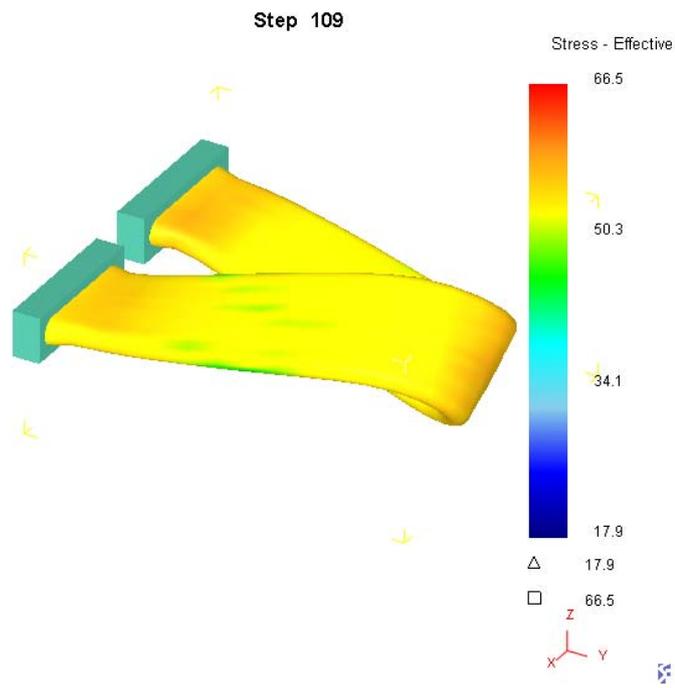


圖 3 - 28 圓棒直徑 7 mm 之應力分佈

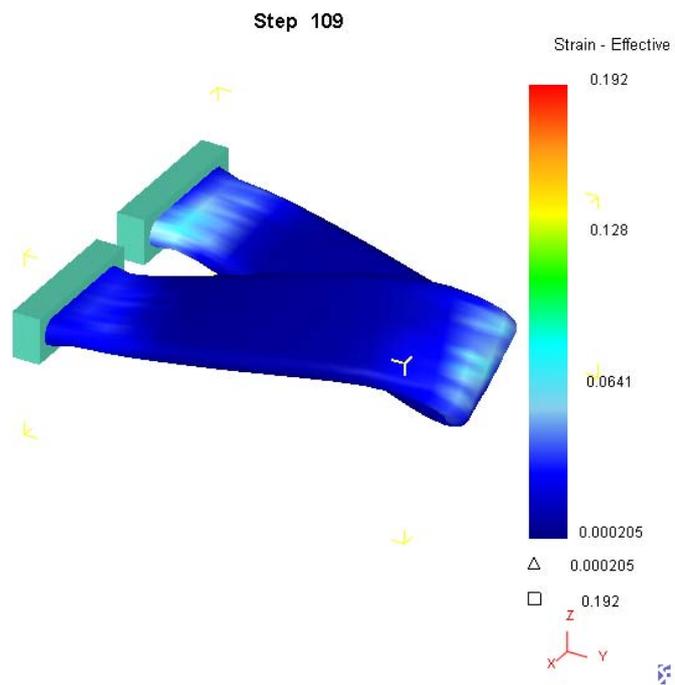


圖 3 - 29 圓棒直徑 7 mm 之應變分佈

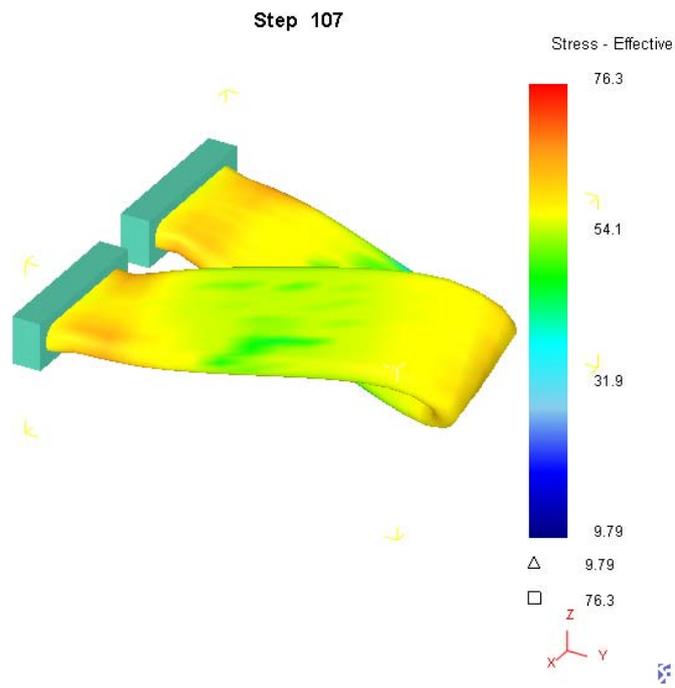


圖 3 - 30 圓棒直徑 5 mm 之應力分佈

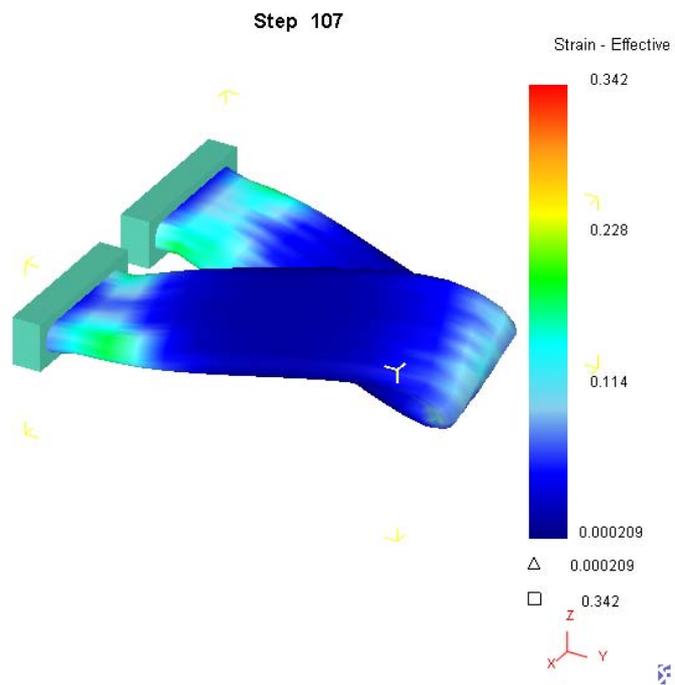


圖 3 - 31 圓棒直徑 5 mm 之應變分佈

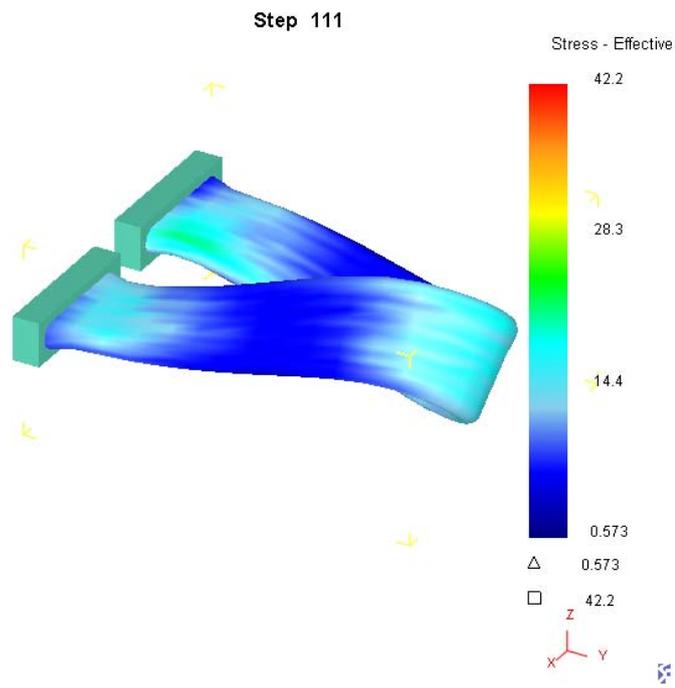


圖 3 - 32 變形端長度 30 mm 之應力分佈

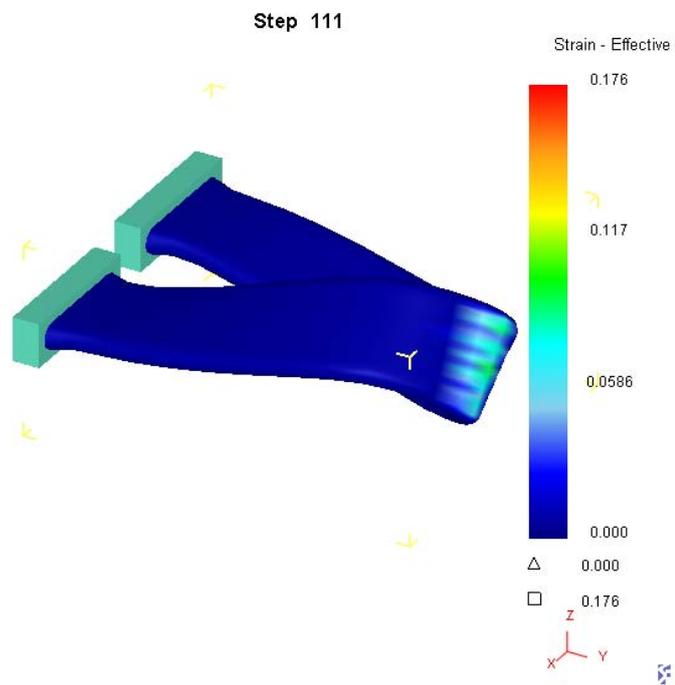


圖 3 - 33 變形端長度 30 mm 之應變分佈

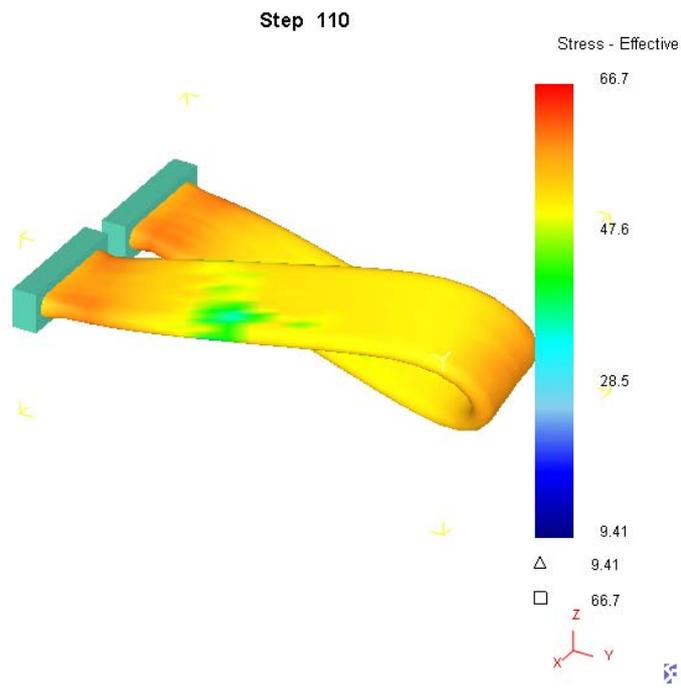


圖 3 - 34 變形端長度 40 mm 之應力分佈

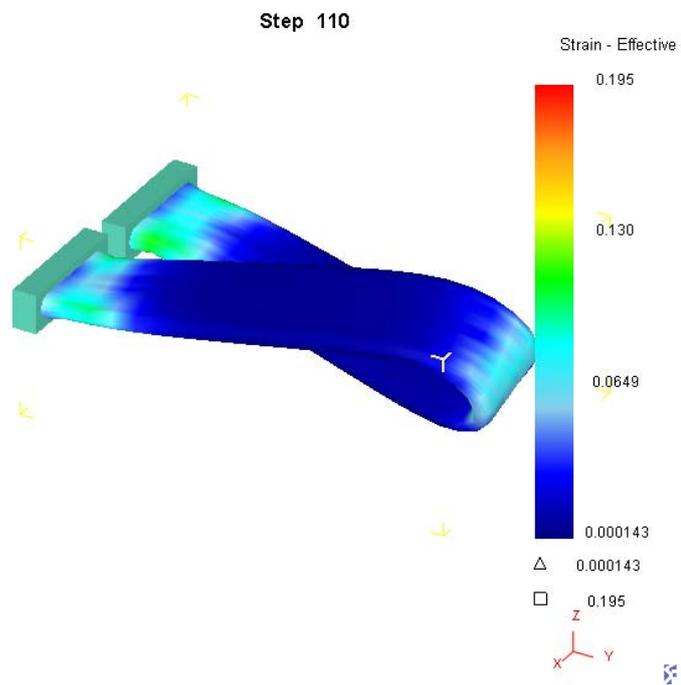


圖 3 - 35 變形端長度 40 mm 之應變分佈

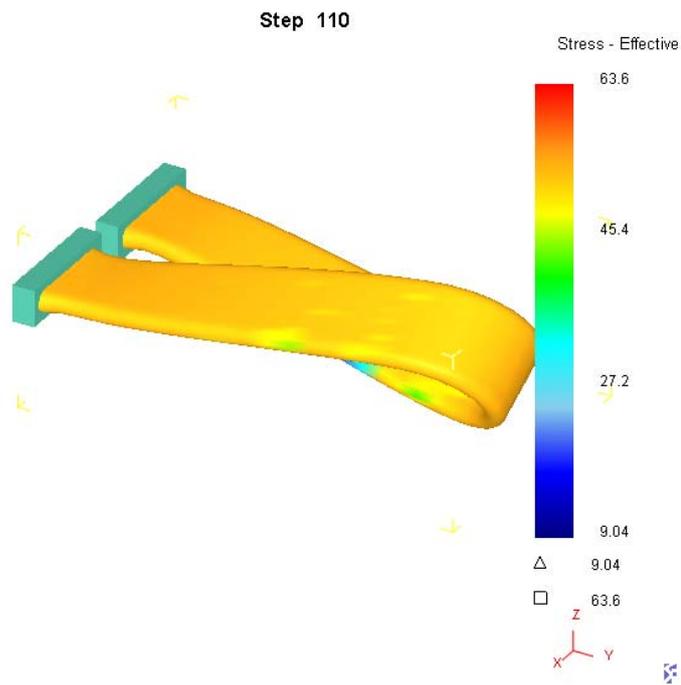


圖 3 - 36 變形端長度 45 mm 之應力分佈

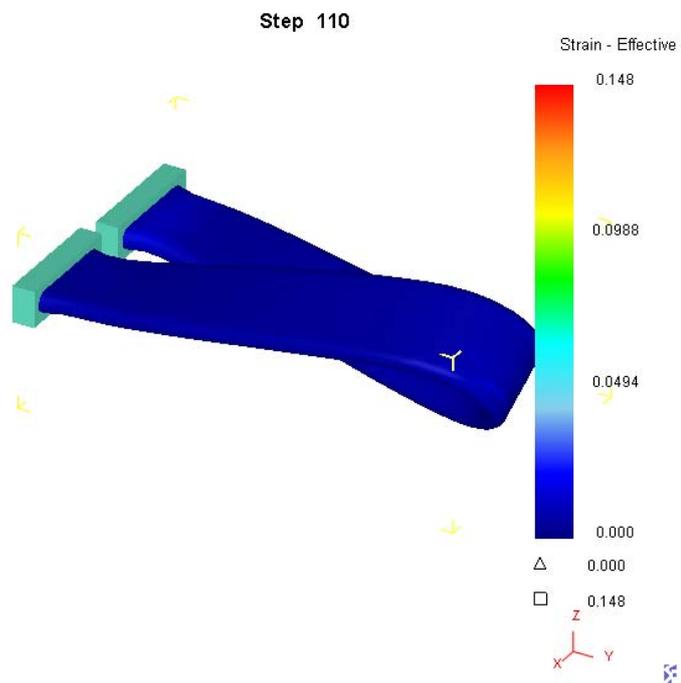


圖 3 - 37 變形端長度 45 mm 之應變分佈

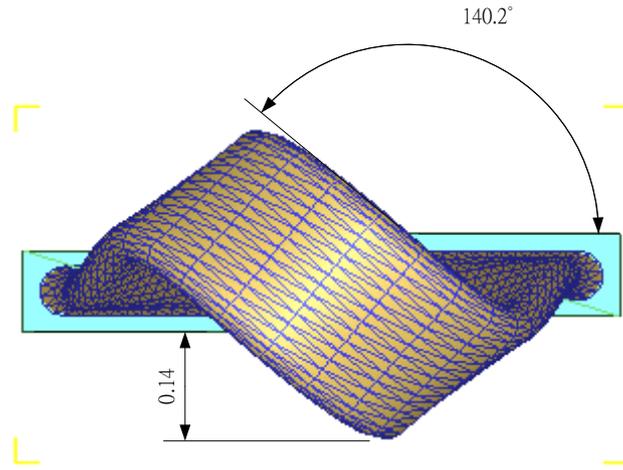


圖 3 - 38 變形帶動的扭轉角度 (長度 30mm)

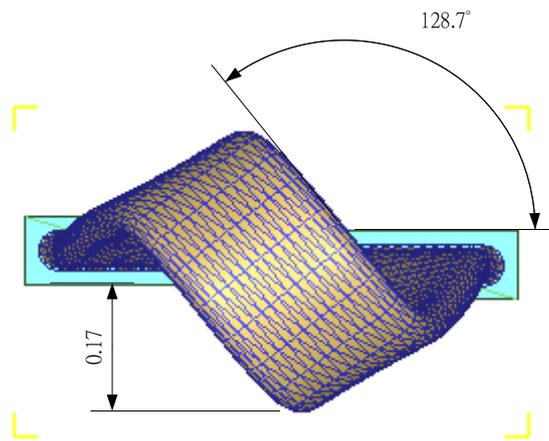


圖 3 - 39 變形帶動的扭轉角度 (長度 40mm)

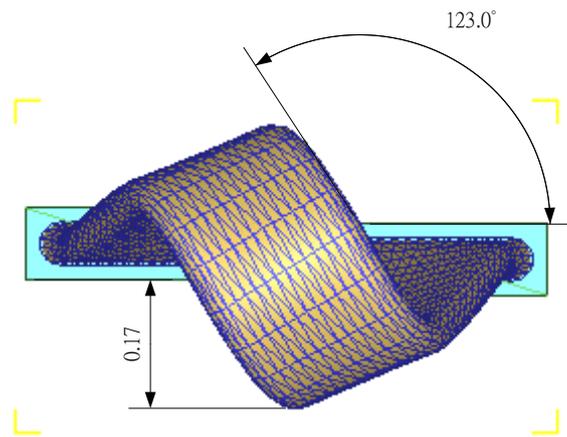


圖 3-40 變形帶動的扭轉角度（長度 45mm）



第四章 結論與未來展望

4.1 結論

本研究以有限元素法模擬 CO₂ 冷媒壓縮機蒸發器所使用之 MPE tube 在組合時之折彎與扭曲等變形過程，觀察此變形對於 MPE tube 內孔之變形是否會影響其在高壓下之作用，並且將實際依變形之 MPE tube 以線切割放電加工之方式在彎曲變形處切開，以顯微鏡觀察實際變形之情況進行比對。結果證實以所使用的 HA9108 鋁合金進行此一變形過程，無論是在模擬方面或是實際實驗上，變形之過程都不會對內孔造成明顯之變形，可以承受 400 bar 之高壓測試。

接著以同樣的模擬模型探討變形時改變「變形端長度」與「折彎曲率」兩參數對於整個變形結果的影響，分別探討應力應變之分佈，得知此二參數對於整個變形結果的影響以及趨勢。變形曲率減小時，兩端會產生較大的應變；變形端長度增加時應力應變分佈會和曲率減小相似，但是因為彎曲端之局部變形量不同而會有些許差異。此外，變形端的長度差異會影響到扭轉時帶動的扭轉角度，變形端長度增加會使角度變大，因而使得熱交換器之體積增加。

雖然在研究的過程中，無論是模擬或是實驗均未出現有內孔直徑明顯變形之情形，但是隨著變形的條件改變，此一情形依舊有可能發

生，故模擬所得之應力應變趨勢對於可做為日後改良散熱器設計或製造程序時參考之用，可節省重複改良設計與實驗所花費的大量時間。

4.2 限制因素

本研究因為著重於 MPE tube 彎曲處之變形量探討，在簡化過程中將兩端之條件簡化為固定端 (sticking)。然而此一過度拘束條件會影響整段 MPE tube 在變形時之部分變形量，因此所量測到之模擬數據與實驗所量測到之數據有一誤差量存在。由前面之結論可知，當變形之條件改變時，兩端亦可能會產生不可忽略之變形量，此時應該使用未將此處簡化之模型進行模擬，才可得到較接近於真實之模擬結果。



4.3 未來展望

本研究因為有限元素軟體之限制，無法使用更接近於真實狀況之邊界條件 (見附錄A)，故模擬之變形與真實狀況有一差距。期望能在問題得以解決之後，能夠以更接近真實情況之模型及條件進行模擬。

另外，對於未來配合自動化生產可能發展出的變形程序與製具，也期望能夠針對其進行對應之模擬來進行分析，對於製造出體積小、效率高之熱交換器能有所貢獻。

參考文獻

- [1] 呂理強，往復式壓縮機模擬軟體之冷媒模組開發與其在天然冷媒之應用，交通大學碩士論文，2007。
- [2] G. Lorentzen and J. Pettersen, “New possibilities for non-CFC refrigeration” , IIR International Symposium on Refrigeration, Energy and Environment, Trondheim, Norway, 22-24, June 1992, pp.147-163.
- [3] J. Pettersen, A. Hafner and G. Skaugen, “Development of compact heat exchangers for CO₂ air-conditioning systems” , International Journal of Refrigeration, Volume 21, Number 3, May 1998 , pp.180-193.
- [4] Frank Obrist, “Micro Channel Profile Evaporator” , http://www.r744.com/knowledge/papers/files/pdf/pdf_064.pdf
- [5] J. Pettersen, “Flow vaporization of CO₂ in microchannel tubes” , Experimental Thermal and Fluid Science, Volume 28, Issues 2-3, January 2004, pp.111-121.
- [6] United States Patent: 4087893, May. 9, 1978.
- [7] United States Patent: 4186586, Feb. 5, 1980.

- [8] United States Patent: 5186250, Feb. 16, 1993.
- [9] United States Patent: 6216343, Apr. 17, 2001.
- [10] United States Patent: 6293333, Sep. 25, 2001.
- [11] United States Patent: 4313327, Feb. 2, 1982.
- [12] United States Patent: 5567493, Oct. 22, 1996.
- [13] United States Patent Application Publication: US
2002/0121120, Sep. 5, 2002.
- [14] MPE tubes - Hydro Internet,
[http://www.hydro.com/en/Our-business/Aluminium/Products/Automot-and-transport/Automotive-products/Heat-exchanger/MP
M-tubes/](http://www.hydro.com/en/Our-business/Aluminium/Products/Automot-and-transport/Automotive-products/Heat-exchanger/MP-M-tubes/)
- [15] Hydro introduces new alloys to heat exchange market - Hydro
Internet,
[http://www.hydro.com/en/Press-room/News/Archive/2007/06/Hyd
Hy-introduces-new-alloys-to-heat-exchange-market/](http://www.hydro.com/en/Press-room/News/Archive/2007/06/Hyd-Hy-introduces-new-alloys-to-heat-exchange-market/)



附錄 A 有限元素模型之簡化過程

本研究最初之模擬流程為使用 Pro/ENGINEER Wildfire 3.0 建立 MPE tube 幾何之後，匯出 STL 檔至 DEFORM™3D Pre-Processor，利用其自動建立網格之功能建立四面體元素，並且設定模擬之邊界條件進行模擬。但是由於 DEFORM™3D 5.0 的單一物件 (object) 元素量限制最多為 20 萬個，而自動建立網格的功能中又無法針對 MPE tube 內孔的周圍指定固定數量的節點數，造成以 20 萬個元素產生出來的網格內部圓孔只有五六個邊，無法準確地判斷變形的情況。

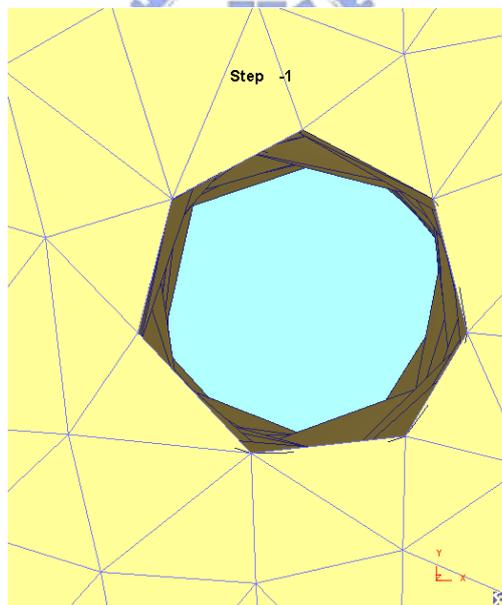


圖 A - 1 DEFORM 3D 自動產生網格之圓孔外形

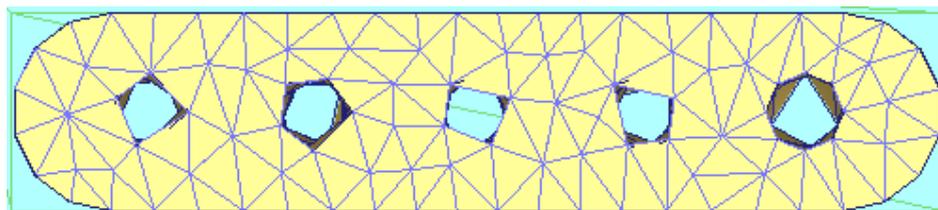


圖 A - 2 DEFORM 3D 自動產生網格之截面形狀

因此本研究改採用 HyperWorks 內之 HyperMesh 程式產生網格，利用自訂模型線段上的節點數量產生形狀較佳的網格進行模擬，整個流程改變為以 Pro/ENGINEER 匯出 IGES 檔至 HyperMesh 產生網格，再由 HyperMesh 產生 IDEAS 所使用之檔案格式給 DEFORMTM3D 使用，最後再由 DEFORMTM3D Pre-Processor 設定模擬邊界條件進行模擬。

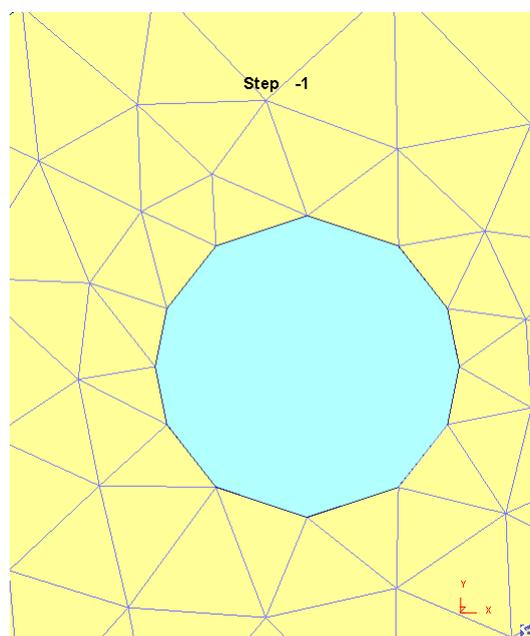


圖 A - 3 使用 HyperMesh 產生網格之圓孔外形

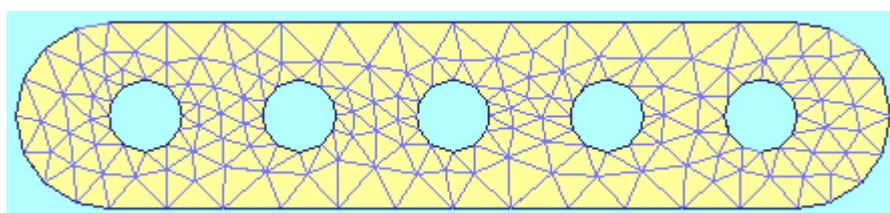


圖 A - 4 使用 HyperMesh 產生網格之截面形狀

然而前述 DEFORM 網格自動產生之問題不只出現在網格建立之時，在自動重建網格 (auto remesh) 之過程亦會因為需要產生網格而發生此一情形。

由於DEFORM™3D 5.0 無法關閉此一網格重建之功能，本研究經過多次嘗試，原本所使用之模型 (圖A-5及圖A-6) 無法在不remesh的情況下完成模擬過程，只好將兩端之固定條件加以簡化，並且縮減 MPE tube之長度 (圖A-7)。

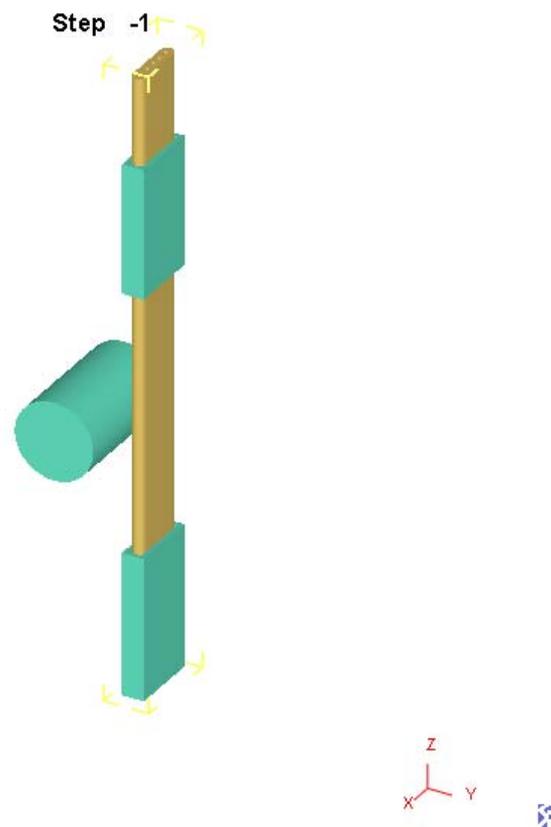


圖 A-5 原始所使用模型之一

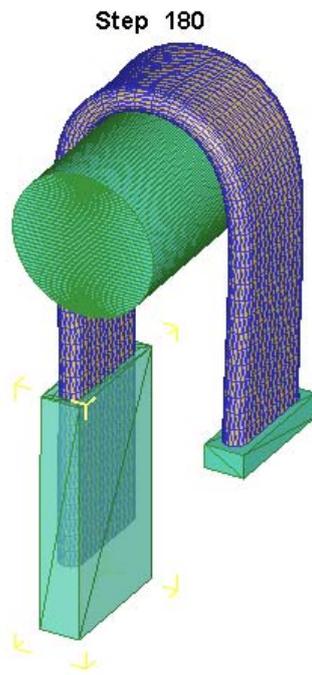


圖 A-6 原始所使用模型之二

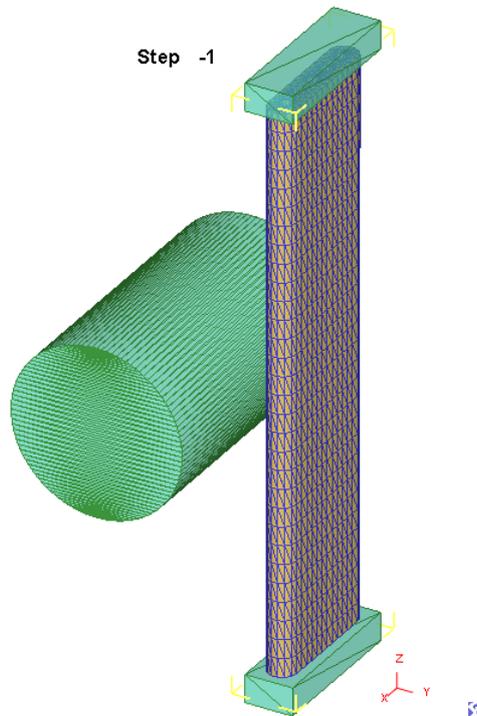
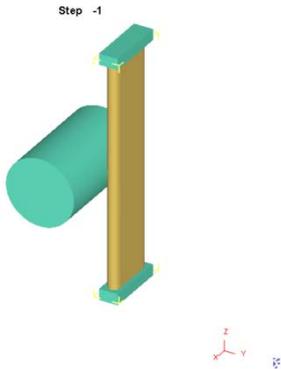
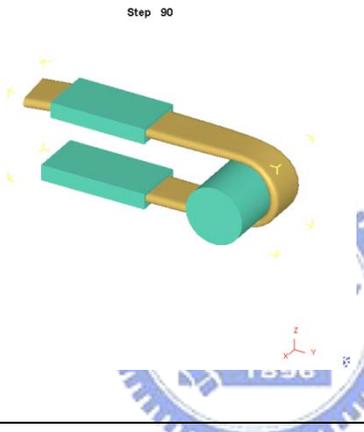
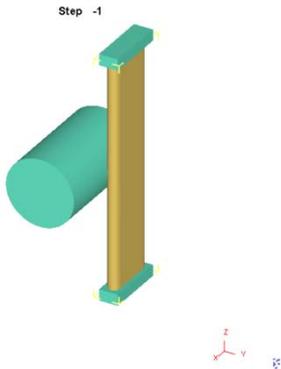
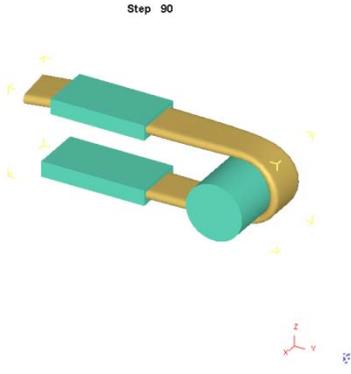
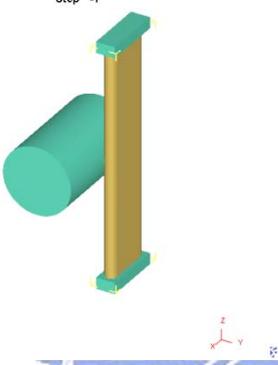


圖 A-7 簡化後模擬所使用之模型

表 A-1 模擬錯誤原因整理表

錯誤原因	模型	元素數量	備註
		24, 288	長度 30 mm
		12, 316	
remesh 後外觀 變形過多		29, 280	單孔，六面體元素，長度 70 mm
		34, 860	六面體元素，長度 70 mm
		93, 857	長度 70 mm
		81, 356	
		93, 857	僅中間部分加密， 長度 70 mm
		48, 457	
remesh 時產生 錯誤		88, 993	長度 30 mm

錯誤原因	模型	元素數量	備註
邏輯運算錯誤	 <p>Step 90</p>	13,951	單孔，長度 70 mm
	 <p>Step -1</p>	7,986	長度 20
		11,770	圓棒直徑 < 4 mm

