

國立交通大學

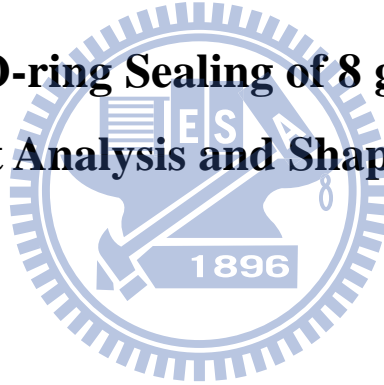
機械工程學系

碩士論文

八克高壓鋼瓶 O-ring 封口之有限元素分析與尺

寸最佳化

**Improving the O-ring Sealing of 8 gram Charger by  
Finite Element Analysis and Shape Optimization**



研究生：蔡正一

指導教授：洪景華 教授

中華民國 九十九 年 六 月

八克高壓鋼瓶 O-ring 封口之有限元素分析與尺寸最佳化

**Improving the O-ring Sealing of 8 gram Charger by  
Finite Element Analysis and Shape Optimization**

研究生：蔡正一

Student : Cheng-Yi Tsai

指導教授：洪景華

Advisor : Ching-Hua Hung

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



A Thesis  
Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
1896  
in partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of  
Master  
in  
Mechanical Engineering

Jun. 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十九年六月

# 八克高壓鋼瓶 O-ring 封口之有限元素分析與尺寸最佳化

研究生：蔡正一

指導教授：洪景華 教授

國立交通大學機械工程學系

## 摘要

高壓氣體鋼瓶廣泛運用在各種場合，最常見的是餐飲店的奶油發泡器，其他如蘇打水製造器、漆彈槍等也是其應用的範圍。目前業界在高壓氣體鋼瓶封口的製程是以一道次衝壓封口成形。本研究利用有限元素分析軟體 ABAQUS/Standard，以 2-D 軸對稱模型，模擬改變各元件尺寸參數所造成的影響。由模擬及實驗的分析結果看來，o-ring 墊圈所承受的接觸應力對封口有關鍵性的影響，而接觸應力不只是最大值越大越好，接觸到的面積越多、整體的應力分布越平均，封口的效果越佳，因此這三項因素成為本模擬評比的標準。最後再應用最佳化軟體 SmartDO 改良沖頭外型，再經實驗確認後，確可改善高壓氣體鋼瓶的密封性。

關鍵字：衝壓、密封、接觸應力、有限元素、最佳化

# **Improving the O-ring Sealing of 8 gram Charger by Finite Element Analysis and Shape Optimization**

Student: Cheng-Yi Tsai

Advisors: Dr. Ching-Hua Hung

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

## **Abstract**

$N_2O$  charger are widely used in many kinds of application, the most common one is cream charger used in restaurant, other applications can be found with soda siphon and paintball gun. For the present, the sealing of charger head is based on one-pass stamping forming. In this research, the finite element software ABAQUS/Standard with 2-D axisymmetric model was adopted to analyze the size influence of sealing elements. From preliminary results of the analysis both numerically and experimentally, the contact of the o-ring gasket with the charger head was found to have a crucial impact for sealing effect. Not only the maximum contact stress but also the size of the contact area and the uniformity of the contact stress distribution will dominate the effectness of sealing. So this three factors will be chosen as the standard criteria for choosing suitable sealing parameters by finite element simulation. Finally the optimization software SmartDO was adopted to design the last punch shape. A verification experiment was conducted and the consistency with respect to the optimization result revealed the usefulness of this research.

**Keyword** : stamping, sealing, contact stress, finite element, optimization

## 誌謝

兩年的時間過很快，還記得大四剛推甄上研究所，因為對電腦設計很有興趣，因此找了系上的洪景華教授來當我的指導教授。非常感謝洪老師在這兩年對我的指導，不只在專業上，在邏輯思考以及做人處事，都讓我學受益良多；剛開始進實驗室還覺得學長們都有點冷漠，有人敲門進來大家都在專心用電腦，後來發現其實學長們其實人都不錯：宇中學長管理實驗室的秩序、麒禎學長絕不吝於回答學弟妹的問題、志嘉學長不時噓寒問暖、看彥彬學長打電動放鬆、默默看小說漫畫的銘傑學長、對攝影很有研究的正展學長、對模擬很有想法的煌綦學長、對車很有研究的志傑學長，感謝你們的指導；以及同學：嘴砲無敵立釗、愛看搞笑宗錚、跆拳道超威筱瑋，感謝你們，讓我研究路上不孤單；以及學弟雅喬、書麟、馨勻、振傑，幫實驗室處理很多雜務。另外特別感謝我的好朋友育誠，一起遊山玩水讓研究生的生活也能不一樣，感謝我的女朋友鑒慧陪我一起走過這一段碩士生涯。未來也希望能應用在這裡的所學，盡力貢獻於社會。

# 目錄

摘要.....	iii
Abstract.....	iv
誌謝.....	v
目錄.....	vi
圖目錄.....	x
表目錄.....	xiii
第一章 緒論.....	1
1.1 簡介.....	1
1.2 沖壓封口成形.....	3
1.3 文獻回顧.....	6
1.4 研究動機與目的.....	9
1.5 研究方法.....	10
1.6 論文架構.....	11
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 實驗方法與結果.....	12

2.2	硬度試驗 .....	15
2.2.1	試驗目的 .....	15
2.2.2	試驗方法與結果 .....	15
2.3	其餘元件材料性質 .....	18
2.3.1	金屬封片 .....	19
2.3.2	橡膠 o-ring 墊圈 .....	19
第三章	有限元素及最佳化分析 .....	22
3.1	有限元素分析系統 .....	22
3.2	軟體介紹—ABAQUS .....	25
3.3	有限元素模型之基本假設 .....	26
3.4	建立模型 .....	27
3.4.1	建立元件幾何外型 .....	27
3.4.2	材料性質設定 .....	30
3.4.3	分析步驟與邊界條件設定 .....	30
3.4.4	接觸設定 .....	31
3.4.5	網格劃分設定 .....	33
3.4.6	後處理 .....	34

3.5	最佳化分析系統 .....	35
3.6	軟體介紹—SmartDO .....	36
第四章 鋼瓶封口模擬與實驗 .....		39
4.1	初步有限元素模擬與實驗 .....	41
4.1.1	改變鋼瓶口高度的模擬 .....	41
4.1.2	改變鋼瓶口高度的實驗 .....	43
4.1.3	改變鋼瓶口內徑的模擬 .....	44
4.1.4	改變鋼瓶口內徑的實驗 .....	46
4.1.5	改變 o-ring 墊圈高度的模擬 .....	46
4.1.6	改變 o-ring 墊圈高度的實驗 .....	48
4.1.7	改變 o-ring 墊圈厚度的模擬 .....	49
4.1.8	改變 o-ring 墊圈厚度與硬度的實驗 .....	50
4.2	接觸應力與密封性的關係 .....	51
4.3	沖頭外型最佳化 .....	55
4.3.1	沖頭外型最佳化的模擬 .....	55
4.3.2	沖頭外型最佳化的實驗 .....	66
4.4	鋼瓶內壓的模擬 .....	67



第五章 結論及後續工作 .....	75
5.1 結論 .....	75
5.2 後續工作 .....	77
參考文獻.....	79
附錄 A 連接 SmartDO 和 ABAQUS/Standard 的程式碼 .....	81
附錄 B SmartDO 的其他程式碼 .....	84
目標函數 .....	84
限制條件 .....	84
變數資料檔案(初始值&上下界).....	87
附錄 C 改變金屬封片尺寸的模擬與實驗.....	88
附錄 D 改變 o-ring 墊圈硬度的模擬.....	91

## 圖目錄

圖 1.1 蘇打水製造器[15].....	2
圖 1.2 奶油發泡器[15].....	2
圖 1.3 8g N <sub>2</sub> O 高壓氣體鋼瓶[15].....	2
圖 1.4 封口結構示意圖[15].....	3
圖 1.5 各元件示意圖[15].....	3
圖 1.6 五道次沖壓縮口機台[15].....	4
圖 1.7 鋼瓶製造流程.....	5
圖 1.8 衝壓封口示意圖.....	6
圖 1.9 鋼瓶封口前後對照圖[15].....	6
圖 1.10 漏氣率隨著封片壓應力增加而減少[1].....	7
圖 1.11 漏氣率隨著墊片表面粗糙度增加而增加[5].....	8
圖 2.1 MTS-810 拉伸試驗機.....	13
圖 2.2 拉伸試驗試片尺寸圖.....	13
圖 2.3 JIS SPCF 鋼材真實應力/真實應變曲線.....	15
圖 2.4 MATSUZAWA DXT-3 洛氏硬度機.....	16
圖 2.5 夾具和固定試片方式.....	16
圖 2.6 四種材料試片外觀.....	17
圖 2.7 鋼瓶上任一條線之量測點.....	17

圖 2.8 原始鋼材硬度實驗位置示意圖.....	18
圖 2.9 金屬封片之擬合真實應力-應變曲線.....	19
圖 3.1 有限元素軟體之分析流程圖[11].....	23
圖 3.2 沖頭尺寸圖(單位：mm).....	27
圖 3.3 高壓鋼瓶尺寸圖(單位：mm).....	28
圖 3.4 金屬封片尺寸圖(單位：mm).....	28
圖 3.5 橡膠 o-ring 墊圈尺寸圖(單位：mm).....	29
圖 3.6 完整高壓鋼瓶封口組裝圖(未沖壓封口前).....	29
圖 3.7 分析步驟流程.....	31
圖 3.8 鋼瓶與金屬封片、與沖頭的庫倫摩擦係數位置設定.....	32
圖 3.9 鋼瓶與 o-ring 墊圈接觸的庫倫摩擦係數位置設定.....	33
圖 3.10 有限元素網格模型.....	34
圖 3.11 最佳化設計基本原理[8].....	36
圖 3.12 SmartDO 最佳化分析架構[8].....	38
圖 3.13 SmartDO 最佳化分析流程[8].....	38
圖 4.1 製程參數設定位置.....	40
圖 4.2 泡水實驗示意圖.....	41
圖 4.3 不同鋼瓶口高度接觸應力圖.....	42
圖 4.4 不同鋼瓶口內徑接觸應力圖.....	45

圖 4.5 不同 o-ring 墊圈高度接觸應力圖 .....	47
圖 4.6 不同 o-ring 墊圈厚度接觸應力圖 .....	49
圖 4.7 漏氣率與接觸應力關係.....	54
圖 4.8 沖頭細部尺寸圖 .....	55
圖 4.9 固定尺寸參數 I 沖頭最佳化結果 .....	62
圖 4.10 固定尺寸參數 I 最佳化前後結果接觸應力圖 .....	62
圖 4.11 固定尺寸參數 II 沖頭最佳化結果 .....	63
圖 4.12 固定尺寸參數 II 最佳化前後結果接觸應力圖 .....	64
圖 4.13 固定尺寸參數 III 沖頭最佳化結果.....	65
圖 4.14 固定尺寸參數 III 最佳化前後結果接觸應力圖 .....	65
圖 4.15 施加 o-ring 墊圈縫隙均部內壓.....	68
圖 4.16 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(1).....	68
圖 4.17 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(2).....	69
圖 4.18 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(3).....	70
圖 4.19 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(4).....	70
圖 4.20 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(5).....	71
圖 4.21 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(6).....	72
圖 4.22 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(7).....	73
圖 4.23 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(8).....	73

## 表目錄

表 2.1 退火熱處理前的鋼瓶硬度.....	18
表 2.2 退火熱處理後的鋼瓶硬度.....	18
表 3.1 模擬中所定義的材料性質.....	30
表 4.1 製程參數設定.....	40
表 4.2 鋼瓶口高度對 o-ring 墊圈接觸應力數據表.....	43
表 4.3 鋼瓶瓶口高度實驗.....	44
表 4.4 鋼瓶口內徑對 o-ring 墊圈接觸應力.....	45
表 4.5 瓶口內徑實驗泡水時間：3 天.....	46
表 4.6 o-ring 墊圈高度對接觸應力.....	48
表 4.7 o-ring 墊圈高度實驗.....	48
表 4.8 o-ring 墊圈厚度對接觸應力.....	50
表 4.9 實驗的 o-ring 墊圈厚度與硬度.....	50
表 4.10 o-ring 墊圈實驗第一組泡水時間：5 天.....	51
表 4.11 o-ring 墊圈實驗第二組泡水時間：4 天.....	51
表 4.12 o-ring 墊圈實驗 D2、E2 泡水時間：7 天.....	51
表 4.13 漏氣率與接觸應力之實驗數據(合格 13 組).....	52
表 4.14 漏氣率與接觸應力之實驗數據(不合格 24 組).....	53
表 4.15 改變沖頭尺寸(1)的接觸應力圖.....	56

表 4.16 改變沖頭尺寸(2)的接觸應力圖 .....	57
表 4.17 改變沖頭尺寸(3)的接觸應力圖 .....	58
表 4.18 改變沖頭尺寸(4)的接觸應力圖 .....	59
表 4.19 最佳化所選定之三組固定尺寸參數.....	61
表 4.20 固定尺寸參數 I 最佳化前後應力狀態 .....	63
表 4.21 固定尺寸參數 II 最佳化前後應力狀態 .....	64
表 4.22 固定尺寸參數 III 最佳化前後應力狀態.....	65
表 4.23 舊版沖頭對三組尺寸之漏氣量測定.....	66
表 4.24 新版沖頭對三組尺寸之漏氣量測定.....	66
表 4.25 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(1).....	68
表 4.26 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(2).....	69
表 4.27 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(3).....	69
表 4.28 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(4).....	70
表 4.29 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(5).....	71
表 4.30 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(6).....	72
表 4.31 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(7).....	72
表 4.32 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(8).....	73

# 第一章 緒論

## 1.1 簡介

高壓氣體鋼瓶在工業和民生用品上有相當廣泛的應用，依照不同的需求設計出不同容量、不同氣壓等級的鋼瓶，常見的應用如汽車安全氣囊高壓鋼瓶、隨身氧氣瓶、充氣槍、奶油發泡器、蘇打水製造器（圖 1.1、圖 1.2）等所需的高壓鋼瓶，而本研究的對象，則是用於奶油發泡器的 8g 小鋼瓶(如圖 1.3)。此鋼瓶由 100% 可回收的鋼鐵製成，裡面充填  $N_2O$  高壓氣體。 $N_2O$  是無色無味的氣體，溶於水中稍帶甜味，現今廣泛的被使用在食品工業。一支標準的(8g 重的  $N_2O$ )高壓氣體鋼瓶可以打發泡 0.5L 的奶油，但若其密封效果不佳，很容易因為置放過久而漏氣，造成無法打出適量的奶油。

目前業界高壓氣體鋼瓶封口的製程是以一道次沖壓封口成形，又因  $N_2O$  氣體於高溫下有爆炸之危險，故於室溫下進行沖壓封口。封口的結構如圖 1.4 所示，將金屬封片和橡膠 o-ring 墊圈放置於鋼瓶口，再用沖頭沖壓使鋼瓶口的壁面彎曲成形，以貼合橡膠 o-ring 墊圈並迫使其變形以填滿鋼瓶口。目前的高壓鋼瓶所存在的問題為長久置放會有氣壓不足的情況發生，原因是鋼瓶口的密封性不足，因此會有連續的微量氣體洩漏。



圖 1.1 蘇打水製造器[15]



圖 1.2 奶油發泡器[15]



圖 1.3 8g N<sub>2</sub>O 高壓氣體鋼瓶[15]



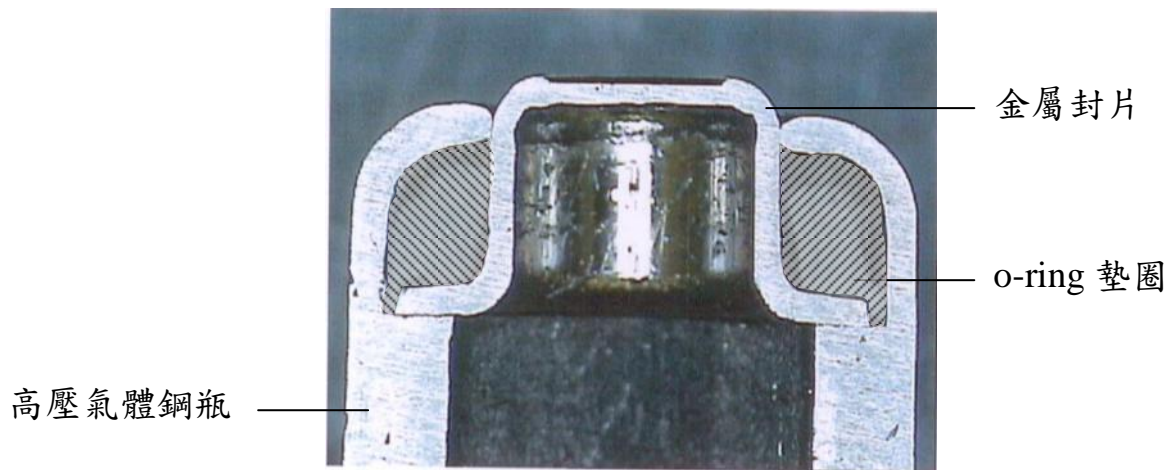


圖 1.4 封口結構示意圖[15]



圖 1.5 各元件示意圖[15]

## 1.2 沖壓封口成形

沖壓成型是使用沖壓模具及設備將金屬材料施以負荷，使材料產生永久變形，以達到所要求的外型形狀和尺寸精度。本研究中的高壓鋼瓶，首先將鋼板圓板胚料引伸成型，分別以五道次沖頭做衝壓縮口成型(圖 1.6)，縮口過程中針對瓶口做高週波熱處理以免縮口過程中產生破壞，縮口完成後將瓶口車削、瓶身電鍍處理後，即完成鋼瓶的製作，接著就是將鋼瓶放入充填氣體的機台中，依次置入金屬封片和 o-ring 墊圈，在充填氣體之同時加壓封口，完成高壓氣體鋼瓶的製

作(圖 1.7)。封口採用成型加工中的封口彎曲加工，使用單一尺寸的沖頭，對鋼瓶口做一道次的沖壓，使瓶口壁面彎曲密封(圖 1.8)，以讓 o-ring 墊圈能與瓶身壁面及封片貼合，沖壓完成後的結果如圖 1.9 所示。受封口彎曲之材料具局部性應力，在彎曲半徑外側材料受拉應力而伸長，在彎曲半徑內側材料受壓縮應力而擠壓，而彎曲半徑又受到材料性質、厚度、寬度、加工方法及施力方式所影響，不同的彎曲半徑導致不同的應力分布，進而影響到鋼瓶封口的能力，而瓶口彎曲壓迫 o-ring 墊圈的壓應力大小及其分布情形正是本研究所要關注的重點，所以這些相關的因素都是本研究列入考慮的主題。



圖 1.6 五道次沖壓縮口機台[15]

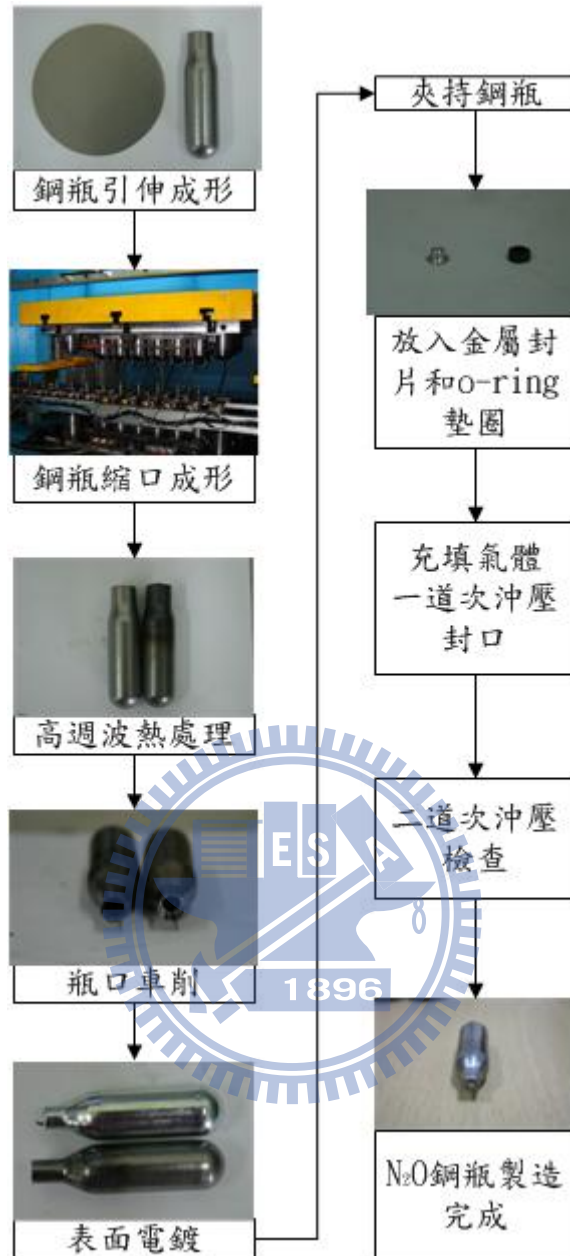


圖 1.7 鋼瓶製造流程

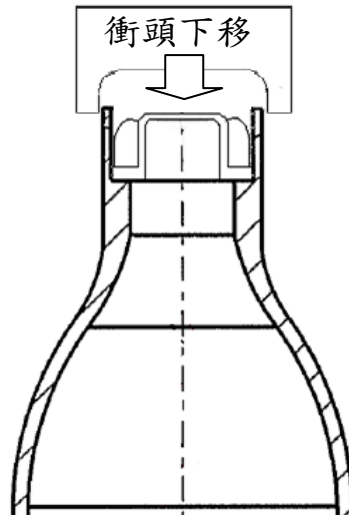


圖 1.8 衝壓封口示意圖

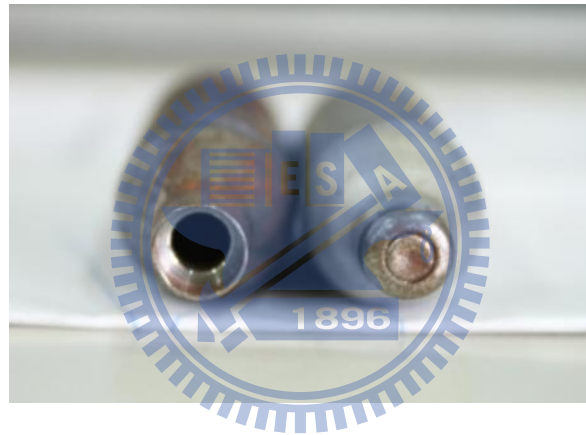


圖 1.9 鋼瓶封口前後對照圖[15]

### 1.3 文獻回顧

與密封性相關的工程因素，經相關文獻上的搜尋，可分為三大類：墊片與瓶口接觸應力的大小、墊片與瓶口接觸面積的多寡以及墊片接觸應力的平均程度。在密封性與接觸應力關聯性的部分，1999 年 Dave [1]實驗指出，墊片之壓應力越大，漏氣量越低（如圖 1.10），所以壓

應力是關鍵性的因素，而增加墊片壓應力的方法，包含增加初始壓應力、設計墊片外型使壓應力更高、使用較好的材料等。2003 年 Champlaud[2] 等人應用有限元素分析軟體 ANSYS 模擬分析瓶蓋封口衝程，計算在不同的內壓作用下 (100KPa~1400KPa)，所對應作用於瓶蓋上的壓應力，再於不同的內壓下實驗，探討需要多少的外力才不會漏氣；將模擬與實驗結果整理並做在同一組圖表中比較，便可以預測在不同的內壓下，至少需要作用在瓶蓋上的壓應力值，才不會導致漏氣。2007 年 GU[3] 等人運用理論分析和實驗，提出墊片所需的壓應力，應使漏氣率能控制在最大容許量的標準以內，並指出此關係與內壓、墊片尺寸及表面粗糙度也有關係，其研究中的實驗也驗證了理論趨勢，亦即增加封片的壓應力，可使漏氣率降低。

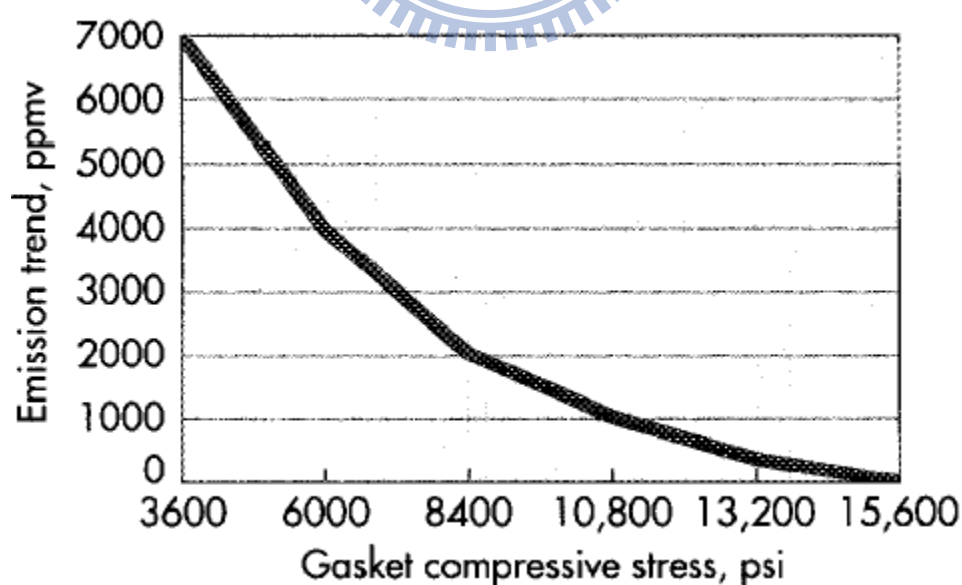


圖 1.10 漏氣率隨著封片壓應力增加而減少[1]

在密封性與接觸面積及應力平均程度的相關性方面，

MATSUZAKI [4]等人實驗指出，墊片的粗糙度越高，需要越大的壓應力，才能相對降低漏氣量，因為越大的壓應力可以造成更大的變形，在微觀下可以填滿更多凹凸不平的粗糙表面，增加其密封性。因此許[5]等人以金屬墊片的等效塑性應變，做為面粗度與決定洩漏量的因素，其原因也是因為壓應力越高，應變值會越高，所增加的接觸面積越多，越能夠填滿凹凸不平整的表面（如圖1.11）。其模擬部分以CAE軟體ABAQUS做有限元素分析，並搭配不同組面粗度的實驗，印證洩漏量隨墊片塑性應變值的增加而減少。Arghavani[6]等人以不同材質、不同面粗度的墊片實驗，並比較這些墊片的壓應力，發現壓應力越高，漏氣率越可以降低；且進一步比較同一組材料，不同種表面粗度的應力分佈，結果也顯示，墊片表面越平滑，應力分佈越平均，其密封的程度也越好。

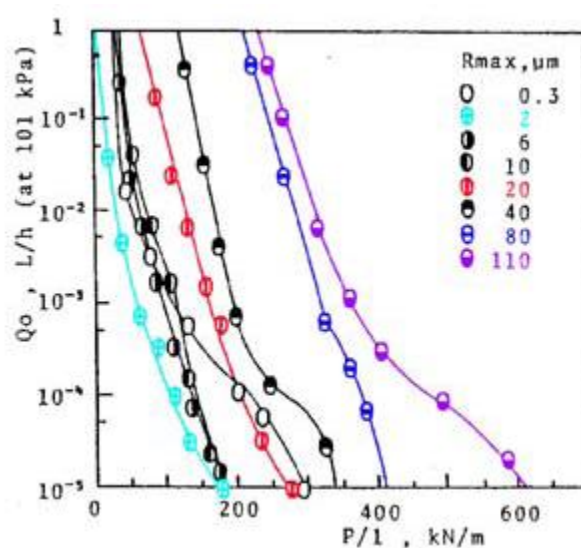


圖 1.11 漏氣率隨著墊片表面粗糙度增加而增加[5]

由文獻回顧可以看出目前的研究主要是針對金屬與非金屬墊片之密封性作探討，其主要決定密封性的因素有：(1) 壓應力大小 (2) 接觸面積大小 (3) 應力分布平均程度，其他因素如墊片材料、氣體壓力以及墊片表面粗糙度也有影響；但在本研究中，由於金屬墊片非主要密封元件，o-ring 墊圈才是主要的密封元件，所以本研究將探討在文獻中決定密封性的因素是否同樣也能用於 o-ring 墊圈上，並進一步運用主要決定密封性的三個因素找到較佳的密封組合。

#### 1.4 研究動機與目的

本研究中的 N<sub>2</sub>O 高壓氣體鋼瓶，在長時間的放置之下會產生漏氣量過多的情形，其根本原因就是因為密封性不足，因此為了解決高壓氣體鋼瓶的漏氣問題，增加其密封性，本研究將應用有限元素模擬與實驗驗證，期許能找到數組尺寸組合使漏氣量降至標準內，並進一步能夠找出各種應力參數與密封性的關係，最後希望能夠藉由最佳化模擬改進沖頭外型，使密封性更佳。

本研究中的 N<sub>2</sub>O 高壓氣體鋼瓶最主要用來密封的元件是 o-ring 墊圈，因此若能針對 o-ring 墊圈的受力情形和變形情形做分析，便可以對相關之變數進行探討與改良，提升鋼瓶之密封性。

從文獻回顧可知目前並沒有找到針對使用橡膠材料的 o-ring 墊圈作為主要的封口元件的研究，而本研究是以 o-ring 墊圈做為主要的

密封元件，各文獻中也僅針對一至二項因素作探討；因此為求完整之分析性，本研究將採取三項因素：(1) o-ring 墊圈的接觸應力大小 (2) o-ring 墊圈的接觸面積大小 (3) o-ring 墊圈接觸應力分布的標準差值，來探討是否能夠做為判斷高壓鋼瓶密封性的標準。並利用有限元素分析軟體，模擬分析封口成型，再輸出接觸應力資料，針對此三項因素作後續的計算與改善的評估基準，再搭配實驗驗證，期許能建立一模型理論，能夠有效的預測以及提升高壓鋼瓶之密封性。

## 1.5 研究方法

本研究將以製造鋼瓶的材料 JIS SPCF 鋼材進行封口成型之有限元素分析，藉由改變鋼瓶和 o-ring 墊圈的尺寸，並配合實驗以驗證是否能夠確實達到密封的效果。

首先將由材料試驗取得鋼材之機械性質，然後搭配有限元素軟體 ABAQUS/Standard 模擬分析鋼瓶之封口製程，並改變數組尺寸，藉由上述三項因素之標準，選出密封性較佳的尺寸搭配，交由廠商做試驗，先從初期的實驗與模擬的比較中，確認選擇之封口性因素的可靠性。

接下來藉由調整高壓鋼瓶口的高度和內徑，以及 o-ring 墊圈的高度和厚度，以了解在不同尺寸下，o-ring 墊圈所承受的接觸應力情形。配合了上述已驗證的封口性因素標準可找出數組密封性較佳的尺寸



參數交由廠商做實驗，增加高壓鋼瓶的品質與密封性；最後再運用最佳化軟體 SmartDO 將沖頭外型進行最佳化設計，並且開模實驗驗證最佳化沖頭對鋼瓶密封性的影響。

## 1.6 論文架構

本論文第一章為研究動機及文獻回顧。第二章詳述材料試驗之方法與結果。第三章將介紹所使用的有限元素軟體與最佳化軟體，把模擬的設定與分析流程做呈現。第四章先模擬改變各元件尺寸對 o-ring 墊圈接觸應力的影響，並搭配初步實驗結果驗證接觸應力與密封性之關連；接下來模擬各種元件尺寸組合，並挑出數組不同的尺寸組合做實驗，以找出 o-ring 接觸應力與密封性的關係，進一步可運用模擬找出漏氣標準內以及密封性較佳的尺寸組合；最後應用 o-ring 接觸應力與密封性的關係給定最佳化條件之設定，進行沖頭最佳化的模擬與實驗。第五章為結論與後續進行工作。

## 第二章 材料性質與試驗

### 2.1 拉伸試驗

在模擬分析鋼瓶封口成形前，首先需要針對鋼材之機械性質進行實驗，於後續的模擬中，才能輸入相關的正確材料參數（真實應力/真實應變曲線），使模擬結果更準確。

#### 2.1.1 試驗目的

為求模擬分析與實驗真實條件的共同性，本研究將先針對 JIS SPCF 原始鋼材進行拉伸試驗以取得其基本機械性質。本試驗中所使用之 JIS SPCF 鋼材為完全未經加工的母材，因為在後續的多道次縮口及封口鋼瓶皆已成形完成，無法再切割出拉伸試片，因此將進行硬度試驗，以探討各階段製程之材料硬化情形。

#### 2.1.2 實驗方法與結果

本研究之拉伸試驗係採用本系複合材料結構實驗室之 MTS-810 萬能拉伸試驗機（圖 2.1），並在試片兩面貼上應變規（strain gage）以量測其應變。實驗所用之應變規為惠達公司（VisHay）所生產之一般常溫型單軸拉伸應變規 EP-08-125BT-120。



圖 2.1 MTS-810 拉伸試驗機

拉伸試驗之試片尺寸由ASTM-E8之拉伸試驗規範決定[10]，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，真實拉伸試片尺寸如圖2.2所示。本實驗將在常溫下進行，並設定拉伸速率為0.1mm/s進行實驗，設定擷取器之擷取速率為10times/s以紀錄拉伸試驗機上荷重元（load cell）所量測之荷重值及應變規之應變值，藉此取得材料的機械性質。

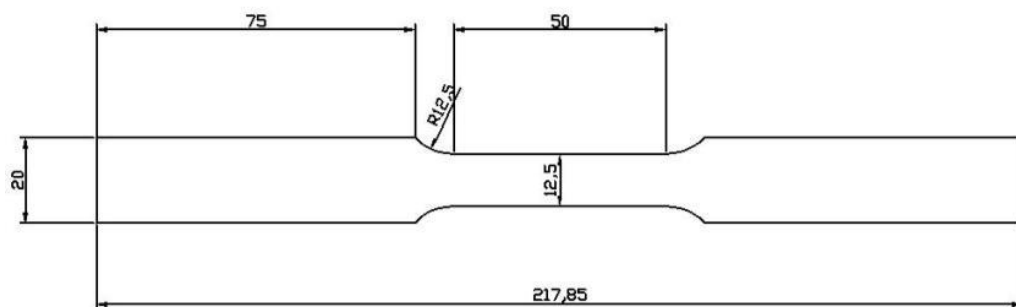


圖 2.2 拉伸試驗試片尺寸圖（單位：mm，厚度：1.3mm）

一般經由拉伸試驗機量測取得之應力為工程應力、應變規取得之應變為真實應變，然而在有限元素模擬之中所需要者為真實應力/真實應變，可藉由下式換算得到。

$$\sigma_T = \frac{F}{A}(1+e) \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_T = \ln(1+e) \quad (2.2)$$

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 ( $\text{mm}^2$ )、 $e$ ：工程應變

彈性係數  $E$  是在真實應力/真實應變曲線上取其應變值小於 0.2% 之範圍進行迴歸分析所取得。而塑性區性質則是利用一指數定律 (如下式所示) 趨近，以在模擬分析中表現材料之真實性質。

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

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

圖 2.3 為拉伸試驗所求得之 JIS SPCF 鋼材真實應力/真實應變曲線，在經過多次實驗後才取得一兩組較一致的數據，將在後續輸入進模擬分析的材料庫中使用。

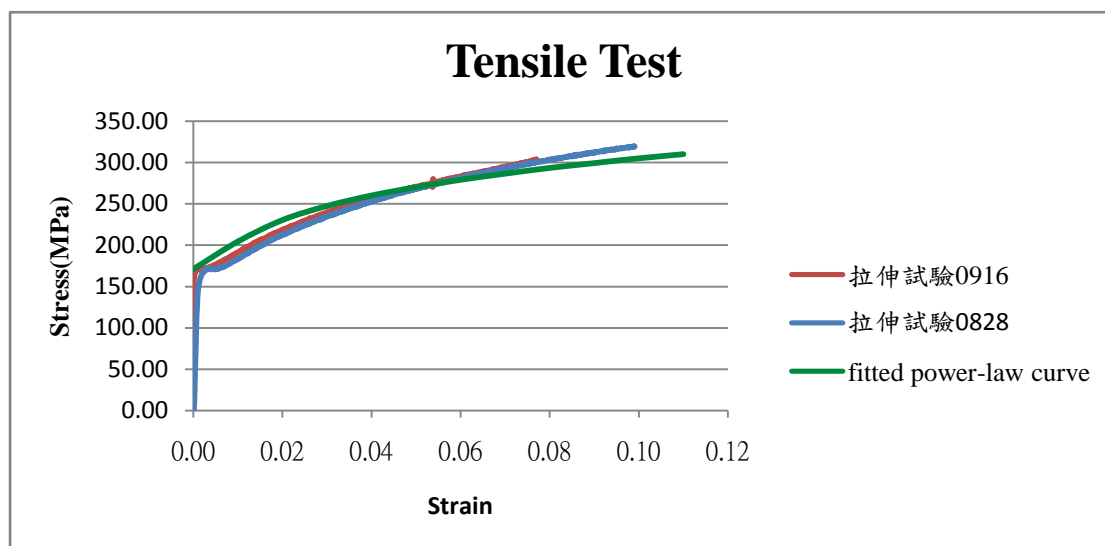


圖 2.3 JIS SPCF 鋼材真實應力/真實應變曲線

## 2.2 硬度試驗

### 2.2.1 試驗目的

從原始鋼材、經歷引伸成型、到五道次沖壓縮口的鋼瓶，為了確保在縮口和封口加工時不會造成鋼瓶的破損發生，因此在縮口製程之中加入高週波熱處理。為了驗證熱處理後的鋼瓶材質已恢復至類似原始鋼材的性質，研究中分別選取（1）引伸成型前的原始鋼材（2）熱處理前鋼瓶（3）熱處理後鋼瓶（4）縮口完成鋼瓶，進行硬度試驗的量測，若熱處理後的鋼瓶，其硬度量測結果接近原始鋼材的硬度，後續模擬的材料參數即可合理使用原始鋼材拉伸試驗的結果。

### 2.2.2 試驗方法與結果

本研究所使用之硬度試驗機係採用本系之 MATSUZAWA DXT-3

洛氏硬度機（圖 2.4），硬度測試之級別為 HRB 壓痕硬度（100 公斤載荷和直徑 1.58mm 淬硬的鋼球），由壓入材料的深度計算材料的硬度；所用來固定試片之夾具為機械工廠之鑽床夾具（圖 2.5）；四種材料試片如圖 2.6 所示，由左到右分別為：（1）原始鋼材（2）熱處理前鋼瓶（3）熱處理後鋼瓶（4）縮口完成鋼瓶。



圖 2.4 MATSUZAWA DXT-3 洛氏硬度機



圖 2.5 夾具和固定試片方式

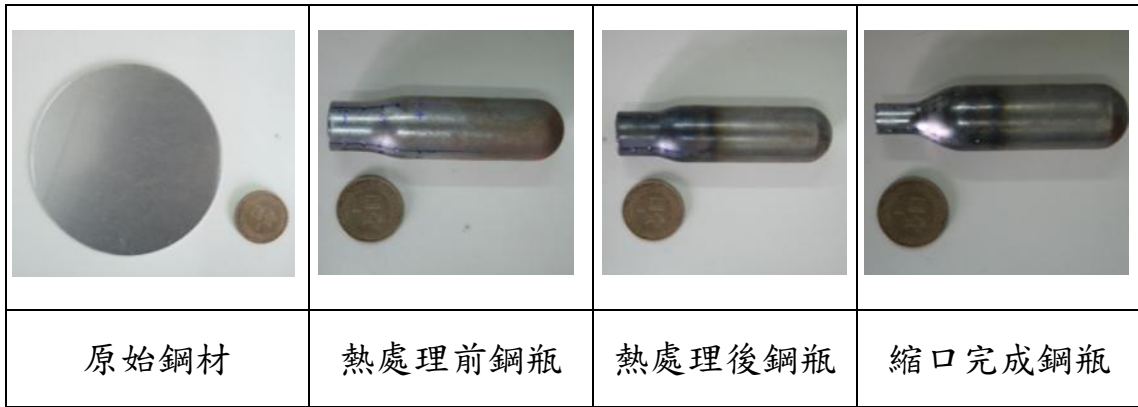


圖 2.6 四種材料試片外觀

量測點的選擇，是沿著鋼瓶的軸向方向，先在鋼瓶表面任意劃一條直線，從距離瓶底 4cm 開始，每隔 0.5cm 有一個量測點，一條線上一共有 5 個量測點（圖 2.7），而鋼瓶以軸向為旋轉軸，每旋轉 90 度便再畫另一條直線，方向平行於鋼瓶的軸向，所以一個鋼瓶共有 4 條線，20 組量測點，最後取平均的結果如表 2.1 至表 2.2 所示。



圖 2.7 鋼瓶上任一條線之量測點

原始鋼材半徑 3.5cm，取圓心以及圓心上下左右四點各距離圓心 2cm 做硬度實驗(如圖 2.8)，其平均硬度為：27.2

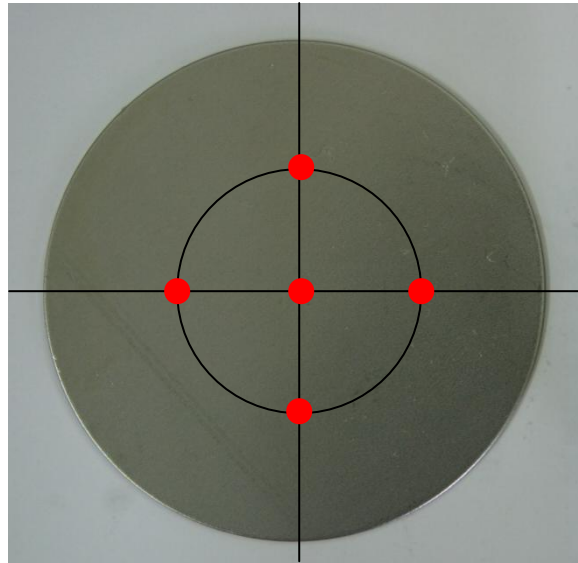


圖 2.8 原始鋼材硬度實驗位置示意圖

表 2.1 退火熱處理前的鋼瓶硬度

與瓶底距離 (cm)	4	4.5	5	5.5	6
HRB	23.28	34.7	35.4	36.38	51.05

表 2.2 退火熱處理後的鋼瓶硬度

與瓶底距離 (cm)	4	4.5	5	5.5	6
HRB	25.18	29.53	33.6	22.2	28

由實驗數據可知，退火熱處理後的鋼瓶硬度，與原始鋼材的硬度相當接近，都在實驗誤差可容許的範圍以內。因此在後續模擬所需要輸入的材料參數，將採用原始材料拉伸試驗所得到的結果進行後續分析。

## 2.3 其餘元件材料性質

除了鋼瓶本體的材料可取得試片做材料實驗之外，其餘的元件如金屬封片以及橡膠 o-ring 墊圈，皆無法取得試片做機械性質的實驗，



因此在金屬封片方面，藉由廠商所提供之楊氏模數、降服強度以及抗拉強度，再由指數定律（power law）（式 2.3）趨近金屬封片之真實應力-應變曲線。在橡膠 o-ring 墊圈部分，則是使用食品級 NBR80-85A 橡膠，其硬度性質參考文獻之實驗數據，再轉換為模擬之數學式輸入參數模擬此材料之變形與受力行為，細節部分請見下面之討論。

### 2.3.1 金屬封片

鋼瓶密封用的金屬封片為 JIS SPCC 鋼材，廠商提供之降伏強度：342MPa，抗拉強度：408MPa，楊氏係數：200GPa，應用指數定律（power law）（式 2.3）所擬合塑性階段之真實應力-應變曲線如圖 2.9 所示。

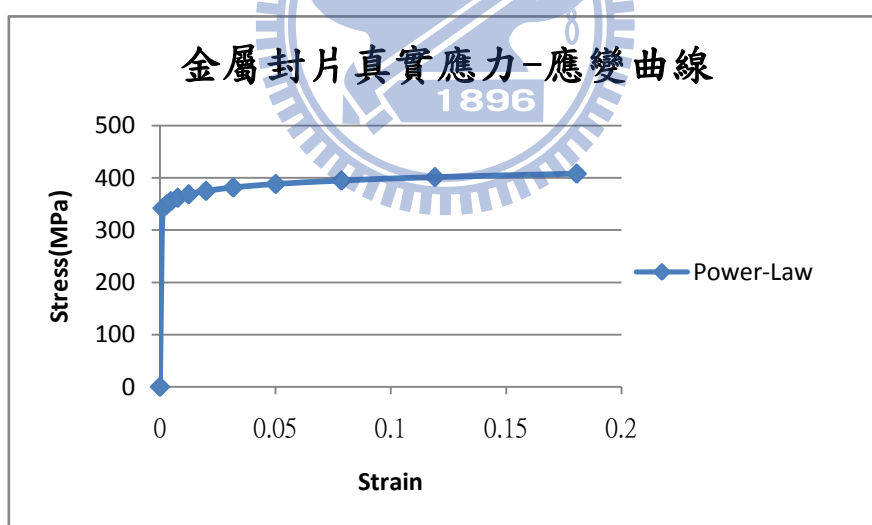


圖 2.9 金屬封片之擬合真實應力-應變曲線

### 2.3.2 橡膠 o-ring 墊圈

關於橡膠的硬度單位，目前最常用的有兩種，一種是國際硬度單位（IRHD），另一種是邵氏硬度單位（HA）。邵氏硬度計又分 A（軟

質)、C (半硬)、D (硬質) 三級，每一級皆是由 0 度 (最軟) ~100 度 (最硬) 。本研究所用之食品級 NBR80-85A 橡膠，屬於邵氏硬度 A 級 (軟質) 80-85 度之間。

在有限元素軟體 ABAQUS 的材料庫中，對於橡膠材料行為之表現，較為接近的是超彈性性質 (hyperelastic)，其理論假設材料為等向性、非線性、在高應變下仍維持彈性行為，視此種材料為不可壓縮。在理論推導上導入應變位能  $U(\epsilon)$ ，定義應變能儲存於該材料的單位參考體積內，為材料各點應變量的函數，在 ABAQUS 內，有幾種應變能表示式可用來模擬這些不可壓縮、等向性的超彈性材料，其中最常見的便是 Mooney-Rivlin 表示式：

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2 \quad (2.4)$$

$U$  代表單位參考體積的應變能， $C_{10}$ 、 $C_{01}$  和  $D_1$  為材料係數； $\bar{I}_1$  和  $\bar{I}_2$  為第一和第二偏差應變之不變量，定義如下：

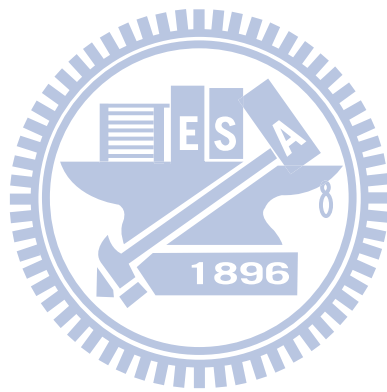
$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2, \bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \quad (2.5)$$

偏差拉伸量  $\bar{\lambda}_i = J^{-1/3} \lambda_i$ ； $J$  為變形總體積比， $J^{el}$  為彈性變形體積比， $\lambda_i$  為主拉伸量，初始剪切彈性模數和體積彈性模數定義如下：

$$\mu_0 = 2(C_{10} + C_{01}), K_0 = \frac{2}{D_1} \quad (2.6)$$

在模擬軟體中主要需要使用者給訂的參數是  $C_{10}$ 、 $C_{01}$ 、 $D_1$  使用預設值，代表假設在模擬中，視橡膠為完全不可壓縮性[12]。

由參考文獻[7]可得知當橡膠在邵氏硬度等於 80 度時， $C_{10}$  等於 0.7389、 $C_{01}$  等於 0.1847，已接近鋼瓶所用的橡膠 o-ring 墊圈硬度，因此後續的研究中將採用此種超彈性模型，以及文獻中所實驗得到的參數，模擬橡膠 o-ring 墊圈的變形和受力行爲。



## 第三章 有限元素及最佳化分析

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

有限元素法 (finite element method) 在工業界的應用以超過一百年的歷史。發展上從矩陣結構分析 (matrix structural analysis) 的方法發展開始，首先應用於梁 (beam) 及桁架 (truss) 為主的鋼構上，而後將理論引用至各個物理領域，例如熱傳等。目前利用有限元素分析 (finite element analysis) 來進行產品的模擬分析研究的技術，已經有非常多的學者投入相關的研究發展，其理論背景可說是相當純熟。

因為運用有限元素及最佳化分析可以協助解決一般實驗分析所可能無法達成的問題，因此本章將針對高壓鋼瓶封口成形製程進行有限元素分析，並在下一章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。

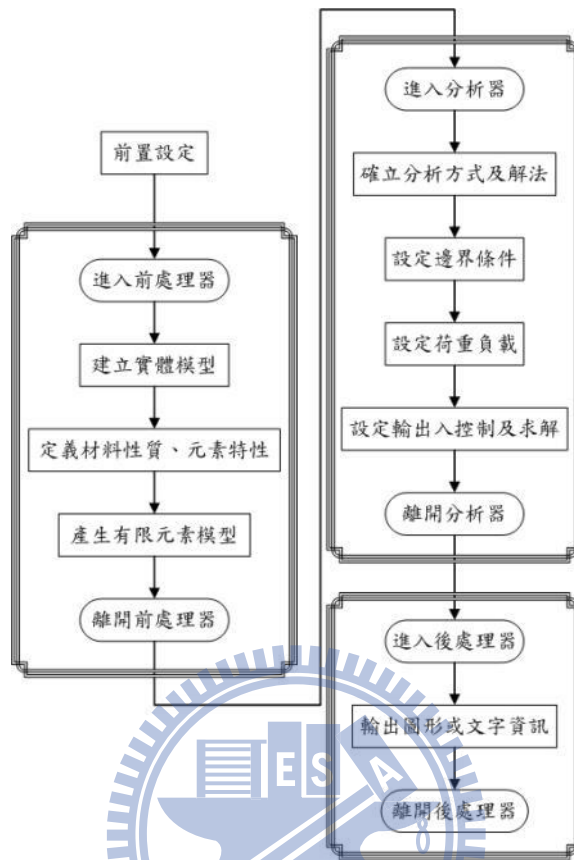


圖 3.1 有限元素軟體之分析流程圖[11]

(1) 前處理器：

簡單的幾何模型，可以很容易地用人工的方法建立，如圓球、長方體等規律的幾何形狀。然而，大部份的工程問題，幾乎不存在這種規律而簡單的結構或外型，對於複雜的工程問題，幾何模型的建立必須有一套好用的有限元素分析前處理器軟體。一個功能齊全的前處理器，應該包含了以下的幾點功能：

- a. 幾何模型的建立。
- b. 資料管理概念 (data management concept)：將幾何模型參數化並

存在特定資料庫中，不同模組間可任意呼叫並修改幾何參數。

c. 幾何模型轉換 (geometry translation)：可與 IGES 等標準檔案交換格式相互轉換。

d. 建立網格 (mesh)。

e. 與其他有限元素分析軟體介面的整合：與其他有限元素軟體產生的檔案互相轉換。

## (2) 計算求解：

針對所有節點和元素計算應力、應變、位移、負載，能量和壓力等，處理一般線性或非線性問題。

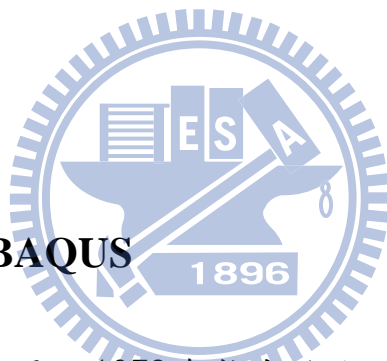
有限元素法應用於分析塑性變形時，主要是按照模具及工件的幾何形狀切割成由節點 (node) 構成的元素 (element)，在求解器中求取每一個元素之勁度矩陣 (stiffness matrix)，後續在結合所有元素之勁度矩陣後，得到全域勁度矩陣。在計算過程中，藉由不同的材料應力-應變模式，得到本構方程式 (constitutive equations)，並配合應力平衡關係式及邊界條件，計算出整體應力、應變分佈及外力等數據。

## (3) 後處理器：

後處理器可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。

考慮到高壓鋼瓶封口過程中瓶口處與 o-ring 墊圈將發生大變形，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傳統之金屬衝壓成型問題，故在此將採用ABAQUS/Standard來進行求解，可模擬各種線性和非線性工程，使其能夠有效、精確、可靠的實現[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) 假設鋼瓶本體、金屬封片、o-ring墊圈以及沖頭可視為軸對稱模型 (axisymmetric model)，並視鋼瓶與金屬封片為一均質且具等向性性質之彈塑性 (elasto-plastic) 材料，o-ring墊圈則以Mooney-Rivlin超彈性材料模型模擬NBR橡膠材料。

(2) 不考慮模具 (包括第一階段及第二階段沖頭) 的變形，將其定



義為剛體 (rigid body)。

(3) 不考慮沖壓成形機台之機械耗功。

### 3.4 建立模型

#### 3.4.1 建立元件幾何外型

藉由元翎精密工業所提供的原始尺寸圖，在 ABAQUS 前處理中將之簡化為二維軸對稱模型。圖 3.2 至圖 3.6 為在軟體中所建立的元件模型，在鋼瓶部分，由於本研究關心的重點僅在開口處，因此將鋼瓶下半部的模型省略。

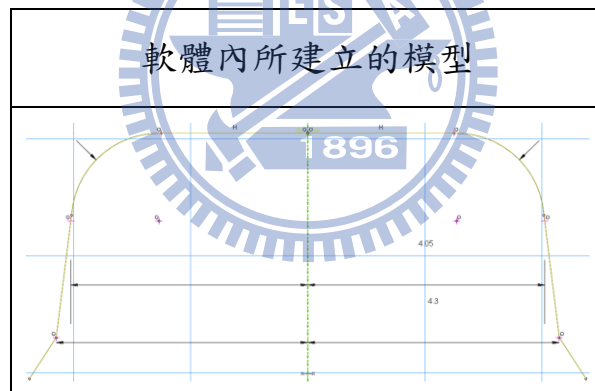


圖 3.2 沖頭尺寸圖(單位：mm)

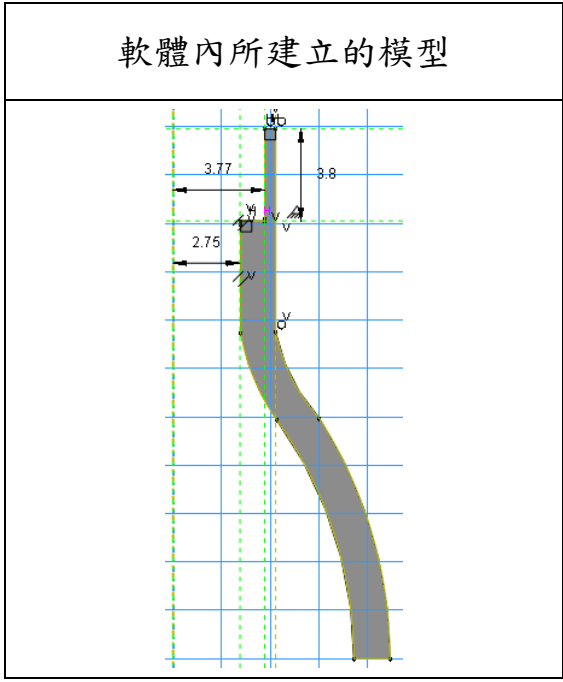


圖 3.3 高壓鋼瓶尺寸圖(單位：mm)

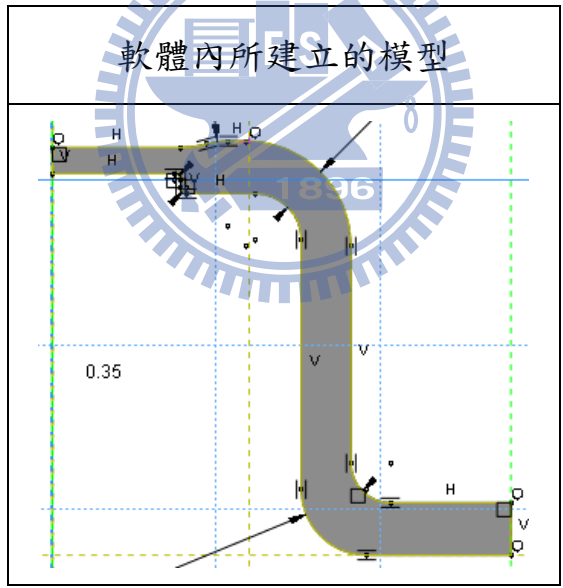


圖 3.4 金屬封片尺寸圖(單位：mm)

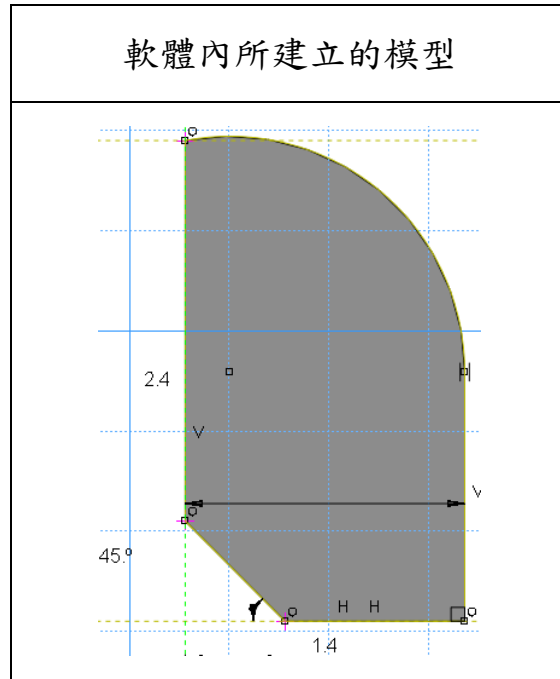


圖 3.5 橡膠 o-ring 墊圈尺寸圖(單位：mm)

整體組件組裝如圖 3.6。

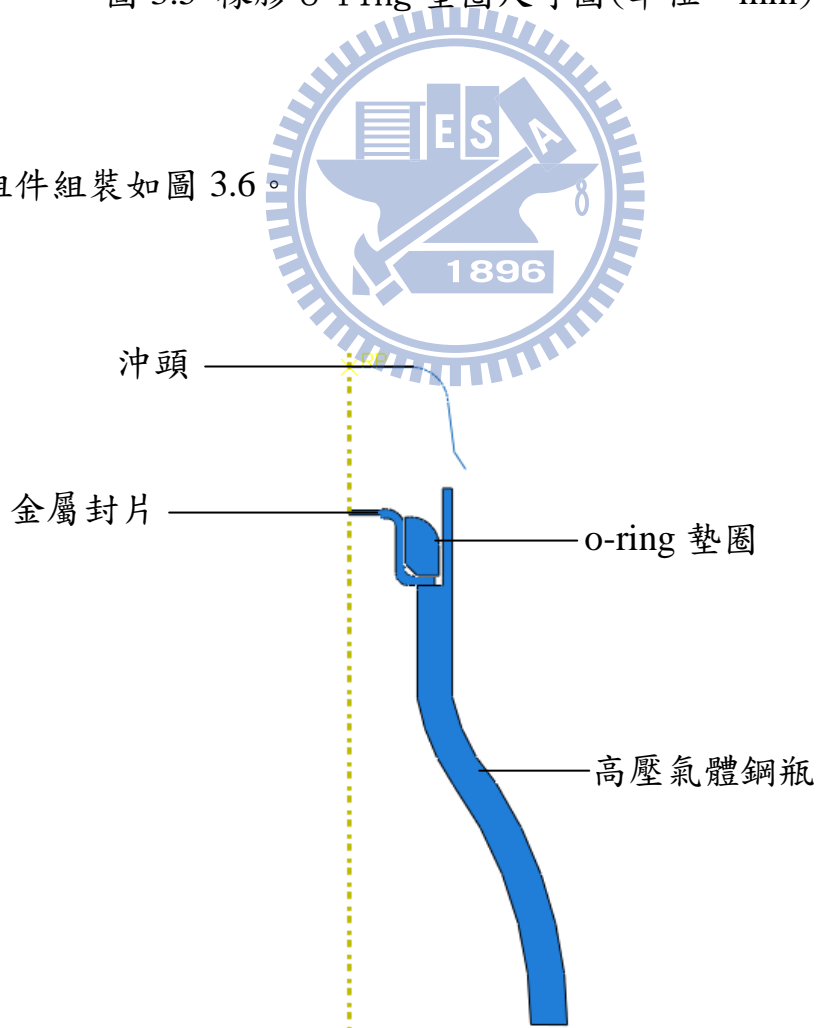


圖 3.6 完整高壓鋼瓶封口組裝圖(未沖壓封口前)

### 3.4.2 材料性質設定

利用第二章材料試驗所取得之機械性質帶入有限元素模型進行模擬，並定義材料為均質，表3.1為模擬所使用的材料性質。

表 3.1 模擬中所定義的材料性質

沖頭	定義為剛體 (rigid body)。
鋼瓶	將JIS SPCF鋼材進行拉伸實驗，結果代入模擬。(圖2.3)
金屬封片	JIS SPCC鋼材，降伏強度：342MPa，抗拉強度：408MPa，楊氏係數：200GPa，應用指數定律 (power law) 擬合塑性階段之真實應力-應變曲線代入模擬(圖2.9)。
o-ring墊圈	NBR 橡膠，邵氏硬度A級80度，參考文獻[7]，以Mooney-Rivlin超彈性材料模型(式2.4)模擬此材料， $C_{10}$ 等於0.7389、 $C_{01}$ 等於0.1847。

### 3.4.3 分析步驟與邊界條件設定

在軟體內的分析步驟設置則模擬實際製程的情形，第一步分析先固定鋼瓶的瓶身；模擬高壓氣體充填入鋼瓶的部分，給定鋼瓶及金屬封片內部一8MPa均部內壓，並將在後續模擬數組特定尺寸，先觀察沖壓完成後 o-ring 墊圈的縫隙，再以 meshpart 的方式給定 o-ring 墊圈

的縫隙處 8MPa 的均部壓力，和未施加壓力的情況互相對照，探討 o-ring 墊圈受到鋼瓶氣壓影響的差別；接著由沖頭作向下位移，作完全緊密封合的動作，完成高壓鋼瓶的封口；第四步驟則為另一沖頭做封口確認動作(此為實際製程，在模擬中並未設定)；分析進行流程如圖 3.7 所示。

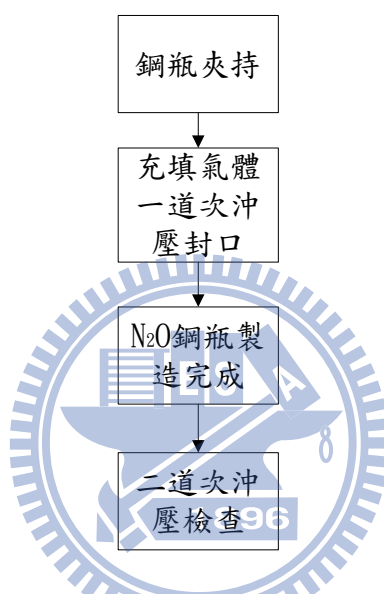


圖 3.7 分析步驟流程

#### 3.4.4 接觸設定

由於本研究需要模擬高壓鋼瓶沖壓封口的情形，因此需要設定各元件之間的接觸組合，分別為：

- a. 鋼瓶與 o-ring 墊圈
- b. 鋼瓶與金屬封片
- c. o-ring 墊圈與金屬封片
- d. 鋼瓶與沖頭

摩擦係數的設定將參考文獻[2]、[17]進行設定，鋼瓶與金屬封片、與沖頭的庫倫摩擦係數（圖 3.8）為 0.1，鋼瓶與 o-ring 墊圈接觸的庫倫摩擦係數(圖 3.9)為 0.2。

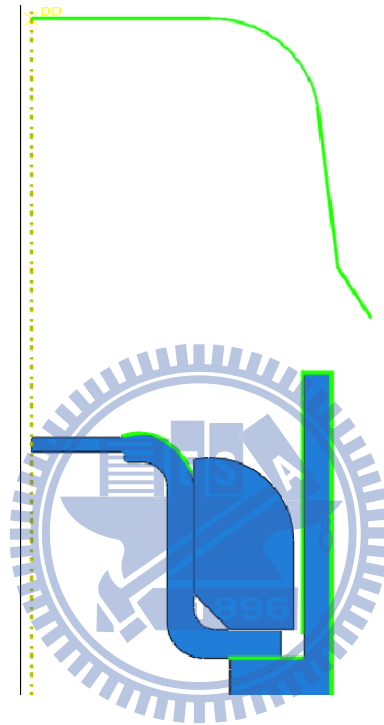


圖 3.8 鋼瓶與金屬封片、與沖頭的庫倫摩擦係數位置設定

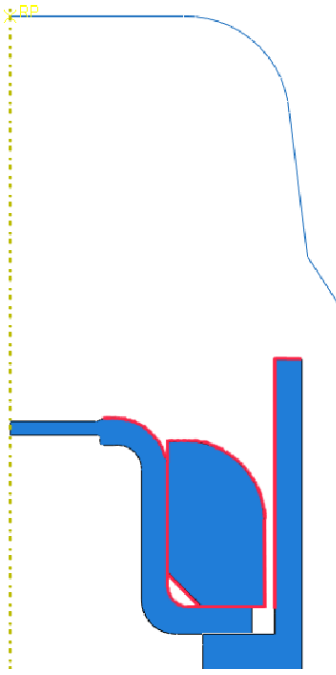


圖 3.9 鋼瓶與 o-ring 墊圈接觸的庫倫摩擦係數位置設定

### 3.4.5 網格劃分設定

首先在分析前，必須先建立沖頭與鋼瓶、金屬封片和 o-ring 墊圈之有限元素模型，由於考慮的是二維軸對稱外型，因此建構了二維的模型。有限元素模型如圖 3.10 所示。

本研究在鋼瓶、o-ring 墊圈與金屬封片部分使用 CAX4R 實體軸對稱四節點減積分元素，元素數為 6732，而在剛體模具的部份則採用 RAX2 二維軸對稱四邊型剛體元素，用來模擬二維剛體表面。

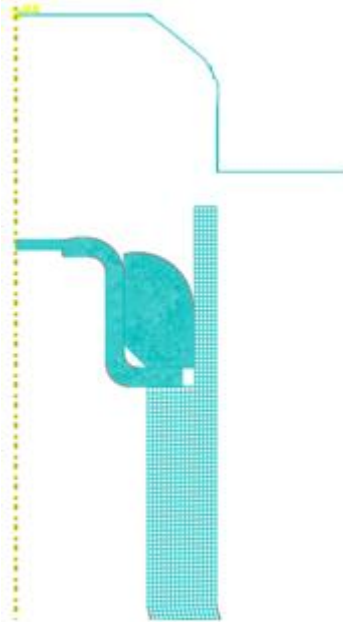


圖 3.10 有限元素網格模型

### 3.4.6 後處理

經由分析收斂結果，在後處理器中可以將程式運算結果，對於沖頭反力、鋼瓶和 o-ring 墊圈變形量、材料所受的接觸應力和應變等數據，以圖形、曲線、表格或輸出文字檔的方式顯示。本研究主要將觀察 o-ring 墊圈在受到壓迫之後的接觸應力，當每一組不同尺寸的鋼瓶、o-ring 墊圈模擬成形完成後，先輸出 o-ring 墊圈每個元素成形完成後的接觸應力資料，將此資料導入 Office Excel 軟體，計算出 o-ring 墊圈的最大接觸應力、接觸應力平均程度(標準差)，以及統計出 o-ring 墊圈表面接觸應力大於零的元素量，除以表面元素的總量，以此方式計算出接觸面積的值。而不同的鋼瓶、o-ring 尺寸就會算出不同的最大接觸應力、接觸面積以及接觸應力標準差，將這些結果列表整理，



以便在後續研究和實驗中，利用這些數值去判斷封口的品質，經過實驗驗證模擬的正確性之後，再從中挑出數組接觸應力狀態較佳的組合實驗，進一步改善鋼瓶的密封性。

### 3.5 最佳化分析系統

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 3.11 即為簡單示意圖[8]。

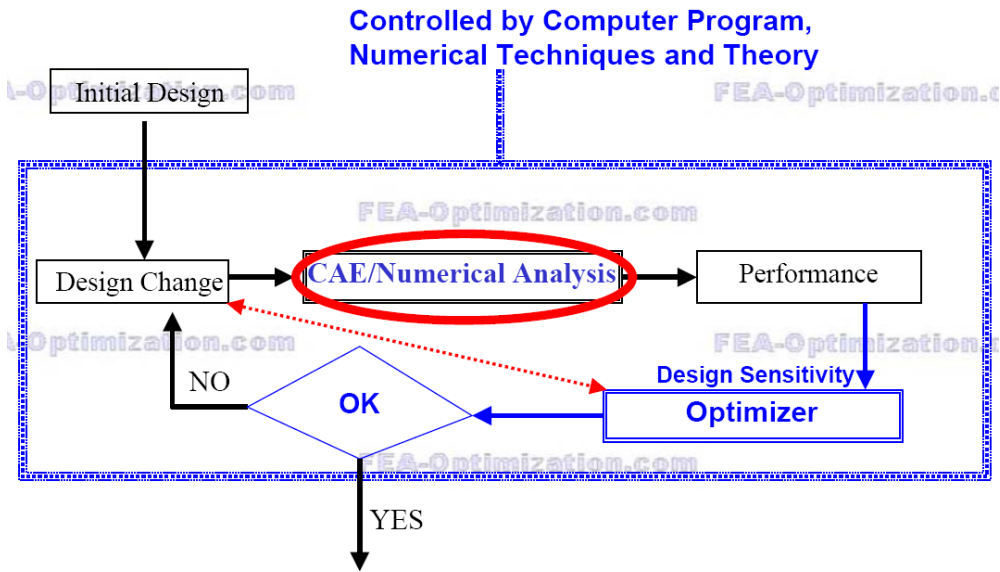


圖 3.11 最佳化設計基本原理[8]

### 3.6 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試，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。

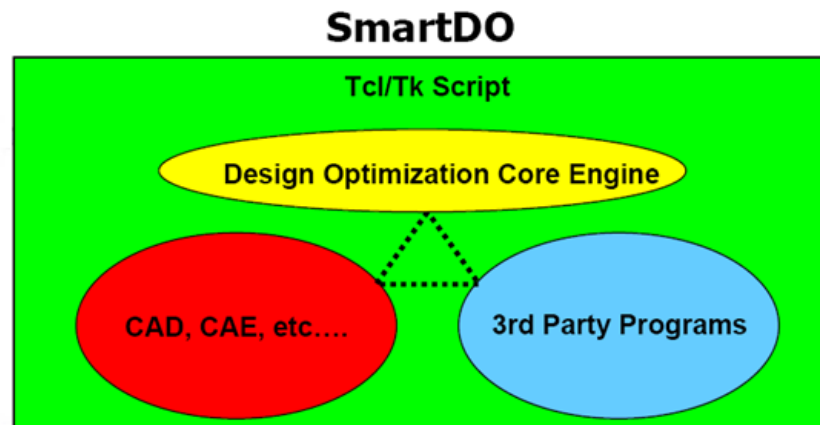
目前 SmartDO 已被應用在以下實務工作上：

- 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試，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[8]。

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(詳細程式碼請見附錄 A)；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(詳細程式碼請見附錄 B)，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；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。



Automatic Design Optimization System

圖 3.12 SmartDO 最佳化分析架構[8]

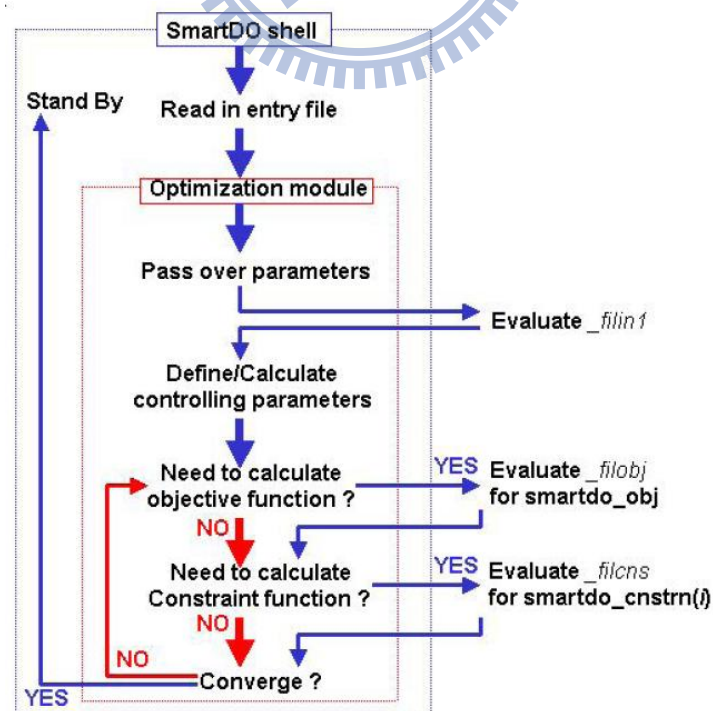


圖 3.13 SmartDO 最佳化分析流程[8]

## 第四章 鋼瓶封口模擬與實驗

本研究的模擬與實驗，分為三個步驟，由淺入深的探討：

(1)首先針對在實際製造上較容易調整的參數：鋼瓶口高度、鋼瓶口內徑、o-ring 墊圈高度、o-ring 墊圈厚度進行初步的有限元素模擬(圖 4.1)，各製程參數值如表 4.1 所示，此步驟將用以深入探討在不同的製程參數中，對 o-ring 墊圈產生接觸壓應力的影響。而在實驗中則是要了解改變這些參數對密封性的影響，從而去探討接觸應力和密封性的關係。

(2)藉由第一步驟了解接觸應力和密封性的關係後，接著就是要模擬可改變參數的全部組合(共 288 組)，藉由觀察 o-ring 墊圈表面之接觸應力大小、平均程度和接觸面積做為判斷依據，將數據整理後挑出數組特定的尺寸組合來做實驗，借此找出符合漏氣標準的安全區域，以及探討如何用模擬中所得接觸應力的資訊來找出密封性較佳的尺寸組合。

(3)第三步驟則是針對沖頭外型，結合最佳化軟體 SmartDO 來改良沖頭外型，並開模實驗來探討沖頭外型對鋼瓶密封性的影響。

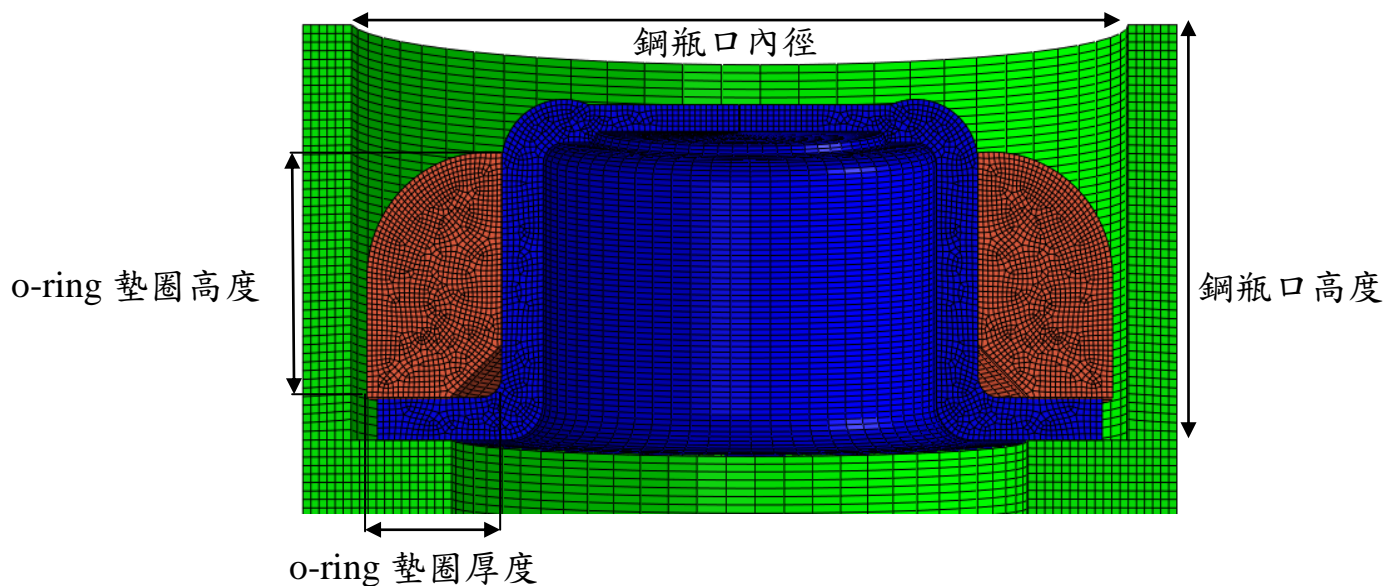


圖 4.1 製程參數設定位置

表 4.1 製程參數設定

製程參數	初始值	變數值
鋼瓶口高度(mm)	3.85	3.8,3.9,3.95,4,4.05,4.10,4.15
鋼瓶口內徑(mm)	7.65	7.5,7.55,7.6
o-ring 墊圈高度(mm)	2.4	2.3,2.5
o-ring 墊圈厚度(mm)	1.4	1.3,1.5

模擬中製程參數的選擇，鋼瓶尺寸為搭配在實際製造中常用之尺寸，而 o-ring 墊圈則是另外向供應商採買，故尺寸之選擇有限，且由於考慮到實驗之可行性與方便性，故選擇這些尺寸當做模擬變數。

在實驗部分，由於元翎精密工業採取自動化加工生產，在機台的操作上較為專業，因此本研究藉由元翎精密工業先前所做的實驗結果，

來配合模擬的結果做一個對照，以驗證本研究所選擇的工程因素及其數值，是否能夠當作判斷漏氣的基準。早期的實驗方法是將封口完成的鋼瓶泡水四至五天，量測並記錄其漏氣氣泡的直徑（圖 4.2），由於準確度較差，因此目前所採用的實驗方法則是以秤重的方式來紀錄鋼瓶的漏氣量。



圖 4.2 泡水實驗示意圖

## 4.1 初步有限元素模擬與實驗

### 4.1.1 改變鋼瓶口高度的模擬

改變鋼瓶口的高度的參數，選定八組尺寸（3.80mm、3.85mm、3.90mm、3.95mm、4.00mm、4.05mm、4.10mm、4.15mm），其餘四個變數則保持初始值。圖 4.3 是改變鋼瓶口高度的接觸應力圖。

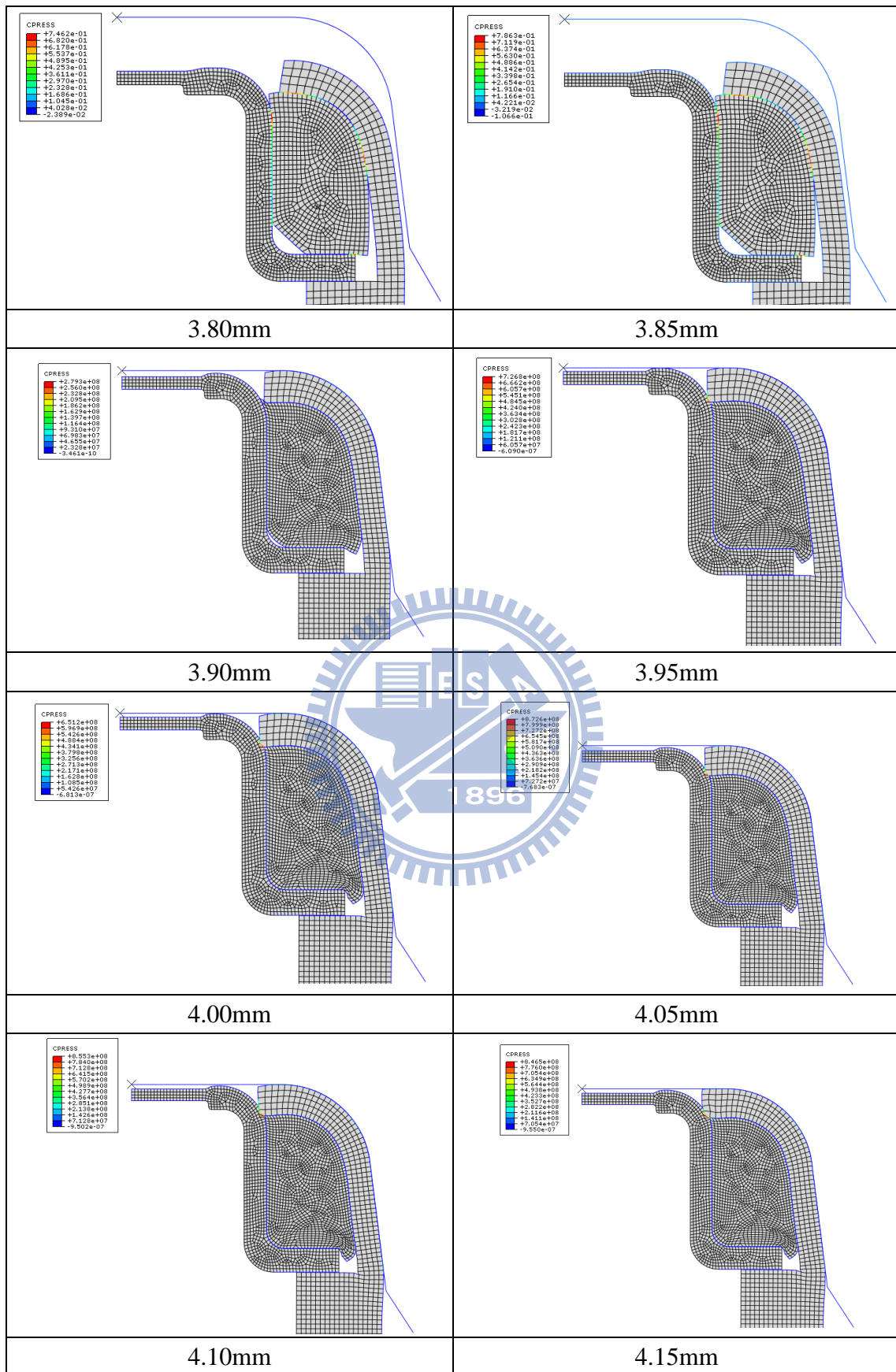


圖 4.3 不同鋼瓶口高度接觸應力圖



就鋼瓶受力狀態而言，從接觸應力圖來看，從 3.95mm 開始鋼瓶端點會卡到金屬封片，造成應力集中效應。就 o-ring 的接觸應力來看，增高鋼瓶口高度，可以提升最大接觸應力及接觸面積，但在鋼瓶口高度超過 3.90mm 之後，接觸應力標準差急遽上升（表 4.2），代表應力分佈變的不平均，而鋼瓶高度繼續增加，造成金屬封片的應力集中現象也可能會造成 o-ring 墊圈密封性不佳，此現象也可以用來判斷鋼瓶口高度，要增加到哪個範圍才能有效的提升密封效果。因此在未來更進一步的模擬分析中，也將把此項因素納入為判斷的標準。

表 4.2 鋼瓶口高度對 o-ring 墊圈接觸應力數據表

鋼瓶口高度(mm)	3.80	3.85	3.90	3.95	4.00	4.05	4.10	4.15
接觸應力最大值(MPa)	0.72	0.75	31.72	152.7	152.3	71.2	153.1	152.2
接觸面積(%)	60.2	62.1	88.6	95.58	94.85	88.9	90.4	91.17
接觸應力標準差	0.21	0.22	3.47	14.05	13.96	6.73	14.1	14.01

#### 4.1.2 改變鋼瓶口高度的實驗

此部分以秤重的方式測量鋼瓶漏氣量，鋼瓶口高度分別為 3.85mm、3.90mm、3.95mm、4.00mm，鋼瓶口內徑皆為 7.65mm，o-ring 厚度皆為 2.4mm，o-ring 高度皆為 1.4mm，量測時間為七天，每組尺寸皆有 5 個實驗樣本，最後以平均值來看每支鋼瓶漏氣量(單位：公克/

天)。

表 4.3 鋼瓶瓶口高度實驗

鋼瓶口高度 (mm)	鋼瓶口內徑 (mm)	o-ring 厚度 (mm)	o-ring 高度 (mm)	實驗情形(平均值) 單位：公克/天
3.85	7.65	2.4	1.4	0.00045
3.90	7.65	2.4	1.4	0.00073
3.95	7.65	2.4	1.4	0.00134
4.00	7.65	2.4	1.4	0.00185

由實驗結果可知，鋼瓶口高度增加，雖然能增加最大接觸應力和接觸面積，但漏氣量反而增加，此一現象可由模擬預測來了解，因為鋼瓶口高度從 3.90mm 開始，就會讓鋼瓶口壁面接觸到金屬封片，而鋼瓶口高度若持續增加，更會造成鋼瓶口與金屬封片的應力集中現象，使密封性變得更差，因此由模擬與實驗之相互印證，可知鋼瓶口高度在 3.80mm~3.90mm 為安全密封的範圍(平均漏氣量<0.001 公克/天)。

#### 4.1.3 改變鋼瓶口內徑的模擬

本節調整鋼瓶口內徑，一共四組尺寸(7.5mm、7.55mm、7.60mm、7.65mm)，其餘四個變數維持初始值，圖 4.3 是各鋼瓶口內徑尺寸的接觸應力圖。

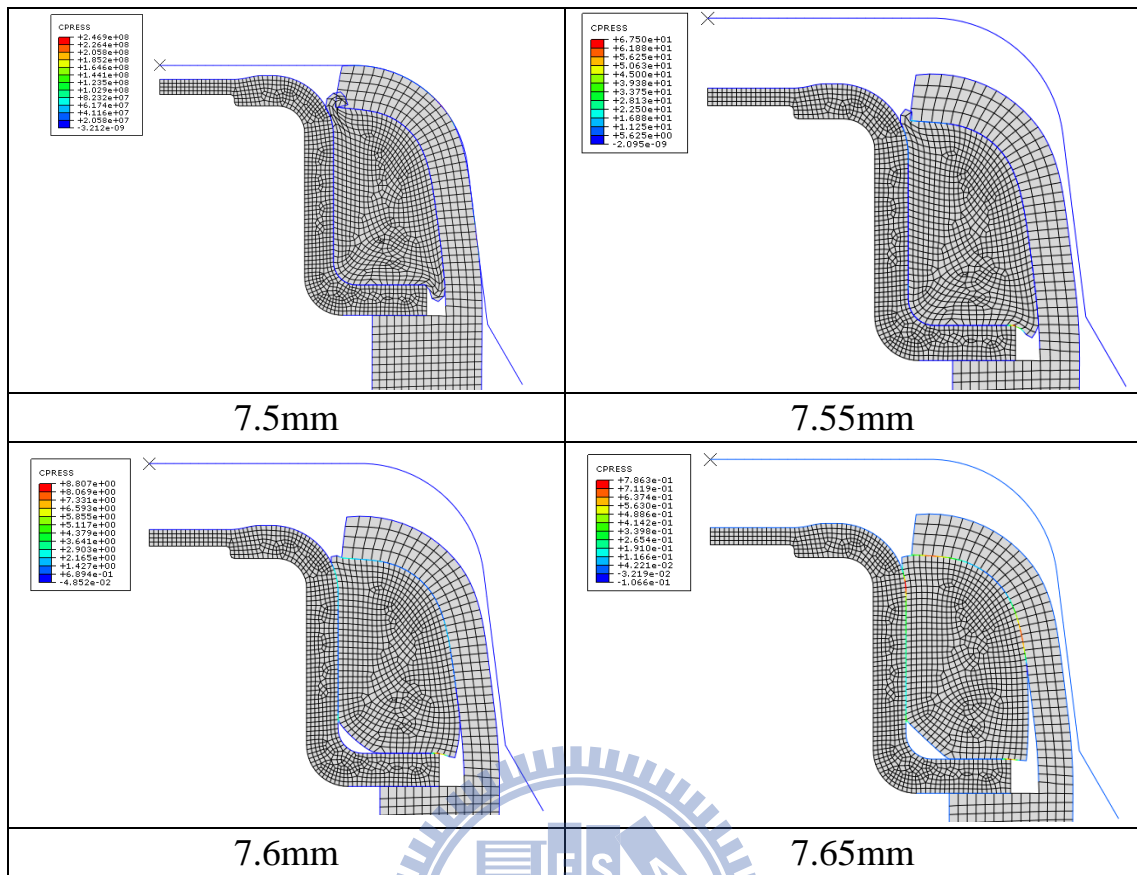


圖 4.4 不同鋼瓶口內徑接觸應力圖

從圖 4.4 可以看出，鋼瓶內徑越大，o-ring 墊圈側邊和底部的縫隙也越大，接觸應力、接觸面積越小（表 4.4），鋼瓶壁面所受到的應力也越小。但若是鋼瓶口內徑過小(如 7.5mm)，將會使 o-ring 墊圈擠出於瓶口，因此鋼瓶口的內徑需要和 o-ring 墊圈的厚度互相配合，才能達成良好的密封。

表 4.4 鋼瓶口內徑對 o-ring 墊圈接觸應力

鋼瓶口內徑(mm)	7.50	7.55	7.60	7.65
接觸應力最大值(MPa)	64.73	57.08	7.5	0.75
接觸面積(%)	90.81	81.09	76.53	62.14

接觸應力標準差	7.09	6.31	1.12	0.226
---------	------	------	------	-------

#### 4.1.4 改變鋼瓶口內徑的實驗

鋼瓶瓶口高度維持 4.15mm~4.20mm，內徑由 7.60mm~7.65mm 改為 7.50mm~7.55mm，分成甲、乙兩組，甲組為銑孔後內部無研磨，乙組為銑孔後內部有研磨。

泡水結果記錄（表 4.5）：

表 4.5 瓶口內徑實驗泡水時間：3 天

種類	甲(無研磨)	乙(有研磨)	內徑(mm)
氣泡直徑(mm)	1.86	0.49	7.50~7.55
	2.62	3.43	7.60~7.65
平均(mm/day)	0.75	0.65	

此實驗的實驗數據過少，難以確定其準確性，若假設此次試驗是可靠的，則可印證模擬的結果，得到以下結論：縮小銑孔時的瓶口內徑，由 7.60mm~7.65mm 改成 7.50mm~7.55mm，可得到氣密效果較佳的瓶口；而銑孔時入孔內較為平滑，則密封性也會有所改善。

#### 4.1.5 改變 o-ring 墊圈高度的模擬

本節討論 o-ring 墊圈本身的高度，在受到擠壓之後，其外型與鋼瓶受力的變化，共三組尺寸變化(2.3mm、2.4mm、2.5mm)，其餘四個

變數維持初始值，圖 4.5 是不同 o-ring 墊圈高度下的接觸應力圖。

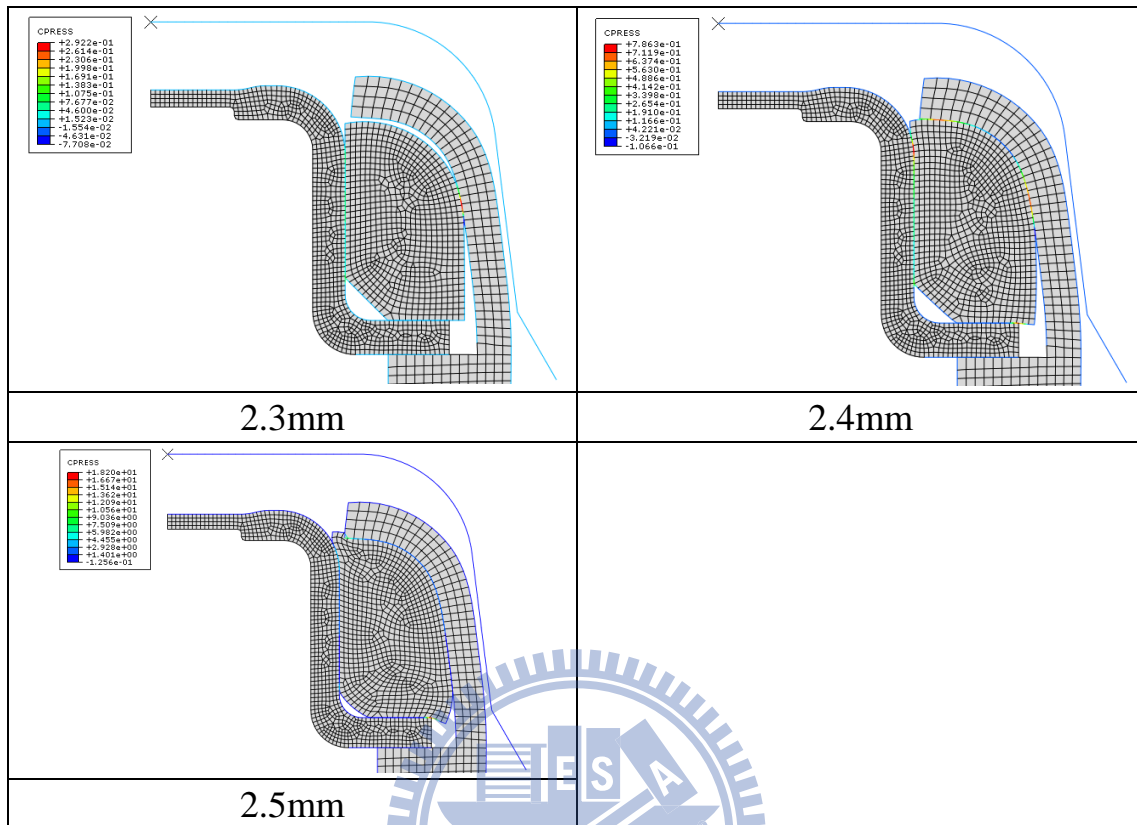


圖 4.5 不同 o-ring 墊圈高度接觸應力圖

由圖 4.5 可以觀察到，適當的增加 o-ring 墊圈的高度，可以填滿鋼瓶口內部側邊的空隙，增加接觸應力、接觸面積和填滿率（表 4.6），但如果 o-ring 墊圈過高，反而會造成 o-ring 墊圈應力集中，變形過度而突出瓶口，不僅無法密封，也造成外型上的不美觀，而這部分的尺寸調整也必須配合不同鋼瓶口的高度去調整，無法僅靠增加 o-ring 墊圈高度來降低漏氣率，必須要同時調整，才能避免 o-ring 墊圈突出的情形發生。

表 4.6 o-ring 墊圈高度對接觸應力

o-ring 墊圈高度(mm)	2.3	2.4	2.5
接觸應力最大值(MPa)	0.292	0.75	15.46
接觸面積(%)	32.63	62.14	76.53
接觸應力標準差	0.05	0.226	2.11

#### 4.1.6 改變 o-ring 墊圈高度的實驗

此部分以秤重的方式測量鋼瓶漏氣量，鋼瓶口高度為 3.95mm，鋼瓶口內徑為 7.60mm 和 7.65mm，o-ring 墊圈厚度皆為 2.4mm，o-ring 墊圈高度分別為 1.3mm、1.4mm、1.5mm，量測時間為七天，每組尺寸皆有 5 個實驗樣本，最後將以平均值來看每支鋼瓶漏氣量(單位：公克/天)。

表 4.7 o-ring 墊圈高度實驗

鋼瓶口高度 (mm)	鋼瓶口內徑 (mm)	o-ring 厚度 (mm)	o-ring 高度 (mm)	實驗情形(平均值) 單位：公克/天
3.95	7.60	2.4	1.3	0.00140
3.95	7.60	2.4	1.4	0.00087
3.95	7.60	2.4	1.5	0.00083
3.95	7.65	2.4	1.3	0.00312
3.95	7.65	2.4	1.4	0.00142
3.95	7.65	2.4	1.5	0.00103

由實驗結果可知，增加 o-ring 墊圈的高度，確實可以增加密封性，降低鋼瓶的漏氣量，且由 4.1.5 節的模擬結果可知，某些尺寸組合若

使用過高的 o-ring 墊圈，也會發生瓶口無法確實密封的情形，因此還是要搭配鋼瓶口的高度去選擇，才能達到良好的密封。

#### 4.1.7 改變 o-ring 墊圈厚度的模擬

本節討論 o-ring 墊圈本身的厚度，在受到擠壓之後，其外型與鋼瓶受力的變化，共三組尺寸變化(1.3mm、1.4mm、1.5mm)，其餘四個變數維持初始值，圖 4.6 是不同 o-ring 墊圈厚度下的接觸應力圖。

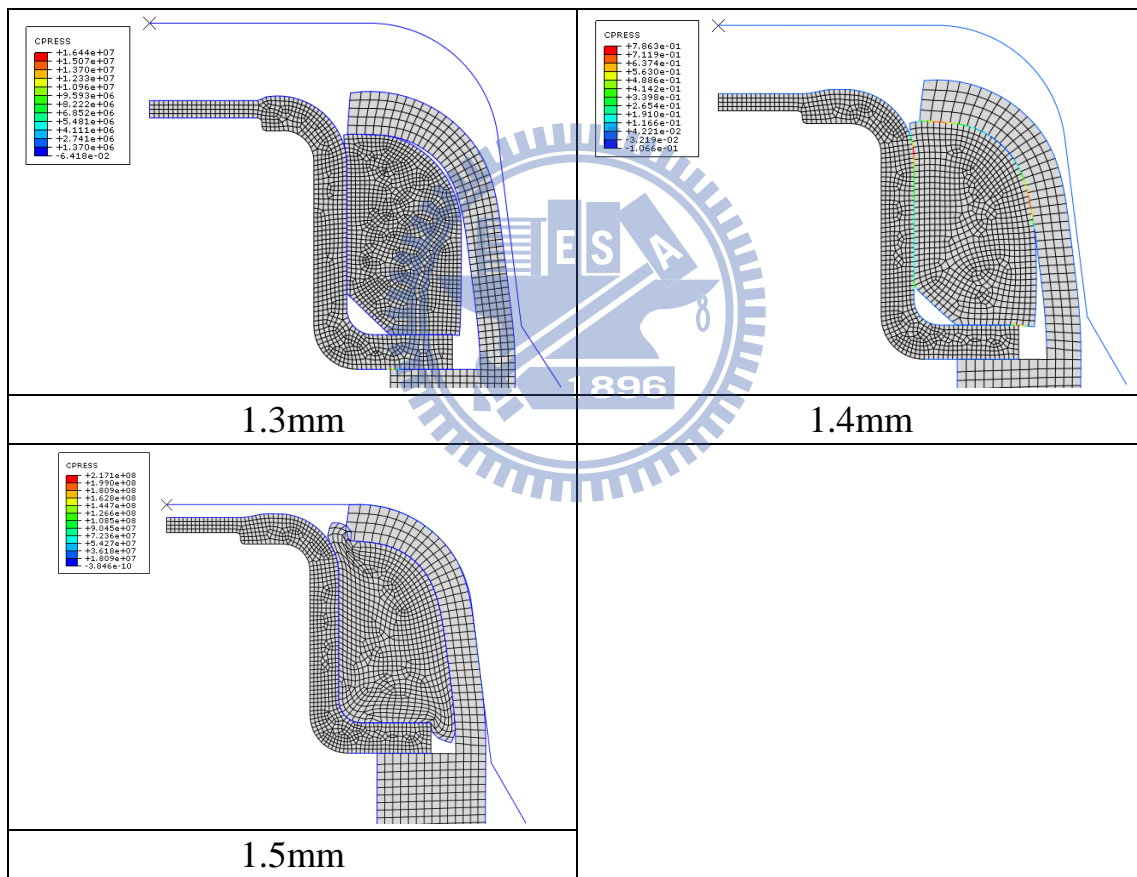


圖 4.6 不同 o-ring 墊圈厚度接觸應力圖

由圖 4.6 可知，o-ring 墊圈厚度也會影響密封程度，若是厚度不足，鋼瓶口內側邊的縫隙將會很大，幾乎完全沒接觸到 o-ring 墊圈上表面，使接觸面積降低，造成密封性極差，但厚度又不能太厚，有可能會因

鋼瓶口內徑不夠大，使 o-ring 造成過度擠塞而凸出瓶口，造成外型上的不美觀，也使 o-ring 容易受環境影響而劣化，所以也要視鋼瓶口的內徑大小去做互相搭配。

表 4.8 o-ring 墊圈厚度對接觸應力

o-ring 墊圈厚度(mm)	1.30	1.40	1.50
接觸應力最大值(MPa)	1.04	1.75	27.18
接觸面積(%)	26.51	62.14	87.00
接觸應力標準差	0.202	0.226	3.896

#### 4.1.8 改變 o-ring 墊圈厚度與硬度的實驗

四組不同的 o-ring 墊圈厚度與硬度如下(表 4.9)，鋼瓶瓶口高度皆為 4.15~4.20mm、內徑大小皆為 7.60mm~7.65mm，使用沖頭一次鉚合，每組各充填 20 支小鋼瓶。

表 4.9 實驗的 o-ring 墊圈厚度與硬度

鋼瓶編號	B2	C2	D2	E2
厚度	1.4mm	1.4mm	1.5mm	1.5mm
硬度	80 度	90 度	80 度	90 度

泡水結果記錄(表 4.10、表 4.11)：



表 4.10 o-ring 墊圈實驗第一組泡水時間：5 天

	B2	C2	D2	E2
氣泡直徑(mm)	3.11	5.32	1.85	0.00

表 4.11 o-ring 墊圈實驗第二組泡水時間：4 天

	B2	C2	D2	E2
氣泡直徑(mm)	9.52	8.68	2.35	3.32

由此兩次的鋼瓶追蹤記錄，**D2**、**E2** 可得到較佳的氣密效果，由此再抽取此二種鋼瓶進行追蹤（表 4.12）。

表 4.12 o-ring 墊圈實驗 D2、E2 泡水時間：7 天

種類	D2	E2
氣泡直徑(mm)	0	15.48
	8.34	5.17
	8.04	20.91
平均(mm/day)	0.78	1.98

由實驗結果可證實，o-ring 墊圈厚度較大、硬度在 80 度時，較能夠有效防止漏氣量的產生。

## 4.2 接觸應力與密封性的關係

經由上一節的初步模擬與實驗，可以証實鋼瓶的密封性，確實與 o-ring 墊圈的最大接觸應力、接觸面積以及接觸應力標準差有關。

為了更進一步了解接觸應力與密封性的關係，本研究先以有限元素軟體模擬出不同鋼瓶尺寸、o-ring 尺寸的接觸應力狀態(一共 288 組)，再依照最大接觸應力值以及接觸應力標準差去做整理，結果發現最大接觸應力與接觸應力標準差有著明顯的線性關係(圖 4.7)：最大接觸應力越大，接觸應力標準差也隨之增加；因此在整理完接觸應力的數據後，挑選出最大接觸應力由小到大的數組尺寸組合來進行漏氣實驗，以秤重的方式測量鋼瓶漏氣量，將實驗的尺寸組合依照漏氣量標準去區分(平均漏氣量<0.001 公克/天以下為合格)，並進一步觀察漏氣率與接觸應力之間的關係，結果如圖 4.7 所示。

表 4.13 漏氣率與接觸應力之實驗數據(合格 13 組)

鋼瓶口高度(mm)	鋼瓶口內徑(mm)	o-ring 厚度(mm)	o-ring 高度(mm)	最大接觸應力(MPa)	標準差	平均漏氣量(公克/天)
3.95	7.60	2.4	1.4	10.23	1.408	0.00087
3.95	7.60	2.4	1.5	10.6	2.8	0.00083
4.00	7.60	2.4	1.4	11.31	1.515	0.00085
4.00	7.65	2.4	1.5	14.72	2.81	0.00073
3.90	7.60	2.4	1.4	8.87	1.26	0.00061
3.95	7.60	2.4	1.4	10.23	1.408	0.00062
4.00	7.60	2.4	1.4	11.31	1.515	0.00062
3.90	7.65	2.4	1.4	0.78	0.244	0.00073
3.80	7.60	2.4	1.4	6.19	0.998	0.00017
3.80	7.65	2.3	1.5	3.48	0.984	0.00034
3.85	7.60	2.4	1.4	7.5	1.116	0.00046
3.80	7.50	2.3	1.4	6.12	1.28	0.00059
4.00	7.65	2.4	1.5	4.72	2.81	0.00054

表 4.14 漏氣率與接觸應力之實驗數據(不合格 24 組)

鋼瓶口高度(mm)	鋼瓶口內徑(mm)	o-ring 厚度(mm)	o-ring 高度(mm)	最大接觸應力(MPa)	標準差	平均漏氣量(公克/天)
3.95	7.60	2.4	1.3	0.588	0.1188	0.0014
3.95	7.65	2.4	1.3	0.43	0.078	0.00312
3.95	7.65	2.4	1.4	0.89	0.25	0.00142
4.00	7.60	2.4	1.3	0.63	0.127	0.00222
4.00	7.60	2.4	1.5	17.73	3.734	0.00121
4.00	7.65	2.4	1.3	0.5	0.087	0.00272
4.00	7.65	2.4	1.4	1.12	0.273	0.00136
3.95	7.65	2.4	1.4	0.89	0.25	0.00134
4.00	7.65	2.4	1.4	1.12	0.273	0.00185
4.00	7.65	2.5	1.4	25.28	2.98	0.0015
3.95	7.50	2.3	1.4	37.07	4.122	0.00192
4.10	7.55	2.3	1.5	35.7	4.91	0.00131
3.90	7.50	2.3	1.4	26.79	3.13	0.00238
3.95	7.50	2.3	1.4	37.07	4.122	0.00154
4.00	7.50	2.3	1.4	49.79	5.455	0.00365
4.05	7.55	2.4	1.4	42.5	4.67	0.00175
4.05	7.65	2.5	1.4	29.32	3.282	0.00169
3.80	7.55	2.5	1.3	1.85	0.516	0.004189
3.90	7.55	2.3	1.4	2.01	0.453	0.003251
3.90	7.55	2.3	1.4	2.01	0.453	0.00269
3.95	7.55	2.3	1.4	2.77	0.546	0.00524
3.95	7.55	2.4	1.3	0.8	0.176	0.00453
3.95	7.65	2.5	1.4	20.74	2.588	0.11907
4.00	7.55	2.3	1.4	3.3	0.595	0.00533

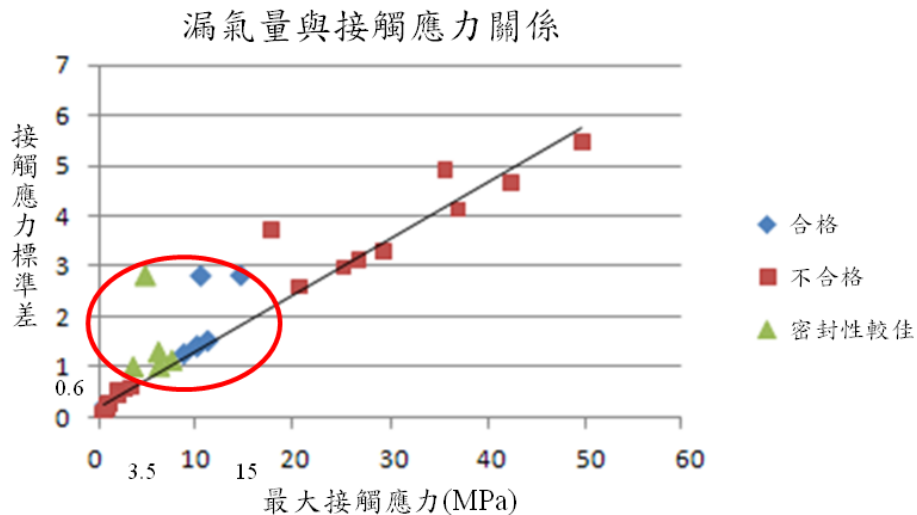


圖 4.7 漏氣率與接觸應力關係

可以看出最大接觸應力和標準差呈現一線性比例的趨勢，此比例小於某一範圍(橫坐標：最大接觸應力 $\approx 3.5\text{MPa}$ ，縱座標：標準差 $\approx 0.6$ )或是太大(橫坐標：最大接觸應力 $\approx 15\text{MPa}$ ，縱座標：標準差 $\approx 3$ )，都會造成漏氣量不合格，因此藉由此實驗和模擬的印證，已可以用模擬的方式，找出較佳的最大接觸應力和應力標準差組合，從而預期鋼瓶的漏氣量是否在標準以內。

而由實驗結果可知，沿著線性方向越往上爬(最大接觸應力越大)，漏氣量越多，直到超過了合格區域，進入漏氣量不合格的範圍；由模擬來看沿線性方向密封性合格的尺寸組合其接觸應力狀態，可以發現若 o-ring 的接觸應力太小，將沒有足夠的應力強度來將瓶口密封，但若 o-ring 的接觸應力越大，相對的應力標準差也越大，代表應力分布也會越來越不平均，因此密封性便會隨著應力分佈越來越不平均而逐漸下降，漏氣量便越來越多。而未來若有類似產品應用 o-ring 墊圈做

為封口的關鍵元件，亦可應用此法，先行模擬出最大接觸應力與應力標準差之資料並整理成曲線圖表，再從此線上挑出數組特定之尺寸組合做漏氣實驗，即可找出密封性合格的區域範圍以及密封性較佳的尺寸組合。

### 4.3 沖頭外型最佳化

#### 4.3.1 沖頭外型最佳化的模擬

前一節探討各元件尺寸對 o-ring 墊圈接觸應力造成的影響，這一節將探討沖頭各尺寸外型對 o-ring 接觸應力的影響。首先將選定沖頭的 4 組關鍵尺寸(如圖 4.8 中的(1)(2)(3)(4))，分析對封口的影響(其參數設定為：固定鋼瓶、o-ring、封片尺寸，一次調整一個沖頭尺寸，其餘固定)。

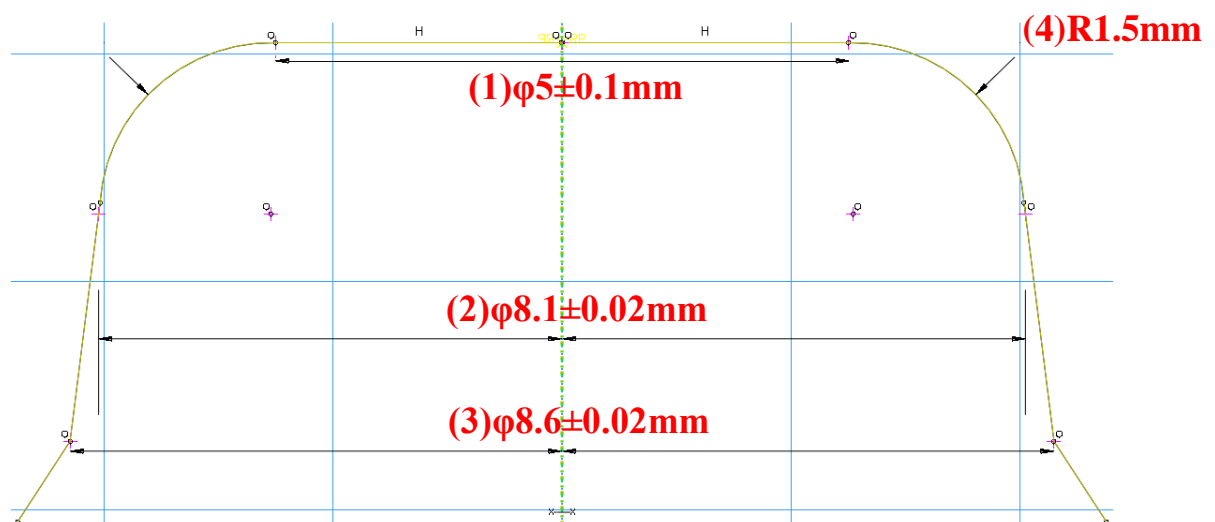
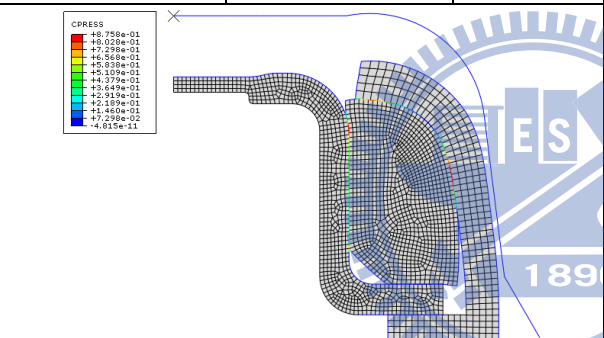
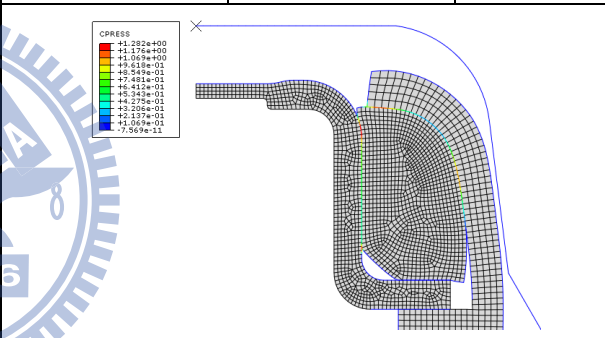
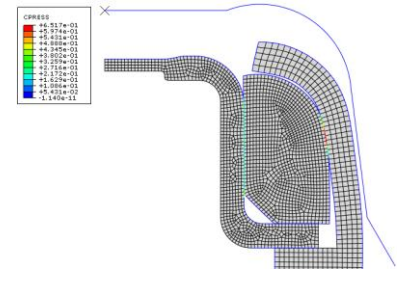
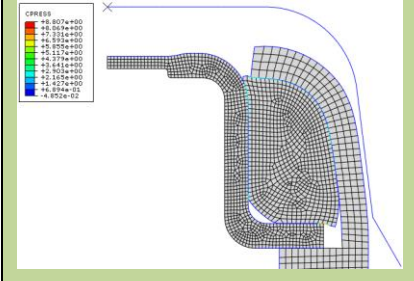
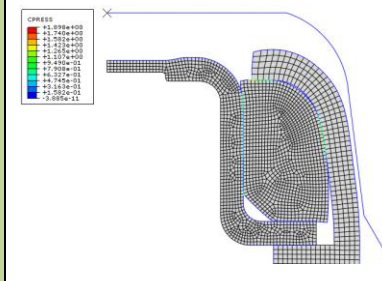


圖 4.8 沖頭細部尺寸圖

#### I. 改變沖頭尺寸 (1) (原尺寸 $\phi 5 \pm 0.1 \text{mm}$ )

從表 4.15 的結果可看出，圖 4.8 中的尺寸(1)於  $\phi 5 \pm 0.1\text{mm}$  已位於區域最佳解(灰框)，增加或減少此值皆使接觸面積以及接觸應力下降，因此推估後續的最佳化結果此值不會有太大改變。

表 4.15 改變沖頭尺寸(1)的接觸應力圖

變數值	4.50(mm)			5.50(mm)					
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積(%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積(%)	標準差			
	0.87	66.08	0.28	1.27	68.69	0.393			
接觸應力圖									
變數值	4.0(mm)			5.0(mm)			6.0(mm)		
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差
	0.65	38.26	0.158	7.5	76.53	1.116	1.89	56.52	0.326
接觸應力圖									

## II. 改變沖頭尺寸 (2)(原尺寸 $\phi 8.1 \pm 0.02\text{mm}$ )

從表 4.16 的結果可看出，圖 4.8 中的尺寸(2)於  $\phi 8.1 \pm 0.02\text{mm}$ ，增

加尺寸使接觸應力和接觸面積降低，減少尺寸會使 o-ring 墊圈突出，因此推測已位於區域最佳解(灰框)，預估後續的最佳化結果此值不會有太大改變。

表 4.16 改變沖頭尺寸(2)的接觸應力圖

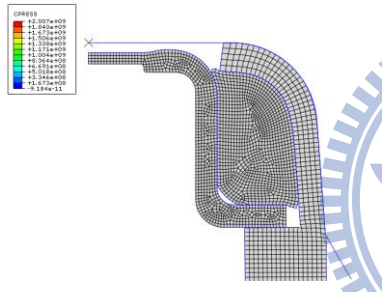
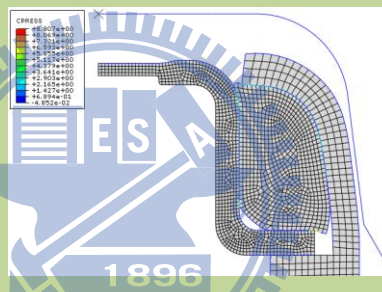
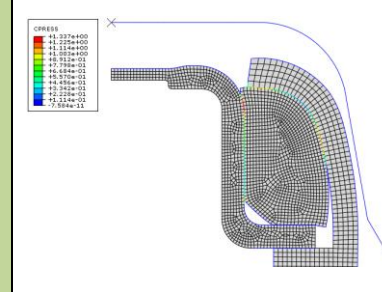
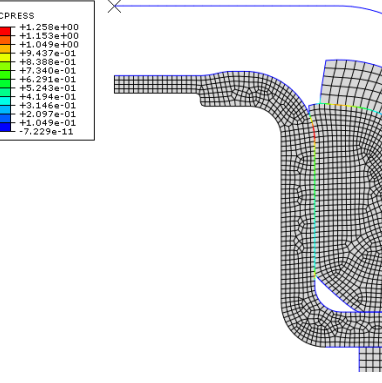
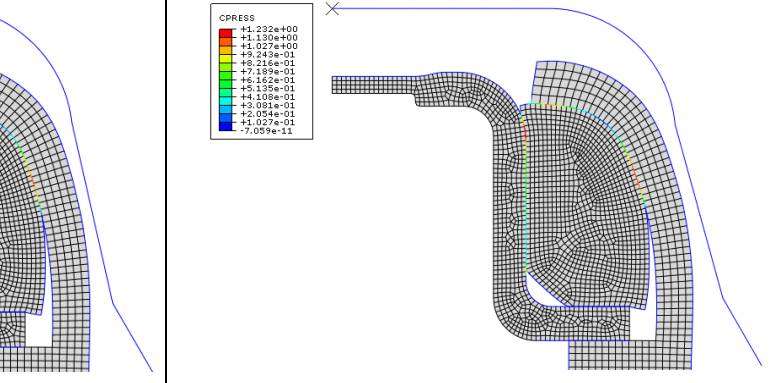
變數值	7.7(o-ring 突出) (mm)			8.1(mm)			8.5(幾乎沒接觸) (mm)		
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差
				7.5	76.53	1.116	≈0	5.21	≈0
接觸應力圖									
變數值	7.9(o-ring 突出) (mm)			8.3(mm)					
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差			
				0.32	19.13	0.061			
接觸應力圖									

### III. 改變沖頭尺寸(3)(原尺寸 $\phi 8.6 \pm 0.02 \text{mm}$ )

從表 4.17 的結果可看出，圖 4.8 中的尺寸(3)於  $\phi 8.6 \pm 0.02 \text{mm}$ ，增

加尺寸使接觸應力和接觸面積降低，減少尺寸時，沖頭壁面會卡到鋼瓶口，造成鋼瓶口側壁扭曲，因此推測已位於區域最佳解(灰框)，預估後續的最佳化結果此值不會有太大改變。

表 4.17 改變沖頭尺寸(3)的接觸應力圖

變數值	8.4(鋼瓶壁面扭曲)(mm)			8.6(mm)			8.8(mm)		
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	標準差	Max.接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	標準差	Max.接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	標準差
				7.5	76.53	1.116	1.33	66	0.4
接觸應力圖									
變數值	9.0(mm)			9.2(mm)					
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	標準差	Max.接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	標準差			
	1.25	64.34	0.38	1.23	63.47	0.38			
接觸應力圖									

IV. 改變沖頭尺寸(4)(原尺寸 R1.5mm)



從表 4.18 的結果可看出，圖 4.8 中的尺寸(4)對於 o-ring 墊圈的接觸應力狀態有明顯的改變，且暫時看不出有收斂的趨勢，因此此值在後續的沖頭最佳化會是變化較大的尺寸。

表 4.18 改變沖頭尺寸(4)的接觸應力圖

變數值	1.3(mm)			1.5(mm)			1.7(mm)		
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差
	0.73	48.69	0.198	7.5	76.53	1.116	5.02	80.82	1.158
接觸應力圖									
變數值	1.4(mm)			1.6(mm)			1.8(變形過度) (mm)		
o-ring 接觸應力	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差	Max.接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差
	0.85	56.52	0.274	3.37	74.78	0.781	11.56	86.95	1.85
接觸應力圖									

由以上的模擬可知，僅改變沖頭的其中一個尺寸並無法得知能否增加 o-ring 的最大接觸應力或接觸面積，且不同的鋼瓶、o-ring 尺寸，

其對應的最佳沖頭外型可能也會不同，為了印證此想法，以及找出對應於特定尺寸組合下最佳的沖頭外型，本研究決定採用最佳化軟體搭配有限元素軟體進行最佳化模擬。

以最佳化軟體 SmartDO 串聯有限元素軟體 ABAQUS 做沖頭尺寸之最佳化，由前面的模擬可知，所有的變數包含鋼瓶口的高度、內徑，o-ring 墊圈的高度和厚度，以及沖頭的四個尺寸，一共有八個尺寸變數，一開始將此八個尺寸變數選定給最佳化軟體執行模擬時，發現軟體會偏向改變沖頭以外的尺寸變數(尤其是 o-ring)，沖頭的尺寸變數幾乎沒有變動；且由於加工精度上的限制以及製造的成本考量，實際製造出的鋼瓶及 o-ring 墊圈尺寸無法達到最佳化模擬結果的尺寸。因此後來本研究選定三組固定的鋼瓶口尺寸、o-ring 墊圈尺寸及封片尺寸來進行沖頭外型最佳化之模擬。由 4.2 節可知，最大接觸應力太小會造成密封性不佳，太大又會因接觸應力標準差過大，同樣使密封性不良，因此在最佳化目標之設定上為達到最大接觸應力，給定的限制為接觸應力標準差小於 3.0(由 4.2 節結果可知接觸應力標準差大於 3.0 漏氣量便會超出標準，不管最大接觸應力多少都一樣)，以及根據 4.2 節模擬 288 組尺寸組合和實驗結果來看，接觸面積需大於 80% 方可達成良好的密封。

表 4.19 最佳化所選定之三組固定尺寸參數

組別	鋼瓶口高度 (mm)	鋼瓶口內徑 (mm)	o-ring 高度 (mm)	o-ring 厚度 (mm)
(I)	3.80	7.55	2.5	1.3
(II)	3.90	7.55	2.3	1.4
(III)	4.00	7.65	2.4	1.5

每一組尺寸之上下界皆做過逐次模擬的測試，每次模擬將變數的上界或下界增加 0.5mm~1.0mm 不等，直到模擬無法收斂，或是收斂解非上下界的值為止。

(I)的尺寸組合，在模擬中 o-ring 墊圈會有突出瓶口、接觸面積卻又不佳的情形，希望能藉由沖頭最佳化，改善 o-ring 墊圈的填充率以及突出的情形。



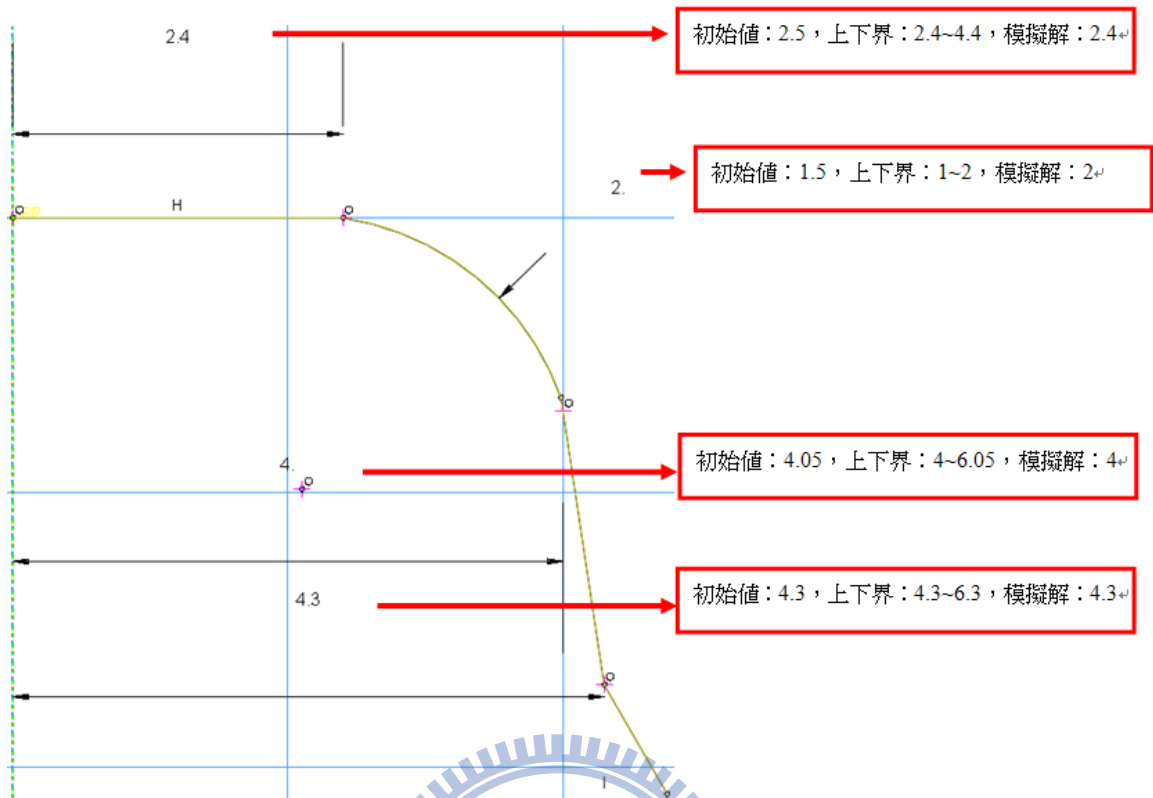


圖 4.9 固定尺寸參數 I 沖頭最佳化結果

最佳化前

最佳化後

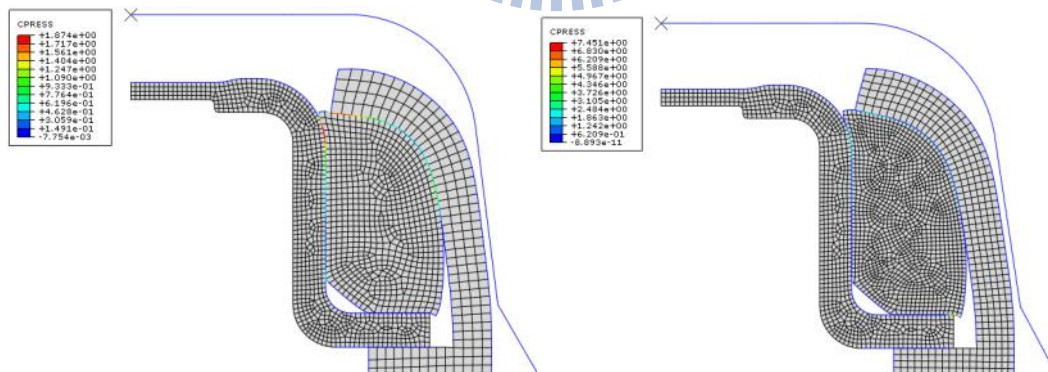


圖 4.10 固定尺寸參數 I 最佳化前後結果接觸應力圖

表 4.20 固定尺寸參數 I 最佳化前後應力狀態

	鋼瓶口高度 (mm)	鋼瓶口內徑 (mm)	o-ring 高度 (mm)	o-ring 厚度 (mm)	最大接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差
最佳化前	3.80	7.55	2.5	1.30	1.85	67.01	0.516
最佳化後					17.6	82.35	2.067

改變後的沖頭大大增加了 o-ring 墊圈的接觸應力和接觸面積，推測此組結果是可以增加鋼瓶的密封性。

(II) 的尺寸組合，在模擬中 o-ring 墊圈的接觸面積以及最大接觸應力情況不佳，希望能藉由沖頭最佳化，改善 o-ring 墊圈的填充率以及增加其接觸應力。

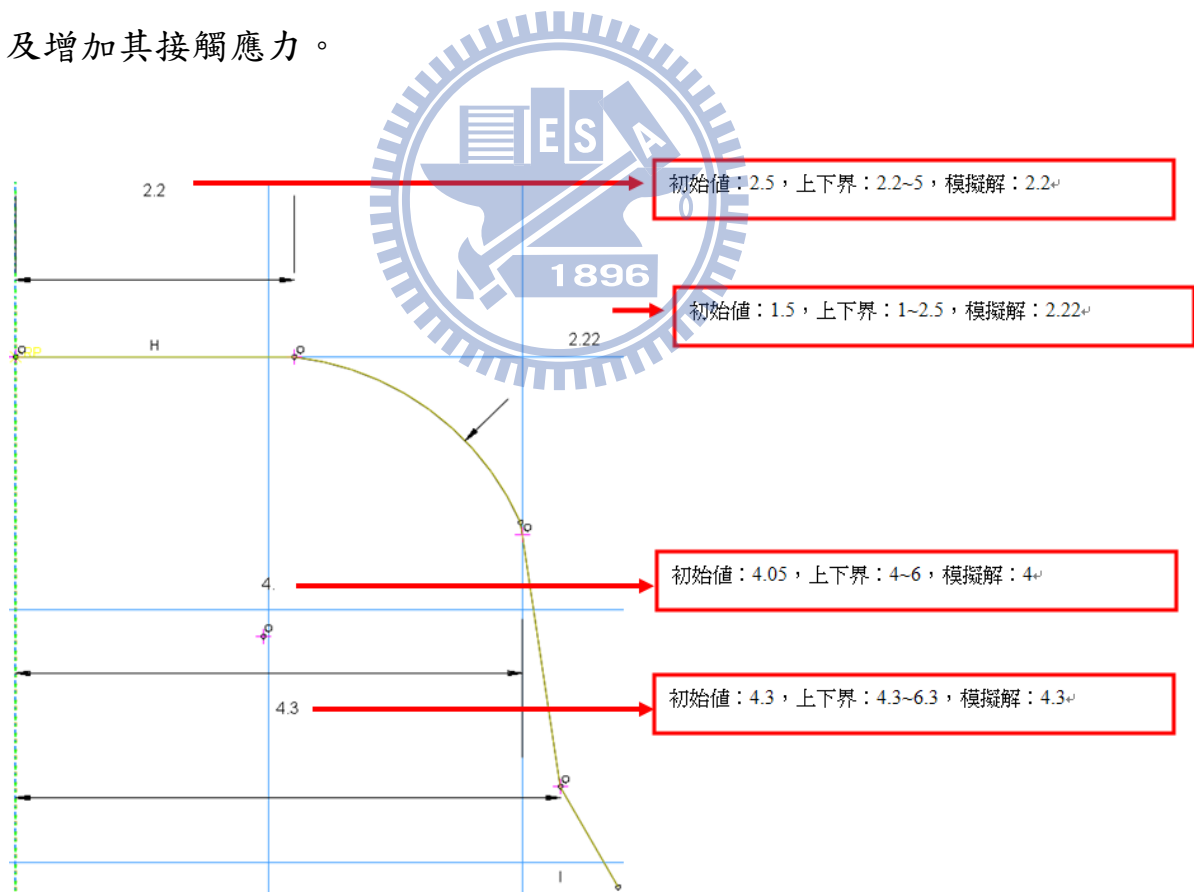


圖 4.11 固定尺寸參數 II 沖頭最佳化結果

最佳化前

最佳化後

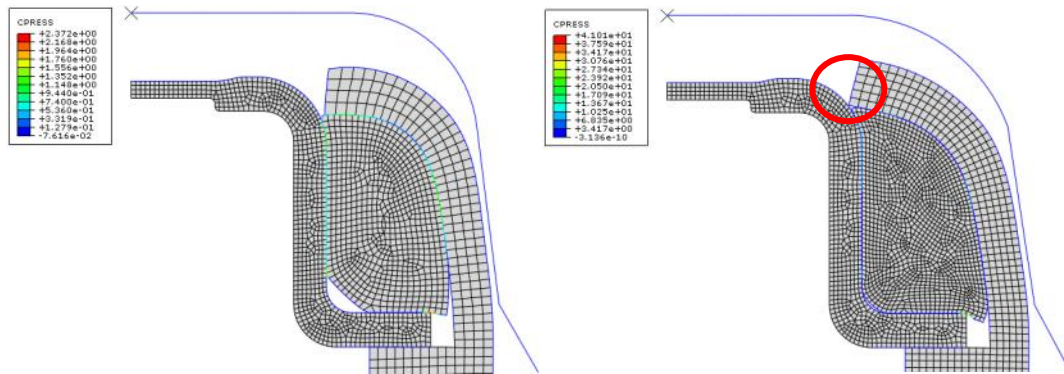


圖 4.12 固定尺寸參數 II 最佳化前後結果接觸應力圖

表 4.21 固定尺寸參數 II 最佳化前後應力狀態

	鋼瓶口高度 (mm)	鋼瓶口內徑 (mm)	o-ring 高度 (mm)	o-ring 厚度 (mm)	最大接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差
最佳化前	3.90	7.55	2.3	1.40	2.01	71.57	0.453
最佳化後					5.18	93.24	1.6

雖然提高 o-ring 墊圈的接觸應力和接觸面積外，但鋼瓶口壁面和金屬封片之間已接近接觸的情形(比較圖 4.12 中的左圖和右圖紅圈處)，若沖頭行程下壓至金屬封片將會造成應力集中現象，因此對密封性的提升也是相對有限的。

(III)的尺寸組合雖然接觸面積和最大接觸應力很高，但 o-ring 外部突出瓶口，內部則變形過度，因此希望藉由沖頭尺寸最佳化消除 o-ring 變形過度的情形。

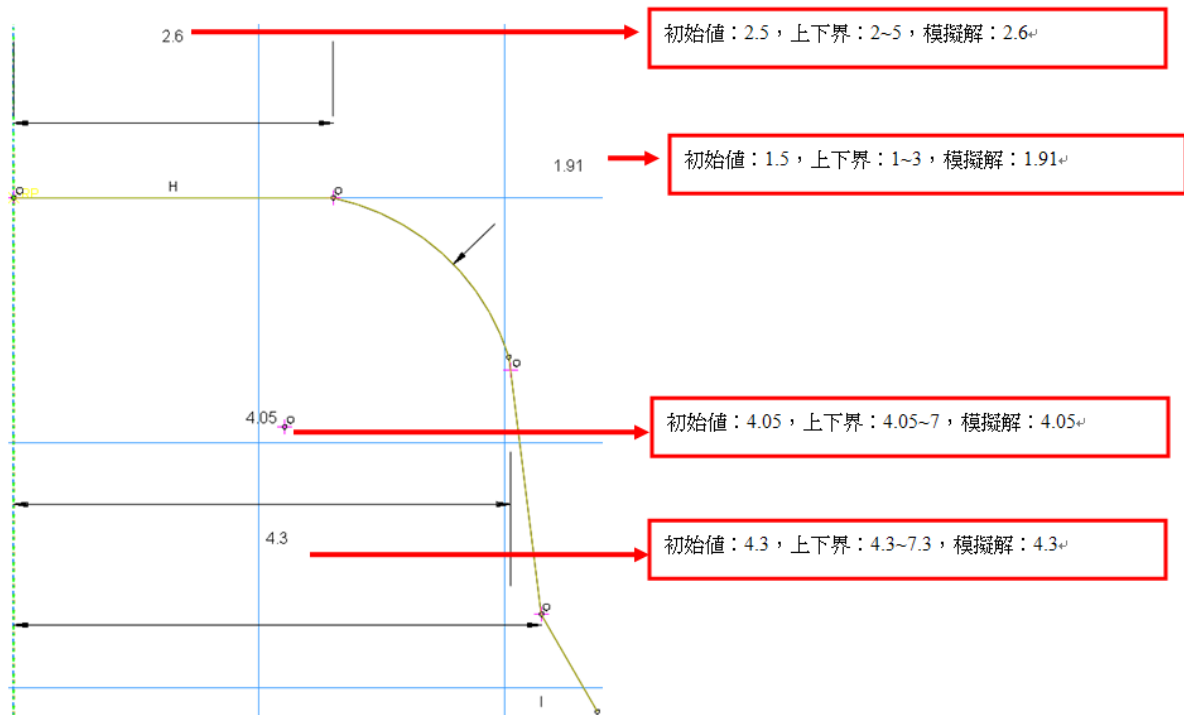


圖 4.13 固定尺寸參數 III 沖頭最佳化結果

最佳化前

最佳化後

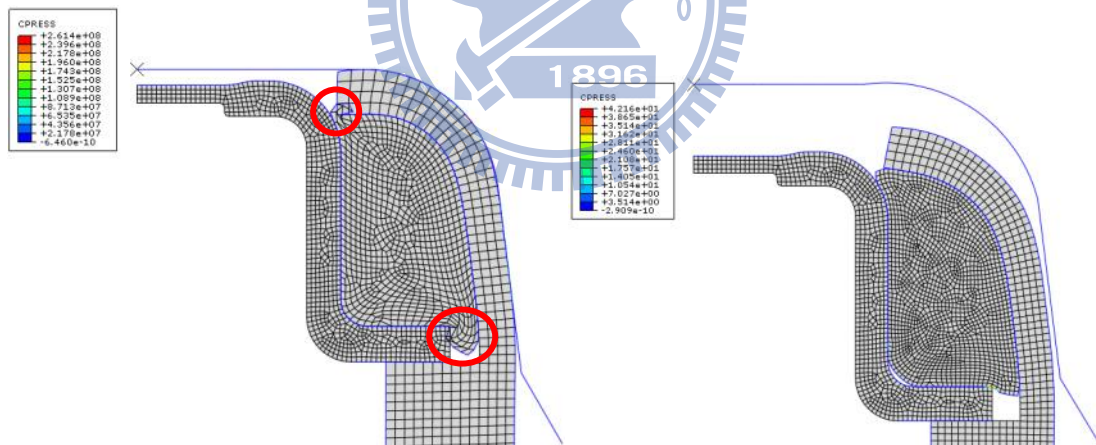


圖 4.14 固定尺寸參數 III 最佳化前後結果接觸應力圖

表 4.22 固定尺寸參數 III 最佳化前後應力狀態

	鋼瓶口高度 (mm)	鋼瓶口內徑 (mm)	o-ring 高度 (mm)	o-ring 厚度 (mm)	最大接觸應力 (MPa)	接觸面積 (%)	標準差
最佳化前	4.00	7.65	2.4	1.50	4.72	93	2.81
最佳化後					6.87	94.06	2.11

o-ring 接觸應力和接觸面積增加有限，雖然有降低 o-ring 墊圈突出情形但並無徹底解決，推測在此狀況中，o-ring 尺寸還是佔有較大的影響力，因此改變沖頭尺寸對結果影響有限。

#### 4.3.2 沖頭外型最佳化的實驗

由最佳化的模擬結果，可知此三組新沖頭尺寸，改變較明顯的是沖頭導圓角的半徑，分別為 1.9、2.0 和 2.2。而在實驗中，由於時間和成本的因素考量，因此目前先從三組改變的沖頭尺寸中(表 4.19)，挑出表現較佳的一組來開模做實驗，因此委請廠商開模製造倒圓角半徑為 2.0 的新沖頭後，再針對此三組鋼瓶尺寸組合做封口以及密封性的實驗，以驗證最佳化的結果。實驗結果如表 4.23、表 4.24 所示：

表 4.23 舊版沖頭對三組尺寸之漏氣量測定

鋼瓶口高度(mm)	鋼瓶口內徑(mm)	o-ring厚度(mm)	o-ring高度(mm)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	標準差	實驗值(單位:公克/天)
3.80	7.55	2.5	1.30	1.85	67.01	0.516	<b>0.004189</b>
3.90	7.55	2.3	1.40	2.01	71.57	0.453	0.003251
4.00	7.65	2.4	1.50	4.72	93	2.81	0.000542

表 4.24 新版沖頭對三組尺寸之漏氣量測定

鋼瓶口高度(mm)	鋼瓶口內徑(mm)	o-ring厚度(mm)	o-ring高度(mm)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	標準差	實驗值(單位:公克/天)
3.80	7.55	2.5	1.30	17.6	82.35	2.067	<b>0.002846</b>
3.90	7.55	2.3	1.40	5.18	93.24	1.6	0.005004
4.00mm	7.65mm	2.4mm	1.50mm	6.87	94.06	2.11	0.001241



由實驗情形可知，新沖頭僅對第一組特定尺寸有增加密封性的效果，對於第二組和第三組，其密封性不增反減；從模擬的角度來看，因為沖頭最佳化的結果會因為不同的鋼瓶尺寸、不同的 o-ring 尺寸而不同，所以最佳化模擬中沖頭 R 角=2.0 所對應的尺寸組合，在實驗中也能看出只能對此尺寸組合有增加密封性的效果，若是用此組最佳化沖頭去為其他尺寸的鋼瓶和 o-ring 墊圈做沖壓封口，則不僅無法提升密封性還會增加漏氣量。因此也可推測在未來若有類似產品欲提升密封性，應先行確定鋼瓶和 o-ring 等尺寸，接下來才是根據這些特定尺寸去將沖頭外型最佳化，方能達成互相配合、提升密封性的效果。

#### 4.4 鋼瓶內壓的模擬

在 3.4.3 節中，提到將會模擬數組特定尺寸施加均佈壓力 8MPa 在 o-ring 墊圈的縫隙上觀察對成形性及接觸應力的影響，以下將模擬實驗中四組密封性最佳及四組密封性最差的尺寸組合，並比較有無施加均部內壓，以及不同均部內壓的情形。

施加方式如圖 4.15 所示，先將 o-ring 墊圈建立成 meshpart，再依照後處理中 o-ring 墊圈的接觸應力圖判斷哪幾個網格是沒有接觸到鋼瓶壁面，給定這幾個網格 8MPa 均部內壓，經由 2~4 次的反覆模擬與增加均部內壓的網格範圍，直到所有產生縫隙的網格都有施加均部內壓為止。

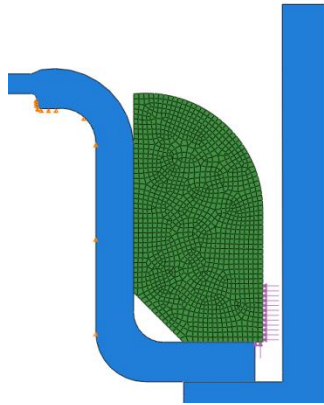


圖 4.15 施加 o-ring 墊圈縫隙均部內壓

(1)~(4)組為實驗中密封性較佳的尺寸組合，施加 o-ring 墊圈縫隙均部內壓的結果。

(1)鋼瓶高度:3.80mm，鋼瓶內徑:7.60mm，o-ring 墊圈高度:2.4mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.4mm

表 4.25 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(1)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	7.41654	86.76471	1.8366
4	7.62776	83.82353	1.3927
2	6.62192	77.94118	1.0161
0	6.19019	75.51020	0.9981

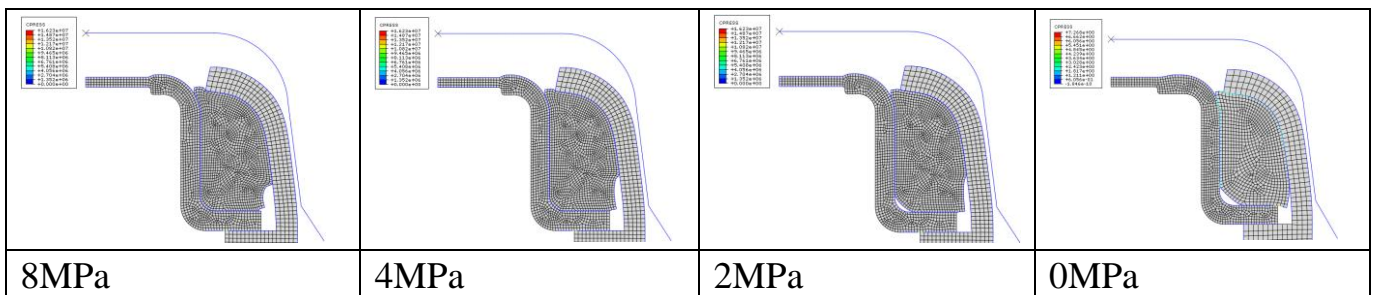


圖 4.16 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(1)

(2)鋼瓶高度:3.80mm，鋼瓶內徑:7.65mm，o-ring 墊圈高度:2.3mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.5mm

表 4.26 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(2)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	7.95184	88.86131	1.8993
4	5.93307	87.94161	1.4527
2	4.19980	86.29197	1.0401
0	3.48523	85.71429	0.9841

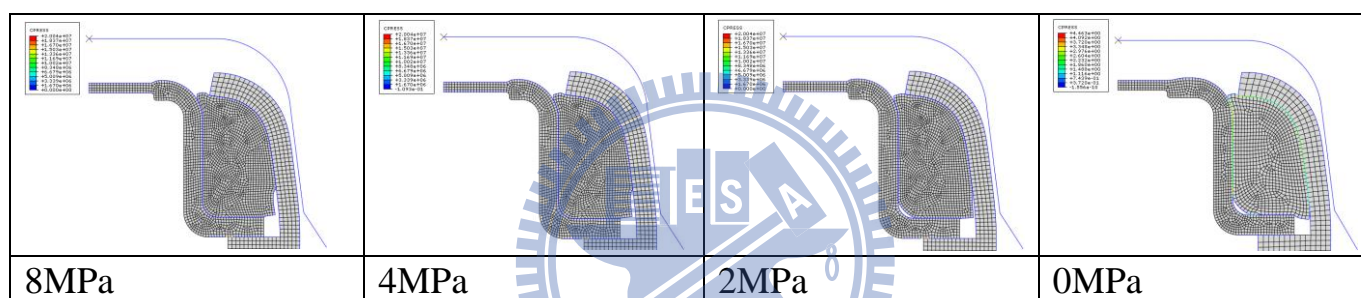


圖 4.17 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(2)

(3) 鋼瓶高度:3.85mm，鋼瓶內徑:7.60mm，o-ring 墊圈高度:2.4mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.4mm

表 4.27 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(3)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	9.95184	86.86131	1.8993
4	8.53070	83.82353	1.3601
2	7.54616	79.41176	1.1803
0	7.49975	76.53061	1.1161

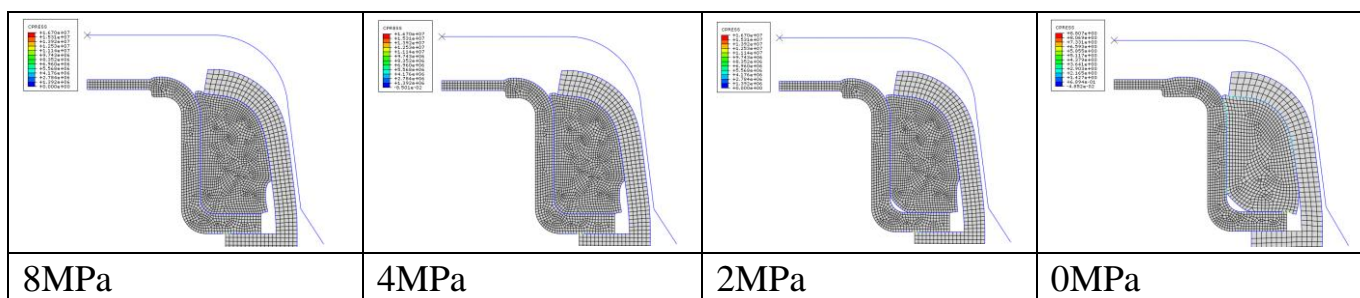


圖 4.18 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(3)

(4) 鋼瓶高度:3.80mm，鋼瓶內徑:7.50mm，o-ring 墊圈高度:2.3mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.4mm

表 4.28 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(4)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	9.26714	87.12121	2.4747
4	8.04546	87.12121	1.5060
2	7.21127	86.81818	1.3740
0	6.12959	85.81081	1.2859

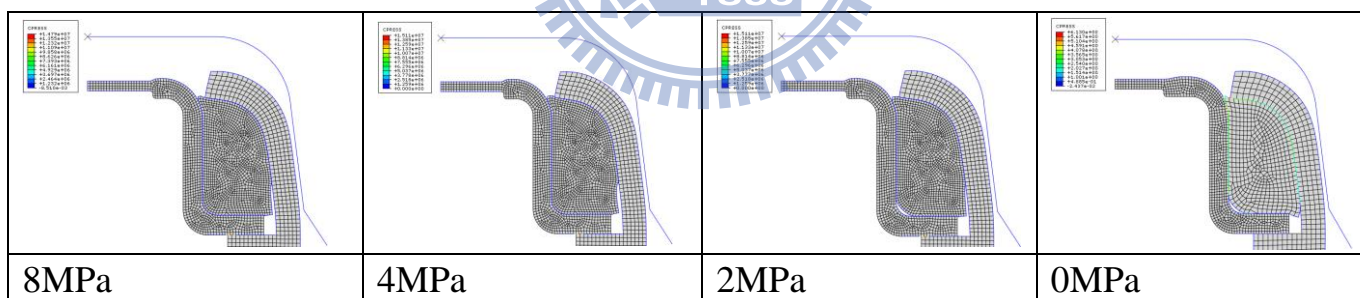


圖 4.19 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(4)

以上四組模擬，由表可以看出，施於 o-ring 墊圈的內壓越大，雖然接觸面積和最大接觸應力隨之增加，但接觸應力標準差也越大，故推測密封性也會越差；若施於 o-ring 墊圈的內壓小於 2MPa 則對 o-ring 墊圈接觸應力狀態沒有顯著的影響；而由圖則可以看出施於 o-ring 墊

圈的內壓越大，雖然能使 o-ring 墊圈填補與金屬封片之間的縫隙，但也會使 o-ring 墊圈變形更嚴重，以及更有可能會凸出瓶口。

(5)~(8)組為實驗中密封性較差的尺寸組合，施加 o-ring 墊圈縫隙均部內壓的結果。

(5)鋼瓶高度:4.00mm，鋼瓶內徑:7.55mm，o-ring 墊圈高度:2.3mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.4mm

表 4.29 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(5)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	10.9659	88.63636	2.6669
4	6.23904	88.63636	1.5150
2	4.35997	83.33333	0.9989
0	3.10910	80.90909	0.8330

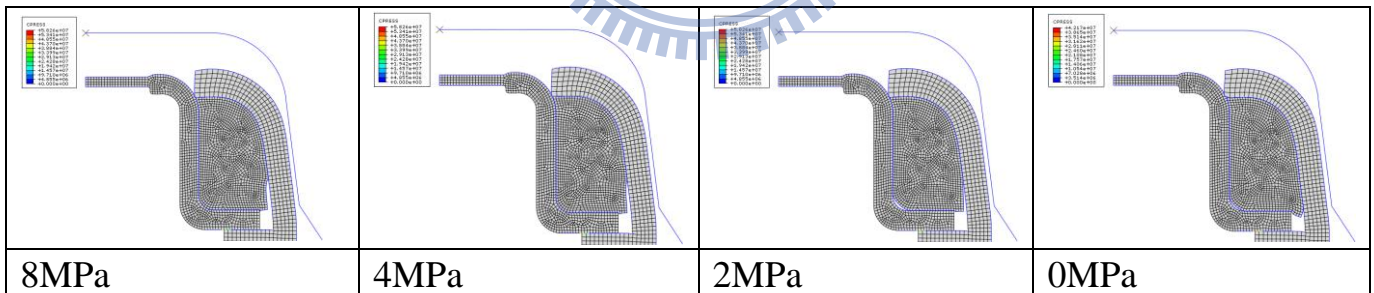


圖 4.20 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(5)

(6)鋼瓶高度:3.95mm，鋼瓶內徑:7.55mm，o-ring 墊圈高度:2.3mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.4mm

表 4.30 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(6)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	22.2806	88.63636	3.2905
4	10.5858	92.42424	1.9033
2	9.72651	91.6667	1.5060
0	8.44945	90.90909	1.1595

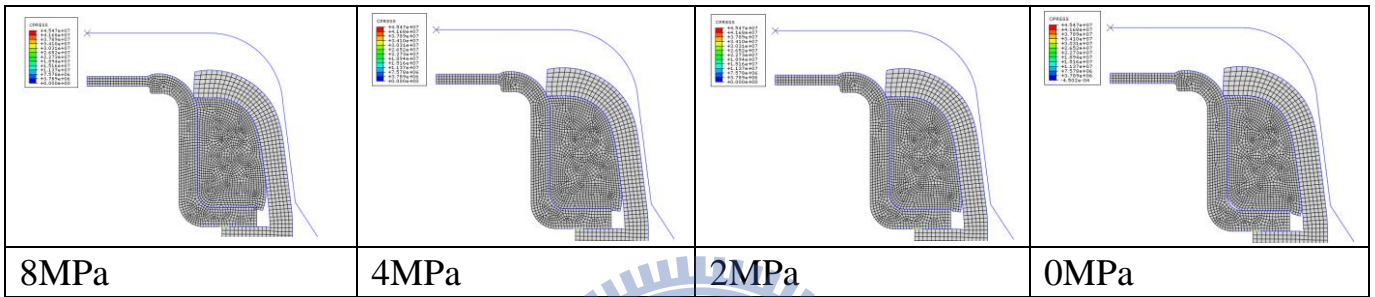


圖 4.21 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(6)

(7)鋼瓶高度:3.95mm，鋼瓶內徑:7.55mm，o-ring 墊圈高度:2.4mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.3mm

表 4.31 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(7)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	9.37654	89.77273	2.0568
4	5.84813	84.84848	1.0953
2	4.03514	79.54545	0.6501
0	0.96973	64.77273	0.2600

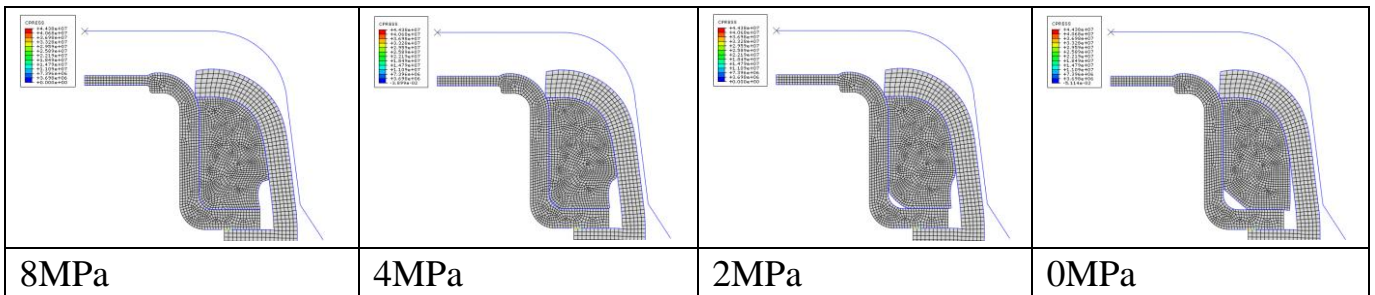


圖 4.22 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(7)

(8)鋼瓶高度:3.80mm，鋼瓶內徑:7.55mm，o-ring 墊圈高度:2.5mm，  
o-ring 墊圈厚度:1.3mm

表 4.32 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力狀態(8)

內壓(MPa)	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
8	8.93047	83.82353	1.5266
4	9.18985	88.97059	1.7296
2	7.61250	83.82353	1.3803
0	6.63450	80.14706	1.1024

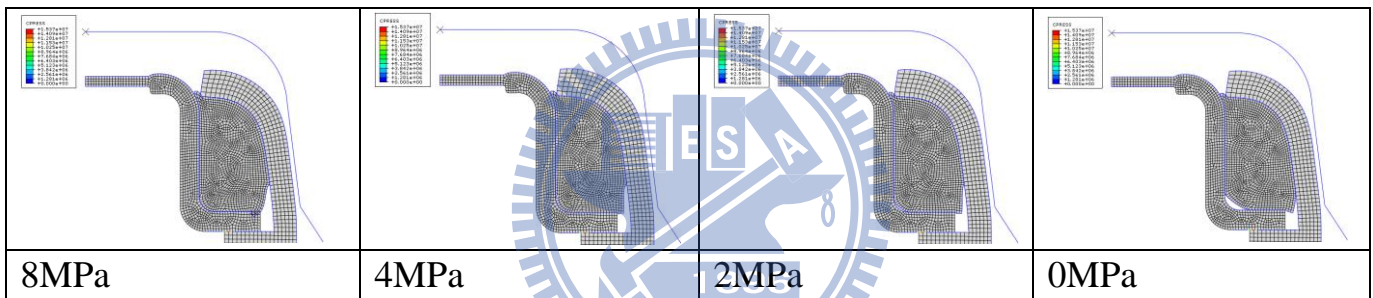


圖 4.23 施加均部內壓的 o-ring 墊圈接觸應力圖(8)

由以上圖表可知，作用於 o-ring 墊圈的內壓越大，因為瓶口接觸到金屬封片的因素，使 o-ring 墊圈於瓶口處無法凸出，造成 o-ring 墊圈應力集中的情形更為嚴重，使接觸應力更不平均，密封性更差。

本研究中的鋼瓶內壓為 8MPa，雖然從 o-ring 墊圈的接觸應力狀態可看出和 0MPa 有段落差，但其趨勢卻都一致：內壓越大，最大接觸應力、接觸面積和接觸應力標準差越大，因此推測在模擬中有無針對 o-ring 墊圈施加均部內壓，對 o-ring 墊圈接觸應力的整體趨勢及實

驗尺寸的選擇影響不大，三個接觸應力準則仍可用來判斷高壓鋼瓶知密封性是否良好；而從 o-ring 墊圈的接觸應力圖也可以發現，內壓越大，o-ring 墊圈變形越嚴重，越有可能會凸出瓶口；而對鋼瓶口接觸到金屬封片的尺寸組合而言，則會造成 o-ring 墊圈應力集中，使接觸應力分佈更不平均，因此對密封性較差的尺寸組合而言，於 o-ring 墊圈縫隙施加均部內壓更能看出其密封性不佳的情形。

在本章節中，首先改變鋼瓶和 o-ring 墊圈尺寸，以模擬和實驗的方式探討 o-ring 墊圈的最大接觸應力、接觸面積以及接觸應力標準差是否能當作決定密封性的因素；接著模擬各種鋼瓶和 o-ring 墊圈尺寸組合，並從中挑出數組進行實驗，以找出接觸應力和密封性的關係，以此關係可進一步由模擬中所獲得 o-ring 墊圈接觸應力的資訊，來判斷特定的尺寸組合，是否符合漏氣量標準，以及密封性是否良好，再應用這個判斷的方式去將沖頭外型做最佳化的探討；並於最後以模擬的方式討論不同的鋼瓶內壓施加於 o-ring 墊圈所造成的影響。



## 第五章 結論及後續工作

### 5.1 結論

目前本研究已完成高壓鋼瓶封口之模型與模擬，也完成沖頭外型之最佳化模擬，並與實驗對照模擬結果，結論如下：

(1)由文獻回顧可知，影響封片的密封性取決於三個因素：最大接觸應力、接觸面積和接觸應力平均程度，但由於本研究不是以封片當作主要密封元件，而是以 o-ring 墊圈當作主要密封元件，因此必須先驗證此三個因素是否也能當作決定 o-ring 墊圈密封性的因素。由模擬來看，增高鋼瓶口高度，可以提升最大接觸應力及接觸面積，但在鋼瓶口超過 3.90mm 後，會在金屬封片以及 o-ring 墊圈造成集中應力，使應力標準差急遽上升，代表應力分佈變的不平均，從實驗來看增加鋼瓶口高度至 3.90mm 後漏氣量也超出標準；鋼瓶口內徑越大，在不增加 o-ring 墊圈的厚度下，側邊會產生的縫隙越大，接觸應力和接觸面積越小，從實驗結果也可知密封效果越差，因此鋼瓶口內徑尺寸必須搭配 o-ring 墊圈的厚度去調整，才能達到緊配的效果；o-ring 墊圈高度適當的增加，可以使鋼瓶口上方的縫隙減小，增加接觸面積，從實驗結果也可以得知確實可以有效增加密封性；但若高度增加太多，則會造成 o-ring 墊圈突出瓶口表面，造成應力集中、變形過度，影響美觀與封口效果；o-ring 墊圈的厚度增加，於適當範圍內可以填補鋼

瓶口內側邊的縫隙，增加接觸面積，由實驗結果也可看出能夠有效提升密封性；但若厚度超過鋼瓶口內徑，則會無法將 o-ring 墊圈完整的塞入瓶口，使鋼瓶口無法密合，所以 o-ring 墊圈的厚度尺寸也要搭配鋼瓶口內徑去調整，才能達到良好的密封性。

(2)將鋼瓶口高度、內徑，o-ring 墊圈高度、厚度等四種參數做交互搭配(共 288 組)模擬，得到的結果分為兩種，第一種為接觸應力、接觸面積和接觸應力標準差都在平均值內，另一種則是極端壓迫情形，o-ring 墊圈變形嚴重，但鋼瓶口與金屬封片、o-ring 墊圈接觸應力極大。分別對此兩種情形做實驗，由實驗結果顯示，最大接觸應力和接觸應力標準差呈現一線性關係，由此關係與實驗數據對應，便可找出安全漏氣範圍內，所對應模擬的接觸應力之數值範圍，且也可由實驗得知，極端壓迫之尺寸組合其密封情形並不佳。在安全漏氣範圍內更進一步去尋找漏氣量較少的組合，發現大多存在於延線性方向、剛進入安全漏氣範圍的接觸應力值，由模擬可知因為接觸應力過小，將沒有足夠壓應力去產生良好的密封性，而接觸應力越大，標準差也越大，應力分佈越不平均，造成的漏氣量也越大。而未來針對此類密封情形的改良，可以先由有限元素模擬找出最大接觸應力與接觸應力標準差之線性關係，從中挑出數組實驗，找出漏氣的安全範圍後，再從範圍內的尺寸模擬中，找出延線性方向剛進入漏氣安全範圍的接觸應力組

合所對應之尺寸組合，如此一來便可具體的改善鋼瓶的密封性。

(3)最佳化沖頭外型的模擬則是先從 288 組不同的鋼瓶尺寸以及 o-ring 墊圈尺寸組合中，挑出 3 組初始接觸應力狀態較差的尺寸組合來做模擬。最佳化的條件為：固定這些尺寸，改變沖頭外型的尺寸，希望能增加接觸應力最大值，限制接觸面積在一定值以上(80%)、接觸應力標準差在一定值以下(3.0)。模擬結果顯示，沖頭的圓角尺寸影響較大，因此選出其中一組最佳化後的沖頭尺寸開模做實驗。由實驗結果得知，改變尺寸後的沖頭和模擬中與之相對應的尺寸組合，所增加的密封性較為顯著，而對其他組尺寸組合來說，增加密封性的效果較不明顯，因此可以得知，增加密封性除了改變鋼瓶以及 o-ring 墊圈的尺寸外，選擇相對應鋼瓶以及 o-ring 墊圈的尺寸的沖頭外型，也可以增加鋼瓶密封性；而未來若欲針對沖頭外型做改良，應先行確定所要製造的鋼瓶和 o-ring 墊圈尺寸，再針對此尺寸組合做沖頭外型之最佳化，方能達到增加密封性的效果。

## 5.2 後續工作

後續工作可探討不同的金屬封片外型以及 o-ring 墊圈外型對密封性的影響，而 o-ring 墊圈的橡膠硬度，可再做更廣泛的實驗，以便更加真實的模擬橡膠的變形情形和對漏氣量的影響。而若是其他種類的鋼瓶，其密封方式若也是運用 o-ring 墊圈做封口，可先以本研究的方

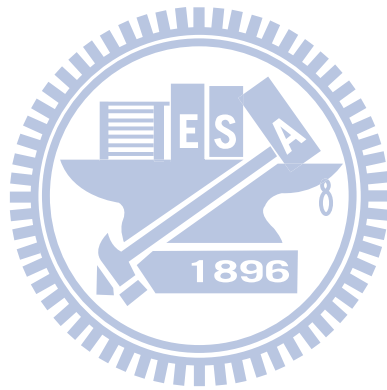
式，運用模擬和實驗找出密封性較佳的組合，再去比較與本研究所得結論之差異性；在鋼瓶內壓的部分，由於必須以手動的方式給定 o-ring 墊圈一均部內壓，若以此方式去進行模擬，在多組尺寸組合以及最佳化模擬的情況下便難以進行，因此本研究並沒有考慮 o-ring 墊圈承受氣體壓力的情形，後續可用 fluid element[12]或以其他方式進一步的模擬高壓氣體對 o-ring 墊圈的影響，以便能更真實反映出 o-ring 墊圈接觸應力狀態和變形的狀況；在沖頭最佳化部分，由於本研究僅針對其中一組尺寸做開模實驗，若後續要針對沖頭外型做深入研究，可再挑選數組鋼瓶尺寸密封性較好的組合，去做沖頭最佳化的模擬與實驗，進一步提升密封性與更了解沖頭外型對密封性的影響。



## 參考文獻

- [1] D. Burgess, “Nonmetallic gaskets: Avoiding leaks and blow outs”, Plant Engineering, 1999 Oct; 60-64.
- [2] H. Champlaud and N. V. Lê, “Prediction of the leakage pressure of a cap and bottle assembly using the finite element method”, Glass Technology, 2003; 44(6):225-230.
- [3] G. Boqin, C. Ye, and Z. Dasheng, “Prediction of leakage Rates Through Sealing Connections with Nonmetallic Gaskets”, Nanjing University of Technology, 2007; 15(6):837-841.
- [4] Y. Matsuzaki, K. Hosokawa, and K. Funabashi, “Effect of Surface Roughness on Contact Pressure of Static Seals”, JSME International Journal, Series III, 1992; 35(3):119-124.
- [5] 許嘉元, “金屬密封塑性變形研究”, 國立台灣大學機械工程學系研究所碩士論文, 2000。
- [6] J. Arghavani, M. Derenne, and L. Marchand, “Effect of Surface Characteristics on Compressive Stresses and Leakage Rate in Gasketed Flanged Joints”, Advanced Manufacturing technology, 2003; 21:713-732.
- [7] 左亮, “橡膠 Mooney-Rivlin 模型材料系數的一種確定方法”, 西南交通大學, 2008。
- [8] S. Y. Chen, “SmartDO Version 2.0 Manuals”, FEA-Opt Technology, 2008.
- [9] 劉福興、鄭偉盛, 『沖壓模設計』, 新文京開發出版有限公司, 2002。
- [10] 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。
- [11] 康淵、陳信吉, 『ANSYS 入門』, 修訂四版, 全華, 2007。
- [12] ABAQUS 6.8-1 HTML Documentation.

- [13] 士盟科技股份有限公司，<http://www.simutech.com.tw>。
- [14] 愛發股份有限公司，『 ABAQUS 實務入門引導』，初版，全華，2005。
- [15] 元翎精密工業股份有限公司，<http://www.twmosa.com>。
- [16] 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研究所碩士論文，2009。
- [17] 李曉芳，“封隔器膠筒接觸應力的有限元分析”，福建福州大學，2005。



## 附錄 A 連接 SmartDO 和 ABAQUS/Standard 的程式碼

```
# -*- coding: mbc8 -*-
#
# Abaqus/CAE Version 6.8-1 replay file
# Internal Version: 2008_05_02-13.37.42 86896
# Run by six on Wed Dec 23 11:55:48 2009
#

# from driverUtils import executeOnCaeGraphicsStartup
# executeOnCaeGraphicsStartup()
#: Executing \"onCaeGraphicsStartup()\" in the site directory ...
from abaqus import *
from abaqusConstants import *
session.Viewport(name='Viewport: 1', origin=(0.0, 0.0), width=192.98516061902,
    height=190.634765625)
session.viewports\['Viewport: 1'\].makeCurrent()
session.viewports\['Viewport: 1'\].maximize()
from caeModules import *
from driverUtils import executeOnCaeStartup
executeOnCaeStartup()
openMdb(pathName='C:/Temp/cylinder.cae')
#: The model database \"C:\\Temp\\cylinder.cae\" has been opened.
session.viewports\['Viewport: 1'\].setValues(displayedObject=None)
p = mdb.models\['Model-1'\].parts\['NN08-03-E'\]
session.viewports\['Viewport: 1'\].setValues(displayedObject=p)
p1 = mdb.models\['Model-1'\].parts\['punch'\]
session.viewports\['Viewport: 1'\].setValues(displayedObject=p1)
p = mdb.models\['Model-1'\].parts\['punch'\]
s = p.features\['Wire-1'\].sketch
mdb.models\['Model-1'\].ConstrainedSketch(name='__edit__', objectToCopy=s)
s1 = mdb.models\['Model-1'\].sketches\['__edit__'\]
g, v, d, c = s1.geometry, s1.vertices, s1.dimensions, s1.constraints
s1.setPrimaryObject(option=SUPERIMPOSE)
p.projectReferencesOntoSketch(sketch=s1, upToFeature=p.features\['Wire-1'\],
    filter=COPLANAR_EDGES)
DV001 = $smartdo_x(1)
DV002 = $smartdo_x(2)
```

```

DV003 = $smartdo_x(3)
DV004 = $smartdo_x(4)
d\[0\].setValues(value=DV001, )
d\[2\].setValues(value=DV002, )
d\[4\].setValues(value=DV003, )
d\[1\].setValues(value=DV004, )
s1.unsetPrimaryObject()
p = mdb.models\[ 'Model-1' \].parts\[ 'punch' \]
p.features\[ 'Wire-1' \].setValues(sketch=s1)
del mdb.models\[ 'Model-1' \].sketches\[ '__edit__' \]
p = mdb.models\[ 'Model-1' \].parts\[ 'punch' \]
p.regenerate()
a = mdb.models\[ 'Model-1' \].rootAssembly
a.regenerate()
a = mdb.models\[ 'Model-1' \].rootAssembly
session.viewports\[ 'Viewport: 1' \].setValues(displayedObject=a)
session.viewports\[ 'Viewport: 1' \].assemblyDisplay.setValues(mesh=ON)
session.viewports\[ 'Viewport: 1' \].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
    meshTechnique=ON)
a = mdb.models\[ 'Model-1' \].rootAssembly
partInstances =(a.instances\[ 'punch-1' \], )
a.generateMesh(regions=partInstances)
session.viewports\[ 'Viewport: 1' \].assemblyDisplay.setValues(mesh=OFF)
session.viewports\[ 'Viewport: 1' \].assemblyDisplay.meshOptions.setValues(
    meshTechnique=OFF)
import job
mdb.jobs\[ 'cylinder' \].submit(consistencyChecking=OFF)
mdb.jobs\[ 'cylinder' \].waitForCompletion()
#: The job input file \"cylinder.inp\" has been submitted for analysis.
#: Job cylinder: Analysis Input File Processor completed successfully.
#: Job cylinder: Abaqus/Standard completed successfully.
#: Job cylinder completed successfully.
import visualization
o3 = session.openOdb(name='C:/Temp/cylinder.odb')
#: Model: C:/Temp/cylinder.odb
#: Number of Assemblies:          1
#: Number of Assembly instances: 0
#: Number of Part instances:      4

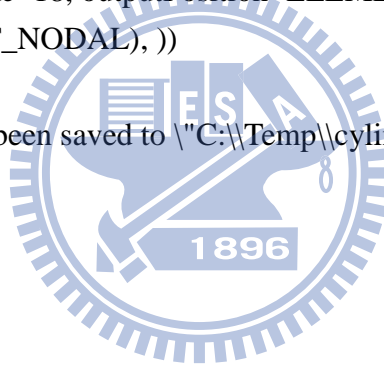
```



```

#: Number of Meshes:          4
#: Number of Element Sets:    3
#: Number of Node Sets:       4
#: Number of Steps:           2
session.viewports\['Viewport: 1'\].setValues(displayedObject=o3)
session.viewports\['Viewport: 1'\].odbDisplay.display.setValues(plotState=(
    CONTOURS_ON_DEF, ))
session.viewports\['Viewport: 1'\].view.setValues(nearPlane=67.8488,
    farPlane=93.5774, width=6.11329, height=4.541, viewOffsetX=-0.92217,
    viewOffsetY=5.02598)
leaf = dgo.LeafFromPartInstance(partInstanceName=('O-RING', ))
session.viewports\['Viewport: 1'\].odbDisplay.displayGroup.replace(leaf=leaf)
odb = session.odbs\['C:/Temp/cylinder.odb^']
session.fieldReportOptions.setValues(sort=DESCENDING)
session.writeFieldReport(fileName='CPRESS.txt', append=OFF, sortItem='CPRESS',
    odb=odb, step=1, frame=18, outputPosition=ELEMENT_NODAL, variable=((
    'CPRESS', ELEMENT_NODAL), ))
mdb.save()
#: The model database has been saved to \"C:\\Temp\\cylinder.cae\".

```



## 附錄 B SmartDO 的其他程式碼

### 目標函數

```
catch { file delete -force cylinder.lck }
catch { file delete -force CPRESS.txt }

smartdo exetcl cylinder01.py cylinder02.py

catch { exec abaqus cae noGUI=cylinder02.py }

set File001 [open "CPRESS.txt" "r"]
while { [gets $File001 String001] != -1 } {

    if { [string first "Total" $String001] != -1 } {
        set smartdo_obj [lindex $String001 1]
        set smartdo_obj [expr 500-$smartdo_obj]
    }
}
close $File001
```



### 限制條件

```
set File001 [open "CPRESS.txt" "r"]
set Line 1
set totalcpress 0
set Totaline 0
set sumcpress 0
while { [gets $File001 String001] != -1 } {

    set Totaline [expr $Totaline+1]
}
set Totaline [expr $Totaline-32]

close $File001
```

```

set File001 [open "CPRESS.txt" "r"]
while { [gets $File001 String001] != -1 } {

    if { [string first "@Loc" $String001] != -1 } {
        gets $File001 String001
        gets $File001 String001
        set Line 20
    }

    if {$Line > 19} {
        set cpress [lindex $String001 3]
        set totalcpress [expr $totalcpress+$cpress]
        set Line [expr $Line+1]
    }

}

if {$Line > $Totaline} {
    break
}

}

set line [expr $Line-20]
set mean [expr $totalcpress/$Line]

close $File001

set File001 [open "CPRESS.txt" "r"]
while { [gets $File001 String001] != -1 } {

    if { [string first "@Loc" $String001] != -1 } {
        gets $File001 String001
        gets $File001 String001
        set Line 20
    }

    if {$Line > 19} {
        set cpress [lindex $String001 3]
        set cpress [expr $cpress-$mean]
        set sumcpress [expr $sumcpress+$cpress*$cpress]
        set Line [expr $Line+1]
    }
}

```



```

    }
    if {$Line > $Totaline} {
        break
    }
    set line [expr $line-1]
}

set smartdo_cnstrn(1) [expr $sumcpress/$line]
set smartdo_cnstrn(1) [expr sqrt($smartdo_cnstrn(1))-3]

close $File001

#
=====
#constraint2:the contact area must higher than 80%
=====
set File001 [open "CPRESS.txt" "r"]
while { [gets $File001 String001] != -1} {
    if { [string first "@Loc" $String001] != -1} {
        gets $File001 String001
        gets $File001 String001
        set Line 20
    }

    if {$Line > 19} {
        set cpress [lindex $String001 3]
        set Line [expr $Line+1]
    }

    if {$cpress < 10e-6} {
        break
    }
}

set smartdo_cnstrn(2) [expr -(($Line-1)/$Totaline)+0.8]
close $File001

```

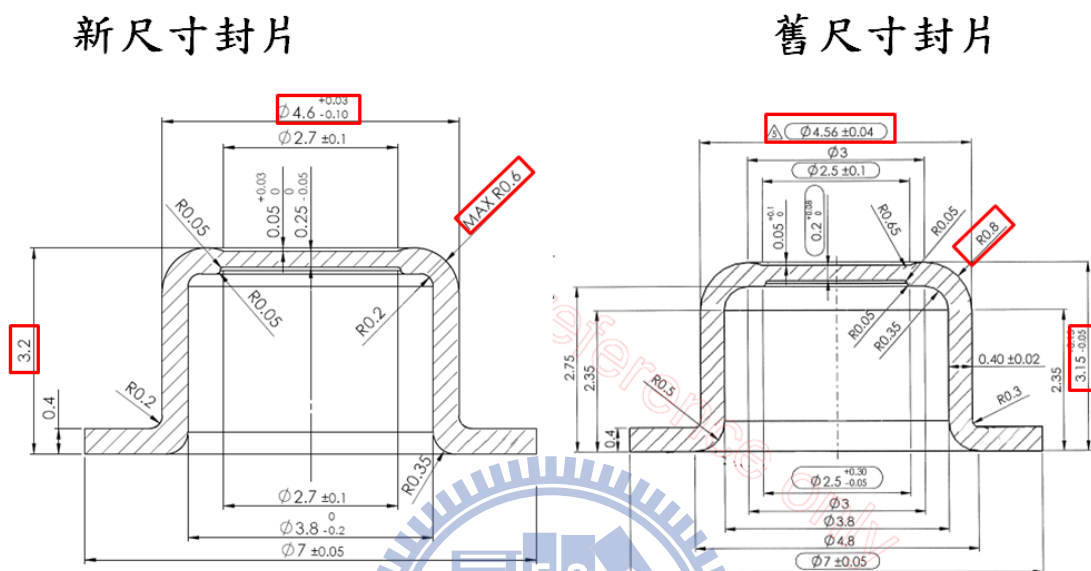
## 變數資料檔案(初始值&上下界)

```
set smartdo_ioptmzr 1
set smartdo_idflt 12
#
# model parameters
#
set smartdo_ndv 4
set smartdo_ncnstrn 2
#
# design variables
#
set smartdo_x(1) 2.5
set smartdo_xl(1) 2
set smartdo_xu(1) 5
#
set smartdo_x(2) 4.05
set smartdo_xl(2) 4.05
set smartdo_xu(2) 7
#
set smartdo_x(3) 4.3
set smartdo_xl(3) 4.3
set smartdo_xu(3) 7.3
#
set smartdo_x(4) 1.5
set smartdo_xl(4) 1
set smartdo_xu(4) 1.9
#
smartdo filobj cylinder_obj.tcl
smartdo filcns cylinder_cns.tcl
```



## 附錄 C 改變金屬封片尺寸的模擬與實驗

初步後續工作之一，由元翎精密工業變更金屬封片尺寸，應用本研究之結論進行模擬與實驗。新版與舊版之金屬封片外型如下圖所示

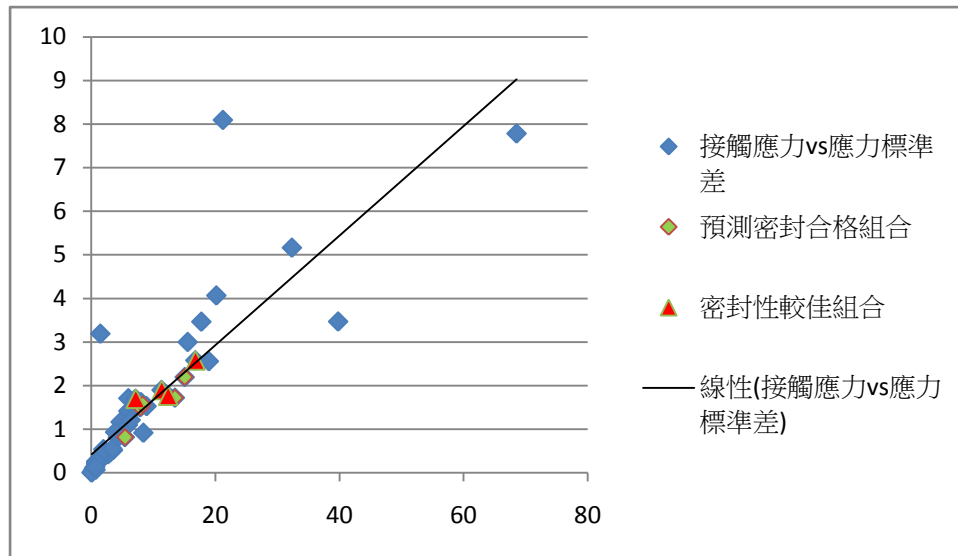


主要變動較大的尺寸如圖中紅框所示，應用先前的研究結果，模擬參數如下表所示：

製程參數	變數值
鋼瓶口高度(mm)	3.8, 3.85, 3.9
鋼瓶口內徑(mm)	7.5, 7.55, 7.6
o-ring 墊圈高度(mm)	2.3, 2.5
o-ring 墊圈厚度(mm)	1.3, 1.5

將模擬結果依 o-ring 墊圈最大接觸應力和接觸應力標準差製成圖表，並結合 o-ring 墊圈接觸面積來判斷，選出九組模擬情形較佳的尺寸組

合進行實驗(如圖中的綠色方框)。

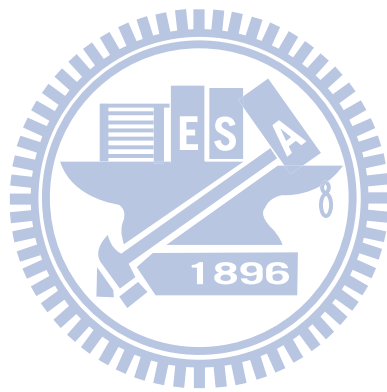


實驗結果如下表所示：

鋼瓶口高度 (mm)	鋼瓶口內徑 (mm)	o-ring 高度 (mm)	o-ring 厚度 (mm)	最大接觸應力 (MPa)	標準差	漏氣量 (g/day)
3.85	7.50	2.3	1.40	12.37	1.77	<b>0.000264</b>
3.85	7.55	2.4	1.40	11.33	1.9	<b>0.000284</b>
3.90	7.60	2.3	1.50	7.14	1.7	<b>0.000286</b>
3.90	7.55	2.4	1.40	16.77	2.58	<b>0.000307</b>
3.85	7.65	2.5	1.40	13.48	1.723	0.000518
3.90	7.50	2.4	1.40	8.26	1.57	0.000603
3.85	7.50	2.5	1.30	15.06	2.196	0.000671
3.80	7.50	2.3	1.40	5.9	1.503	0.001124
3.80	7.65	2.5	1.40	5.42	0.82	0.001491

由實驗結果可以看出，只有二組尺寸組合超出漏氣量標準，其原因為最大接觸應力太小，第三組至第九組漏氣量皆在標準內，且前四組尺寸組合，其密封性的表現甚至比先前的實驗結果還來的更好，推測一

方面是金屬封片之尺寸改良，另一方面是模擬的準確預測，確實能夠降低試誤法所花費的時間和成本。





## 附錄 D 改變 o-ring 墊圈硬度的模擬

在本研究中 o-ring 墊圈的硬度值為固定，但由於在文獻中也有其他 o-ring 墊圈硬度值的資訊，因此本研究也模擬了不同 o-ring 墊圈硬度對接觸應力的影響，首先選定一組固定的尺寸組合，接著參考文獻中的實驗數據改變 o-ring 墊圈的材料係數來做模擬。

### 改變 o-ring 墊圈硬度的模擬結果

接觸應力 oring 硬度	最大接觸應力(MPa)	接觸面積(%)	接觸應力標準差
50 度	1.03652	68.38235	0.18746
60 度	1.50402	69.58924	0.27334
70 度	2.26158	72.36782	0.41436

由模擬結果可以看出，增加 o-ring 墊圈硬度也會影響到接觸應力狀態，最大接觸應力、接觸面積和接觸應力標準差都隨之增加；而由模擬與實驗所得之接觸應力與密封性的關係，可知 o-ring 墊圈的硬度也有一適當值，硬度太軟則不足以產生足夠的接觸應力強度使鋼瓶達成良好的密封，但硬度過硬則會使接觸應力標準差上升，造成接觸應力分佈的不平均，反而讓密封性下降。