

國立臺灣大學生農學院生物產業機電工程學系

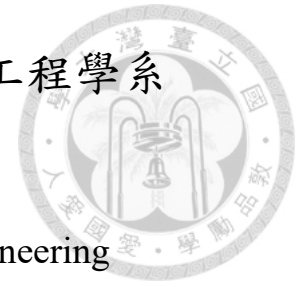
碩士論文

Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis



電子連接器密封性能檢視

Leakage Assessment for Electronic Connectors

黃彥文

Yen-Wen Huang

指導教授：廖國基 博士

Advisor: Kuo-Chi Liao, Ph.D.

中華民國 105 年 6 月

June, 2016

誌謝

於就讀研究所期間，誠摯感謝指導教授廖國基博士悉心指導論文研究，同時不遺餘力培養學生邏輯思考能力與實事求是之學習態度，並教導學生遇到問題時，該如何正視問題與解決問題。於老師任何事情皆講求效率處事觀念下，使得學生於課業與研究上事半功倍外，做人處事更是受益匪淺，學生於此致上最高謝意。

感謝呂學育博士、邱偉忠博士、與李國清副總擔任學生之口試委員，耐心審閱研究論文，並給予學生許多寶貴意見，使得論文內容更臻完整。

感謝連展科技股份有限公司，於學生求學階段給予實習機會，使得學生得以貢獻所學於產業界，並同時拓展研究視野。感謝李國清副總與簡敏隆經理大力支持學生之論文研究，同時給予研究實驗之協助與指教，並提供研究設備與實驗設計之建議，使得實驗得以順利完成。

感謝實驗室成員崇甫、劬霖、學哲、宣涵、崇瑋等，於求學過程互相砥礪，彼此學習與進步，使得研究所生活更加充實。同時感謝身邊好朋友們在困境時給予鼓勵與協助，並於開心時分享喜悅。

最後，感謝我的父母、姊姊、與妹妹，謝謝你們辛苦養育栽培，提供我良好求學環境，使得我得以順利完成學業。



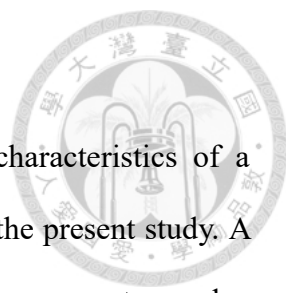


摘要

本論文呈現一套分析應用於音響設備之二合一連接器矽橡膠墊圈密封性能之系統化流程。當音響設備之背蓋放置於設計之位置時，背蓋將矽橡膠墊圈壓迫於背蓋與二合一連接器之間，將背蓋與二合一連接器間之縫隙密合，隔絕音響設備內外，內部形成一密封腔體。然洩漏將於經過一段時間後發生，因此以有限元素分析矽橡膠墊圈之受力情形與歷時變化。分析過程將矽橡膠墊圈材料之超彈性質與應力鬆弛現象納入考量，以穆尼-黎弗林與普羅尼級數描述材料受力行為進行數值分析，而此些材料模型之參數係藉由單軸壓縮鬆弛實驗與單軸拉伸鬆弛實驗，並採用合宜描述矽橡膠材料之數值進行參數迴歸。矽橡膠墊圈之密封性能將由其與二合一連接器兩者間之接觸應力大小評估，經由有限元素分析檢視矽橡膠墊圈承受三種下壓量對於接觸應力之影響，亦考量其歷時變化情形。針對二合一連接器進行密封實驗所得之壓力損失百分比，並根據矽橡膠墊圈關鍵元素於承受下壓量 0.2mm 條件下之接觸應力與時間關係，代入自行提出洩漏率預測模型進行參數迴歸，接續預測其餘較大下壓量之相對應壓力損失百分比。針對另一採用相同墊圈材料之耳機座連接器，將上述所得之模型參數代入預測其壓力損失百分比，與相對應密封實驗所得進行比較，進一步驗證此流程之合宜性。

關鍵字：洩漏，橡膠墊圈，電子連接器，有限元素分析

Abstract



Systematic procedures are developed to investigate sealing characteristics of a so-called 2-in-1 electronic connector applied to audio equipment in the present study. A silicon elastomer gasket located between a plastic housing of the connector and a back-cover of the audio equipment will be squeezed to provide the sealing function when the back-cover is displaced at a designated position. Gas is subsequently pumped into the confined chamber up to the specific pressure while the internal pressure is continuously monitored. Leakage indicated by the pressure loss percentage however could occur through the gasket after a certain period. A finite element analysis is carried out to explore the time-dependent response of the silicon elastomer gasket. The Mooney-Rivlin and the Prony series constitutive models are adopted in the numerical simulations to account for the hyperelasticity and the stress-relaxation behaviors of the gasket material, respectively. Required parameters of these mathematical models are evaluated based on experimental measurements of the specified silicon elastomer specimen subjected to both the uniaxial compression-relaxation and tensile-relaxation loading conditions. Sealing performances can then be assessed by implementing variations of the contact stress of the critical point of the gasket over the relatively long period into a proposed leakage rate prediction model. Pressure loss percentages in the chamber based on the numerical calculations agree well with those based on the corresponding experiments. In order to validate the appropriateness of the current systematic procedures, the pressure loss percentage of an enclosed cavity of an audio jack connector is also evaluated here.

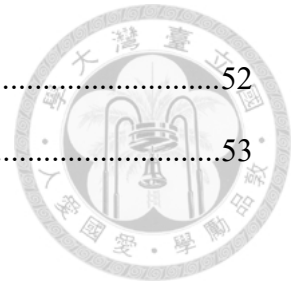
Key Words: leakage, elastomer gasket, electronic connector, finite element analysis

目 錄



誌謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	iv
目錄.....	v
圖目錄.....	vii
表目錄.....	x
第一章 緒論.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 研究動機與目的.....	2
1.3 論文架構.....	3
第二章 文獻探討.....	4
第三章 實驗量測.....	6
3.1 矽橡膠墊圈材料單軸壓縮鬆弛負荷實驗與單軸拉伸鬆弛負荷實驗.....	6
3.2 二合一連接器密封實驗.....	11
3.3 耳機座連接器密封實驗.....	18
第四章 研究方法.....	22
4.1 橡膠數值模型.....	22
4.2 洩漏率預測模型.....	30
4.3 數值分析.....	34
第五章 結果與討論.....	41
5.1 矽橡膠墊圈接觸分析.....	41
5.2 密封分析預測與實驗結果比較.....	49

第六章 結論.....	52
參考文獻.....	53



圖目錄



圖3-1 矽橡膠之單軸壓縮試片.....	7
圖3-2 矽橡膠之單軸壓縮鬆弛實驗設置圖.....	7
圖3-3 矽橡膠之單軸壓縮鬆弛實驗量測數據圖.....	8
圖3-4 矽橡膠之單軸拉伸試片.....	9
圖3-5 矽橡膠之單軸拉伸鬆弛實驗設置圖.....	9
圖3-6 矽橡膠之單軸拉伸鬆弛實驗量測數據圖.....	10
圖3-7 二合一連接器與矽橡膠墊圈.....	14
圖3-8(a) 連接器固定端金屬治具.....	14
圖3-8(b) 矽橡膠固定端金屬治具.....	14
圖3-9(a) 插拔力試驗機.....	15
圖3-9(b) 聚氨基甲酸乙酯管.....	15
圖3-9(c) 銅接頭與開關.....	15
圖3-9(d) 數位壓力錶.....	15
圖3-9(e) 逆止閥.....	15
圖3-9(f) 空氣壓縮機.....	15
圖3-10 二合一連接器密封實驗架設示意圖.....	16
圖3-11 二合一連接器密封實驗連接器擺放相對位置圖.....	16
圖3-12 平均正向力量與時間關係圖，誤差線表示為平均值 ± 1 個標準差.....	16
圖3-13 平均壓力損失百分比與時間關係圖，誤差線表示為平均值 ± 1 個標準差.....	17
圖3-14 耳機座連接器與其矽橡膠墊圈.....	19
圖3-15(a) 耳機座連接器固定端金屬治具.....	19
圖3-15(b) 矽橡膠固定端金屬治具.....	19
圖3-16 耳機座連接器密封實驗連接器擺放相對位置圖.....	20

圖3-17 平均正向力量與時間關係圖，誤差線表示為平均值±1個標準差.....	20
圖3-18 平均壓力損失百分比與時間關係圖，誤差線表示為平均值±1個標準差.....	21
圖4-1 廣義馬克斯威爾模型.....	28
圖4-2 矽橡膠單軸壓縮鬆弛分析結果與實驗量測數據比較圖.....	28
圖4-3 矽橡膠單軸拉伸鬆弛分析結果與實驗量測數據比較圖.....	29
圖4-3 二合一連接器密封分析矽橡膠墊圈接觸面示意圖.....	33
圖4-4 研究流程圖.....	37
圖4-5 二合一連接器矽橡膠墊圈有限元素分析模型.....	38
圖4-6 二合一連接器有限元素分析模型.....	38
圖4-7 二合一連接器密封分析之有限元素分析設置圖.....	39
圖4-8 耳機座連接器矽橡膠墊圈有限元素分析模型.....	39
圖4-9 耳機座連接器有限元素分析模型.....	40
圖4-10 耳機座連接器密封分析之有限元素分析設置圖.....	40
圖5-1 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm條件下，網格尺寸與相對應正向力量關係圖.....	43
圖5-2 二合一連接器矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較圖.....	43
圖5-3 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm條件下之接觸應力分布圖.....	44
圖5-4 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.3mm條件下之接觸應力分布圖.....	44
圖5-5 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.4mm條件下之接觸應力分布圖.....	45
圖5-6 二合一連接器矽橡膠墊圈承受三種下壓量條件下，關鍵元素之接觸應力與時間關係圖.....	45
圖5-7 耳機座連接器矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較圖.....	46
圖5-8 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.2mm條件下之接觸應力分布圖.....	46




圖5-9 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.3mm條件下之接觸應力分布圖.....	47
圖5-10 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量0.4mm條件下之接觸應力分布圖....	47
圖5-11 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受三種下壓量條件下，關鍵元素之接觸應力與 時間關係圖.....	48
圖5-12 二合一連接器密封分析與量測所得之壓力損失百分比比較圖.....	51
圖5-13 二合一連接器密封分析與量測所得之壓力損失百分比比較圖.....	51

表目錄

表3-1 國際防護等級認證 IEC 60529.....	13
表4-1 矽橡膠組成律參數.....	27
表4-2 氣體流動型態[17].....	32
表4-3 洩漏率模型幾何與環境參數.....	36
表5-1 二合一連接器矽橡膠墊圈鬆弛1800秒正向力量.....	42
表5-2 耳機座連接器矽橡膠墊圈鬆弛1800秒正向力量.....	42
表5-3 洩漏率預測模型迴歸係數.....	50
表5-4 二合一連接器之時間1800秒壓力損失百分比.....	50
表5-5 耳機座連接器之時間1800秒壓力損失百分比.....	50

第一章 緒論



1-1 前言

台灣電子科技業為台灣經濟發展之重要基石，從代工出口、產品組裝、發展至今日之產品研發，已居全球舉足輕重之地位。隨著科技蓬勃發展，電子產品逐漸普遍，儼然成為社會大眾之生活必需品。然而，電子產品可能遭受流體入侵，導致電子元件短路亦或腐蝕，進而造成電子產品品質受損，其密封性能因此益發重要。

電子連接器於電子產品之功能扮演重要角色。大多數電子連接器之密封性能通常藉由點膠與矽橡膠墊圈之使用，點膠方式係利用密封膠，填補連接器內金屬端子與塑膠基座間因干涉結合產生之縫隙；矽橡膠墊圈則放置於產品與連接器間，藉由矽橡膠墊圈與產品間之緊密程度提供密封性能。業界通常透過通氣密封實驗為連接器密封性能之判斷，將其擺放於治具並輸入規範氣壓於所形成之密閉腔體，於規範時間內，量測其內部之氣壓變化值，倘若剩餘氣壓值過小，即判定失效。為提昇密封性能，業界通常先更換密封膠種類，若無法改善其密封性能，則增加矽橡膠墊圈與產品間干涉量，然此方法將可能變更電子連接器結構設計，增加產品生產時程，進而提高成本。



1-2 研究動機與目的

部分電子連接器，如耳機座連接器、Micro USB、與應用於音響之結合 Micro USB 與耳機座之二合一連接器等，於電子產品中皆為外露之元件，因此均有密封性能需求。本研究針對應用於音響之結合 Micro USB 與耳機座之二合一連接器進行探討，由於音響設備可能因氣體入侵導致聲音品質變差，故十分重視與其搭配元件之氣密性。二合一連接器之密封性能亦利用點膠與矽橡膠墊圈予以提供，一般而言採用點膠方式阻絕流體之效果大多良好，本研究因此僅著重於矽橡膠墊圈應用於連接器之密封性能檢視，其與墊圈材料選擇與產品結構設計等有關。

針對二合一連接器密封實驗，係將連接器與矽橡膠墊圈分別放置於兩金屬治具上，接續將兩治具夾持於插拔力試驗機，並移動連接器治具端至設計位置後，通入氣體於密閉腔體達指定壓力，持續監測腔體內之壓力變化。然此種手法，需待連接器樣品被實際生產後方能進行。近年來科技發展迅速，電腦運算效能大幅提升，數值分析可協助降低新產品開發時程與研發費用俾有助益。本研究擬將矽橡膠墊圈材料製成之標準樣本施以單軸壓縮鬆弛負荷與單軸拉伸鬆弛負荷，藉以獲得描述矽橡膠超彈性與鬆弛反應之組成律所需參數。接續截取模擬所得墊圈承受之接觸應力，結合二合一連接器施加於矽橡膠墊圈最小下壓量之密封實驗量測結果，求取自行提出之洩漏率預測模型所需參數。接續預測其餘較大下壓量之壓力損失百分比，並分別與其相對應密封實驗結果進行比較。另針對採用相同墊圈材料之耳機座連接器，藉由上述流程進行其密封性能預測，並與相對應實驗量測進行比較，藉以驗證本評估流程之合宜性。



1-3 論文架構

本論文架構共分為六章，簡述如下：

第一章 緒論

電子連接器背景之簡述與本研究動機與目的之說明。

第二章 文獻探討

前人針對不同材質墊圈洩漏率模型採用理論亦或方法之描述，與其相關應用之回顧。

第三章 實驗量測

矽橡膠墊圈材料單軸壓縮鬆弛實驗、單軸拉伸鬆弛實驗、與連接器密封實驗架構之描述與執行。

第四章 數值分析

超彈性材料組成律、洩漏率預測模型、與密封性能評估數值分析架構之介紹。

第五章 結果與討論

數值分析與實驗量測所得壓力損失百分比之比對與討論。


第六章 結論

本研究成果之總結與未來展望。

第二章 文獻回顧



固態氧化物燃料電池內氣體倘若洩漏，恐將造成危害，Chou 等人[3]、Sang 等人[4]、與 Peigat 等人[5]因此針對不同材質墊圈，透過理想氣體方程式亦或流體力學理論，預測不同材質墊圈於不同環境下之燃料電池氣體洩漏率，並搭配實驗進行驗證。螺栓法蘭系統廣泛應用於長途輸送各種流體之管線，管線內流體倘若洩漏可能造成重大損失，Bouzid 與 Derenne [6]、Jolly 與 Marchand [7]、與 Grine 與 Bouzid [8]因此針對不同材質彈性墊圈，分別透過有限元素分析亦或流體力學理論，透過實驗量測之數據求取流體力學統御方程式所需參數，進而預測不同氣體之洩漏率。Sun 與 Gu [9] 利用螺栓法蘭公式與有限元素分析獲得墊圈材料最大接觸應力，並考慮其歷時變化與不同環境條件下，結合多孔介質理論，提出應用於非金屬墊圈材料時變洩漏率預測模型，並搭配實驗進行驗證。針對橡膠墊圈於粗糙表面之流體密封性能，Persson 與 Yang [10] 檢視墊圈與粗糙表面之接觸性質，由於未接觸區域可能造成一流體洩漏通道，因此利用節點展透理論(site percolation theory) 預測接觸面積，並透過接觸力學理論計算此接觸情況下之解析度大小，進而計算橡膠墊圈與粗糙表面之面距，藉由不可壓縮流體洩漏率預測模型進行密封性能預測。Lorenz 等人[11]利用 Persson 與 Yang [10]之洩漏率預測模型探討界面流體疏水性現象，當無接觸通道兩側壓力差大於臨界值時，將突破通道間之氣體阻隔造成流體洩漏。唇形密封墊圈常為工業界廣泛應用於旋轉軸相關機械設備，具有保持潤滑與排除污染物等功用，Yang 等人[12]因此針對含迴油溝唇形密封墊圈，將迴油率視為橡膠密封性能指標，經由流固耦合分析，比較不同轉速條件對於唇型油封流體流動特性與橡膠變形之影響，模擬結果與實驗觀察相符。Jeon 等人[13]針對應用於手機防水之橡膠密封墊圈，利用有限元素分析檢視其承受負荷下之形變，預測是否達到產品之防水需求，並搭配實驗進行驗證，然其有限元素分析並無考慮墊圈材料之歷時變化。Liu 等人[14] 針對彈性墊圈進行密封評估，當流體壓



力大於彈性墊圈接觸應力時，導致彈性體與原本接觸物體失去部分接觸造成洩漏。透過有限元素分析獲得彈性體接觸應力，並經由實驗決定理論模型所需參數，進而預測不同幾何形狀彈性體之流體洩漏壓力，並搭配實驗進行驗證，然其亦未考慮墊圈材料之歷時變化。Ke 等人[15]針對應用於防止氣體洩漏之橡膠墊圈，提出一量測橡膠墊圈與金屬接觸介面氣體洩漏之方法，並將量測所得實驗數據搭配流體力學理論迴歸其相關參數，有助於橡膠墊圈之設計。橡膠墊圈近年來亦應用於太空載具，Zhang 等人[16]針對不同材料之 O 型橡膠密封環，利用 Roth 洩漏理論搭配經驗公式，預測不同壓縮應變下密封環之時變洩漏率。同時進行實驗量測密封環於不同組裝方式與溫度下之洩漏率，提出較適合用於月球登陸艇返回艙之 O 型橡膠密封環材料。

綜合上述文獻回顧，過往甚少針對電子連接器之流體密封性能進行檢視。本研究因此擬藉由有限元素分析評估二合一連接器與耳機座連接器之密封性能，並與相對應實驗量測進行比較。

第三章 實驗量測



3-1 矽橡膠墊圈材料單軸壓縮鬆弛負荷實驗與單軸拉伸鬆弛負荷實驗

本研究採用之密封墊圈材料型號為 Silopren LSR2020，其具備如高熱穩定性、不易燃、與不易老化等多種良好性能。首先執行矽橡膠材料 LSR2020 之單軸壓縮鬆弛實驗，實驗試片係根據 ASTM D1418 規範製作，單軸壓縮鬆弛實驗試片為直徑 18mm 與高度 25.5mm 之圓柱體，顯示於圖 3-1。將試片架設於靜態油壓萬能材料試驗機 INSTRON 5569，以 5mm/min 等速率進行下壓，試片達公稱應變量 (nominal strain) 30%後，持續保持 3600 秒，圖 3-2 為矽橡膠之單軸壓縮鬆弛實驗設置圖。相對應實驗量測數據顯示於圖 3-3，其標示公稱應力(nominal stress)誤差區間為其平均值 ± 1 個標準差(standard deviation)，前 92 秒期間矽橡膠試片之公稱應變與時間關係大致呈現線性變化，接續固定應變量，至 200 秒間應力值呈相對快速下降，爾後應力值則呈現緩慢減少趨勢。接續執行矽橡膠之單軸拉伸鬆弛實驗，單軸拉伸鬆弛實驗試片為標距 2.5 公分、標距寬度 4 公分、與厚度 2 公分之啞鈴形，顯示於圖 3-4。亦將試片架設於上述靜態油壓萬能材料試驗機，以 5mm/min 等速率進行拉伸，試片達公稱應變量 50%後，持續保持 3600 秒，圖 3-5 為矽橡膠之單軸拉伸鬆弛實驗設置圖。相對應實驗量測數據顯示於圖 3-6，其標示公稱應力誤差區間為其平均值 ± 1 個標準差，前 192 秒期間矽橡膠試片之公稱應變與時間關係大致呈現線性變化，接續固定應變量，至 306 秒間應力值呈相對快速下降，爾後應力值則呈現緩慢減少趨勢。

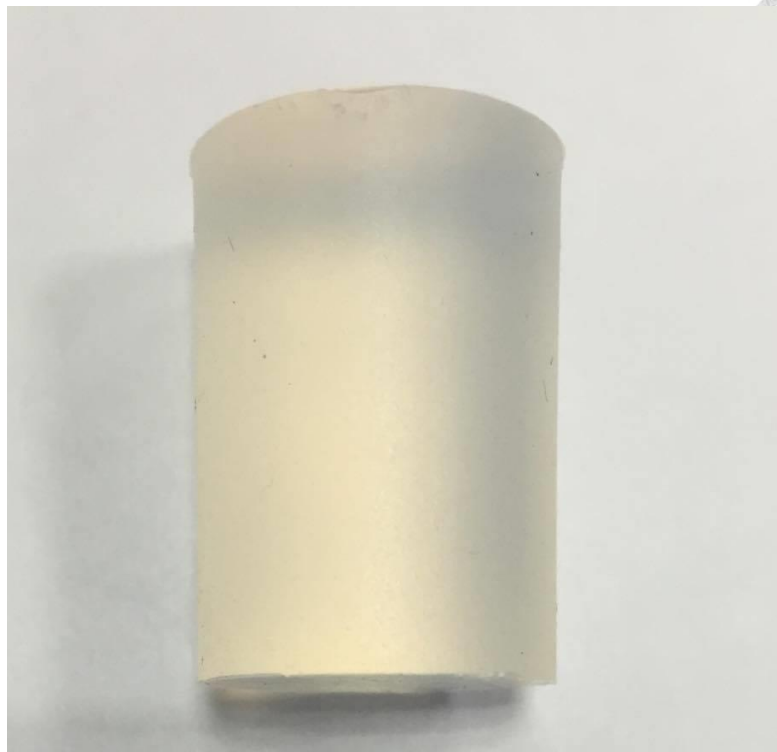


圖 3-1 矽橡膠之單軸壓縮試片

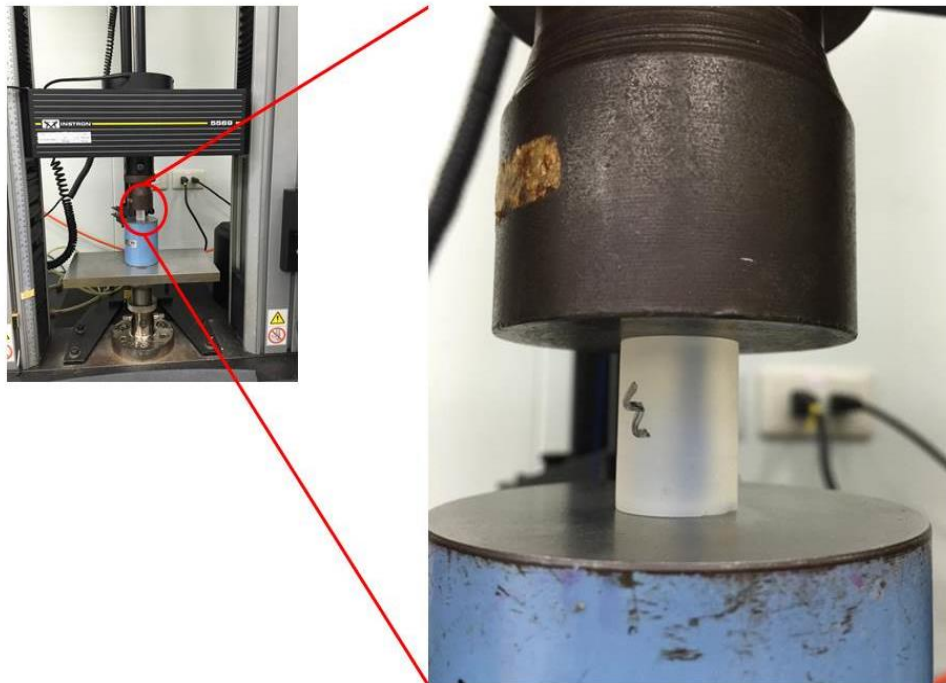


圖 3-2 矽橡膠之單軸壓縮鬆弛實驗設置圖

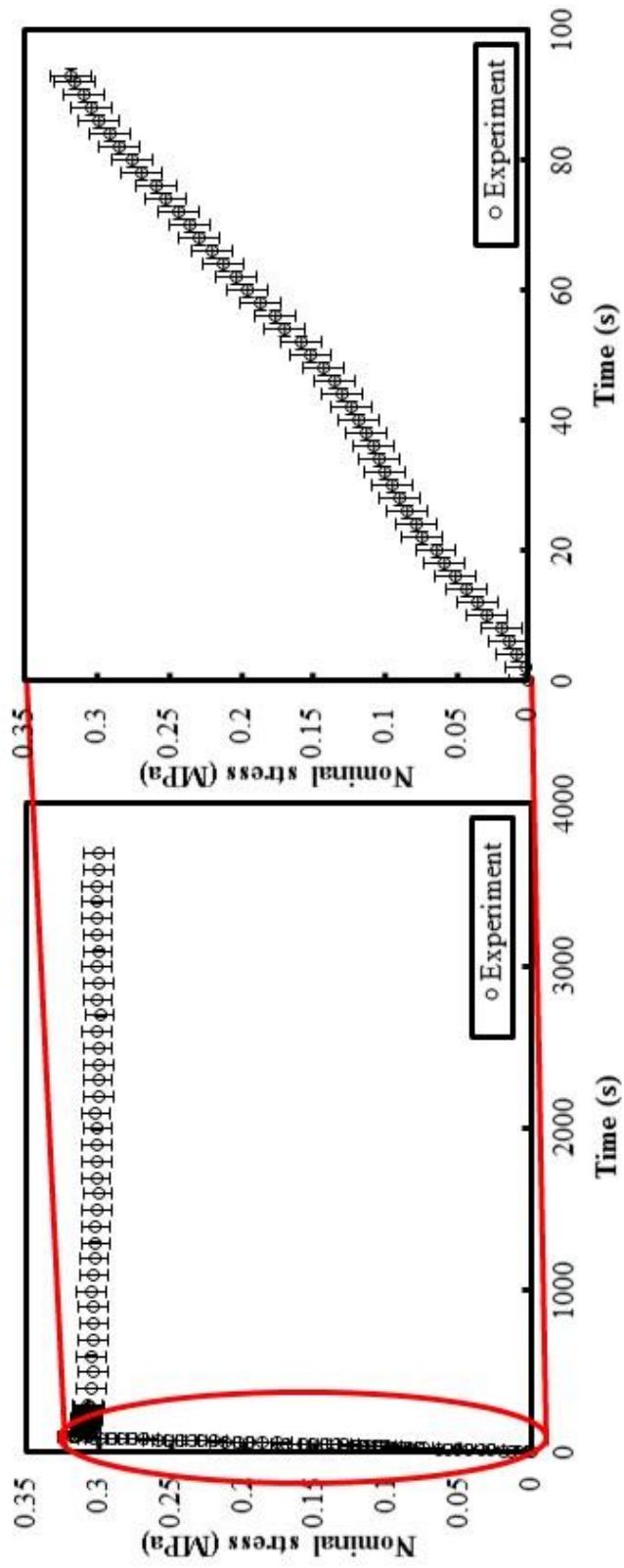


圖 3-3 矽橡膠之單軸壓縮鬆弛實驗量測數據圖，誤差線表示為平均值±1 個標準差





圖 3-4 矽橡膠之單軸拉伸試片

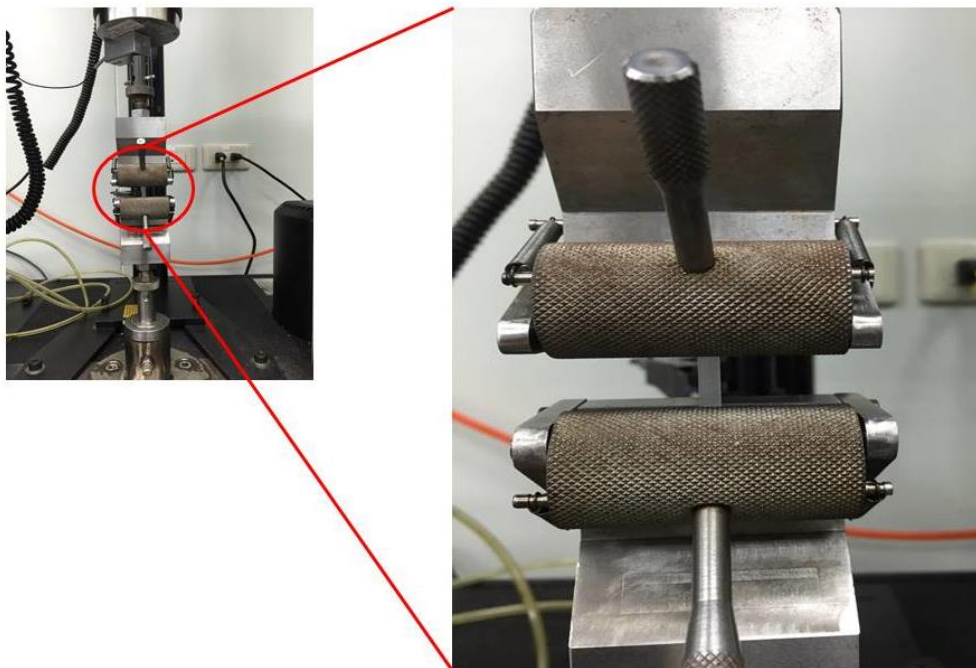


圖 3-5 矽橡膠之單軸拉伸鬆弛實驗設置圖

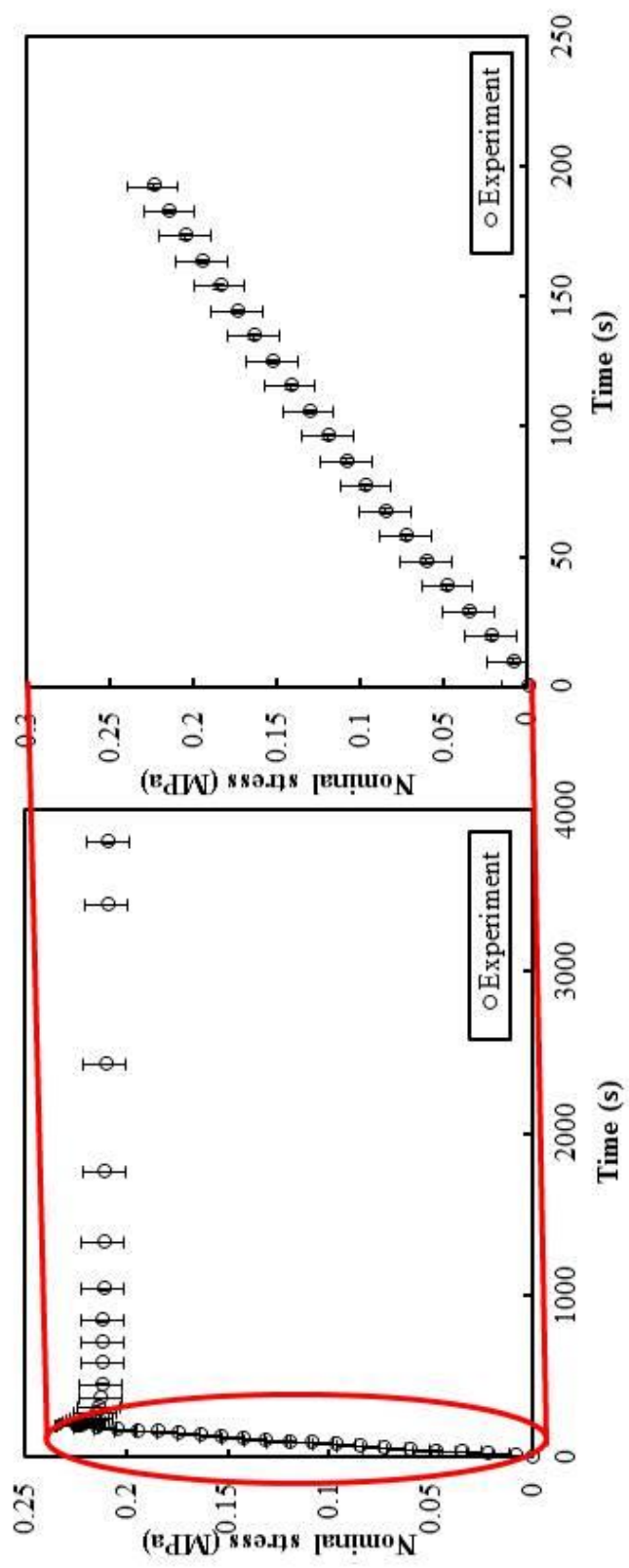


圖 3-6 矽橡膠之單軸拉伸鬆弛實驗量測數據圖，誤差線表示為平均值±1 個標準差





3-2 二合一連接器密封實驗

二合一連接器雖具備氣密要求，然並無氣體密封相關實驗規範，業界通常採用國際防護等級認證(international protection marking) IEC 60529 防護等級 7 (IPX7) 所制定之實驗條件，輸入規範水深高度轉換之等效氣壓值於矽橡膠墊圈與連接器所形成密閉腔體，要求最終損失氣壓值不得大於通入初始氣壓值百分之二，各防護等級如表 3-1 所示。本研究利用連展科技公司設計之密封實驗機台，架設其於插拔力試驗機，控制探頭向下壓迫矽橡膠墊圈位移量(爾後於本文通稱下壓量)，分別為 0.2mm、0.3mm、與 0.4mm，其應變量範圍相當於 5%至 10%之間。本實驗採用之儀器亦或配件如下：圖 3-7 為二合一連接器與其匹配之矽橡膠墊圈；圖 3-8(a)與圖 3-8(b)分別為連展科技公司所提供之密封實驗金屬治具連接器固定端與矽橡膠固定端；圖 3-9(a)為順滢公司所製造型號為 1220S 之插拔力試驗機，量測三種下壓量之正向力量，記錄於規範時間內矽橡膠墊圈力量變化值，圖 3-9(b)為 PISCO 公司所製造型號為 UB0640 之聚氨基甲酸乙酯管，藉以輸送氣體至密閉腔體與數位壓力錶，圖 3-9(c)為福鎰銅器公司所製造之銅接頭與開關，藉以控制腔體與空氣壓縮機之管線連通性，圖 3-9(d)為 ATLANTIS 公司所製造型號為 DPG-3.0 之數位壓力錶，藉以量測密閉腔體內之氣壓值變化，圖 3-9(e)為 PISCO 公司所製造之逆止閥，藉以避免氣體回流至空氣壓縮機，與圖 3-9(f)為 LUOWEI 公司所製造型號為 GM-1004 之空氣壓縮機，用於提供合宜氣體來源輸入規範氣壓於密閉腔體。將上述之儀器與配件適當安裝，圖 3-10 係二合一連接器密封實驗之架設示意圖，圖 3-11 則為二合一連接器密封實驗連接器擺放相對位置圖，經由插拔力試驗機量測矽橡膠固定端之正向力量，藉以比對有限元素分析之結果。圖 3-12 顯示三種下壓量分別進行五次實驗之矽橡膠固定端平均正向力量與時間關係圖，接續經由數位壓力錶量測密閉腔體之壓力值，並計算相對應之壓力損失百分比，如圖 3-13 所示為三種下壓量分別進行五次實驗之平均壓力損失百分比與時間關係圖。由上述實驗結

果可知當矽橡膠墊圈下壓量增加時，相對應正向力量隨其上昇，而壓力損失百分比則隨之降低。



表 3-1 國際防護等級認證 IEC 60529



防護等級	防護規範
0	無保護
1	可承受垂直落下水滴滴至產品外殼，並無造成影響
2	可承受呈 15 度角水花直接噴灑至產品外殼，並無造成影響
3	可承受呈 60 度角水花直接噴灑至產品外殼，並無造成影響
4	可承受任何角度水花直接噴灑至產品外殼，並無造成影響
5	可承受任何角度低壓水柱噴射至產品外殼，並無造成影響
6	產品可使用於船艙內之環境，且可承受強力水柱噴射，並無造成影響
7	產品允許放入 1 公尺水深達 30 分鐘
8	產品可長時間放置於一定水深

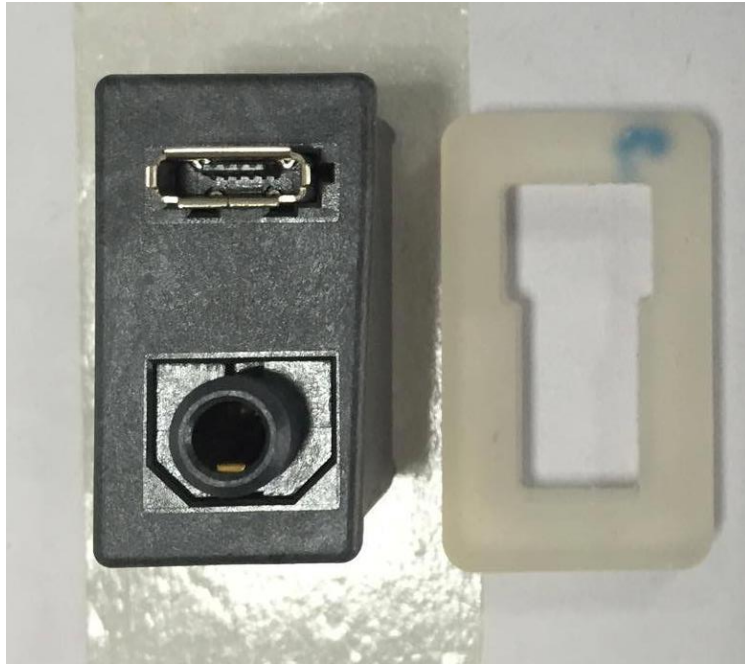
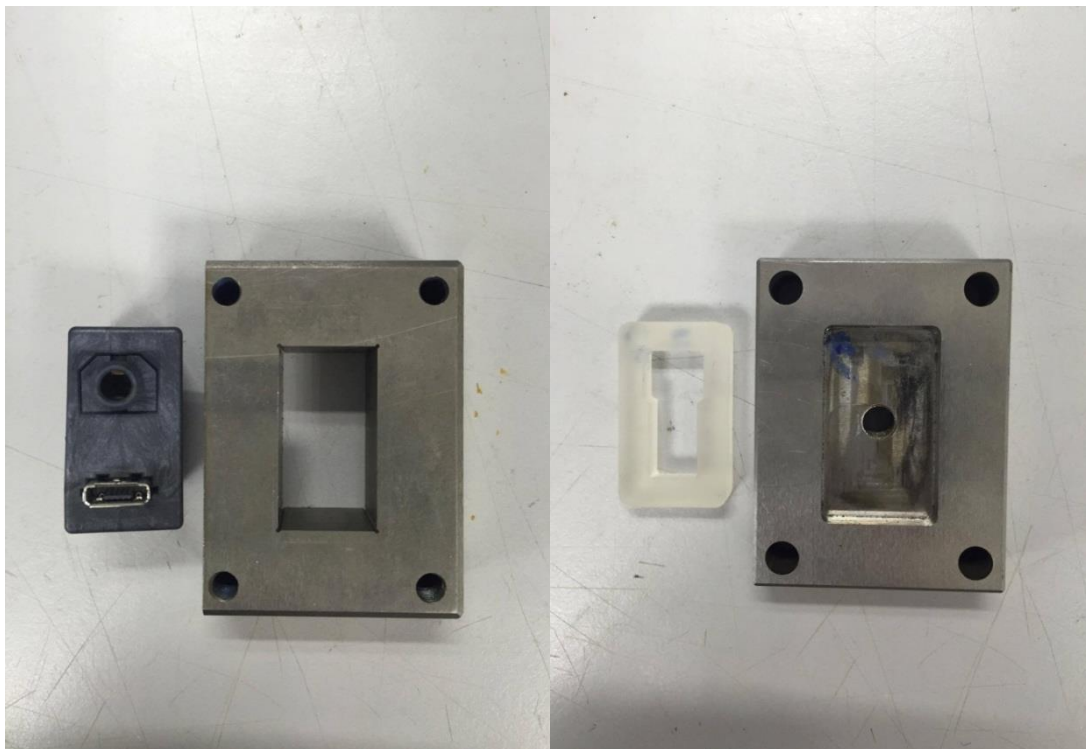


圖 3-7 二合一連接器與矽橡膠墊圈



(a)

(b)

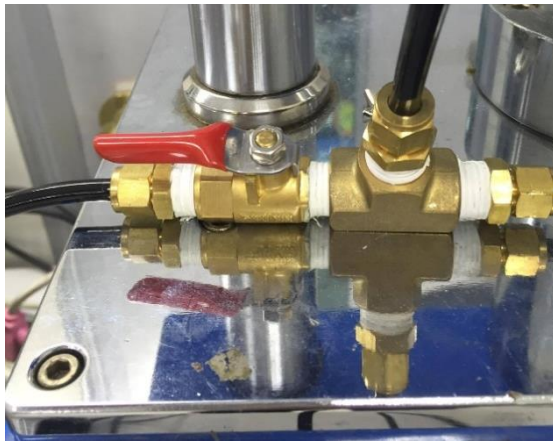
圖 3-8 (a)連接器固定端金屬治具與(b)矽橡膠固定端金屬治具



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

圖 3-9 (a)插拔力試驗機、(b)聚氨基甲酸乙酯管、(c)銅接頭與開關、(d)數位壓力錶、(e)逆止閥、與(f)空氣壓縮機

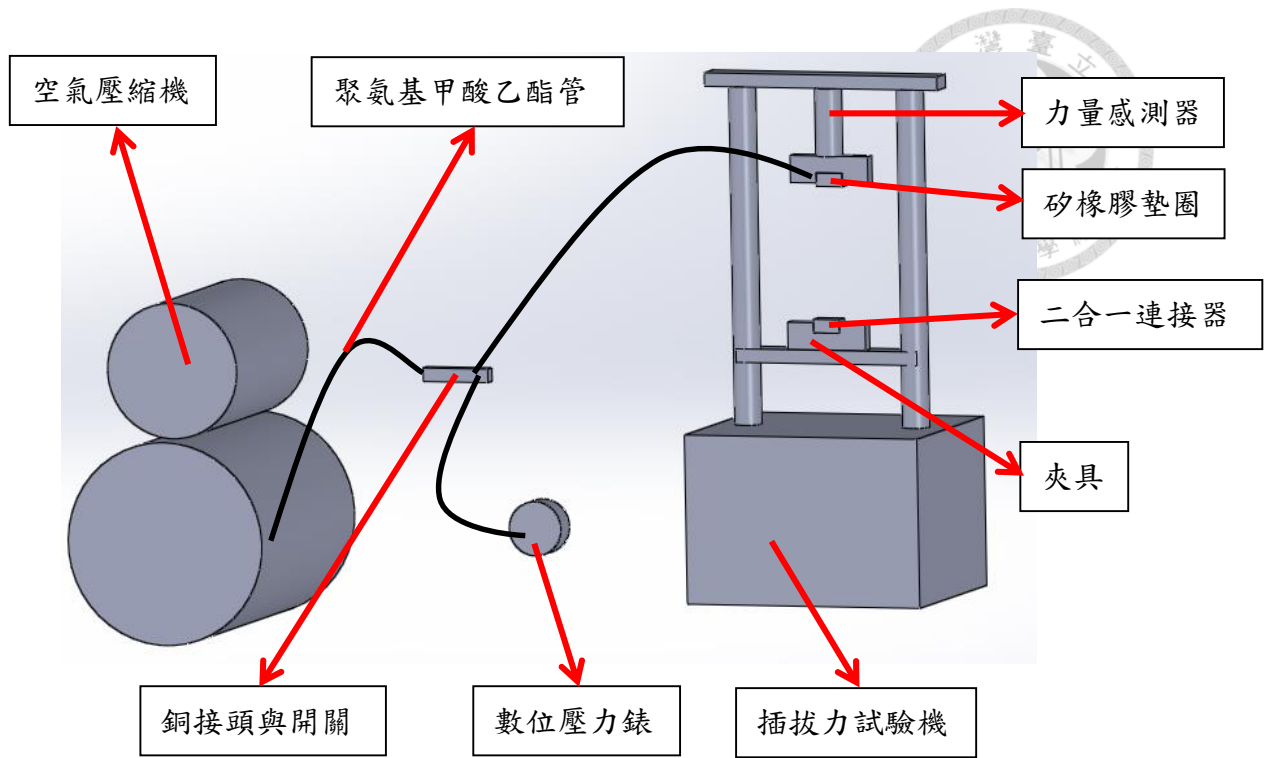


圖 3-10 二合一連接器密封實驗架設示意圖

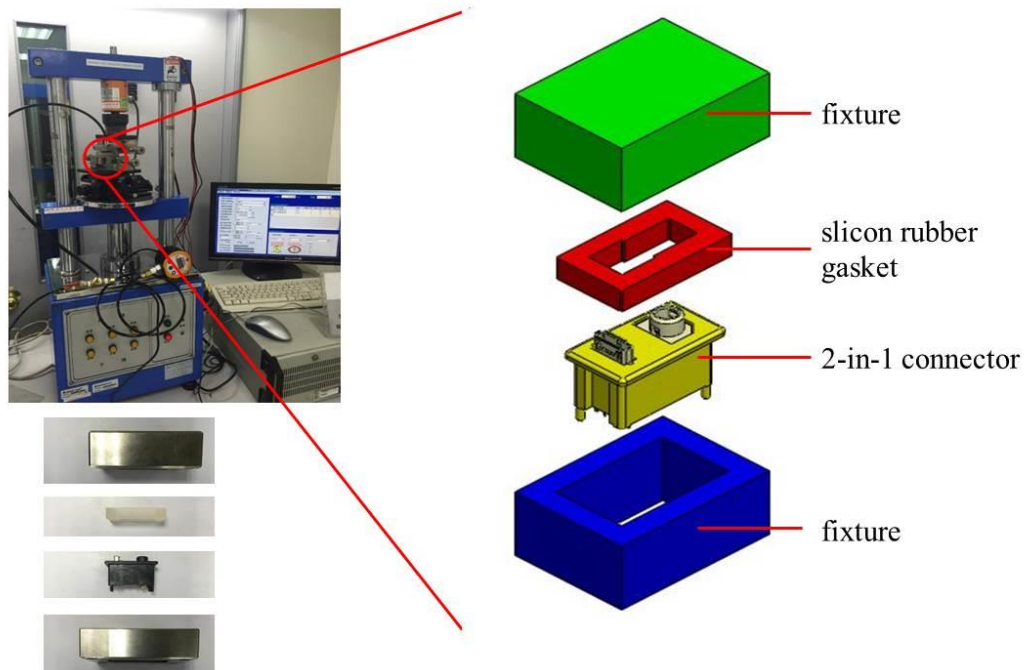


圖 3-11 二合一連接器密封實驗連接器擺放相對位置圖

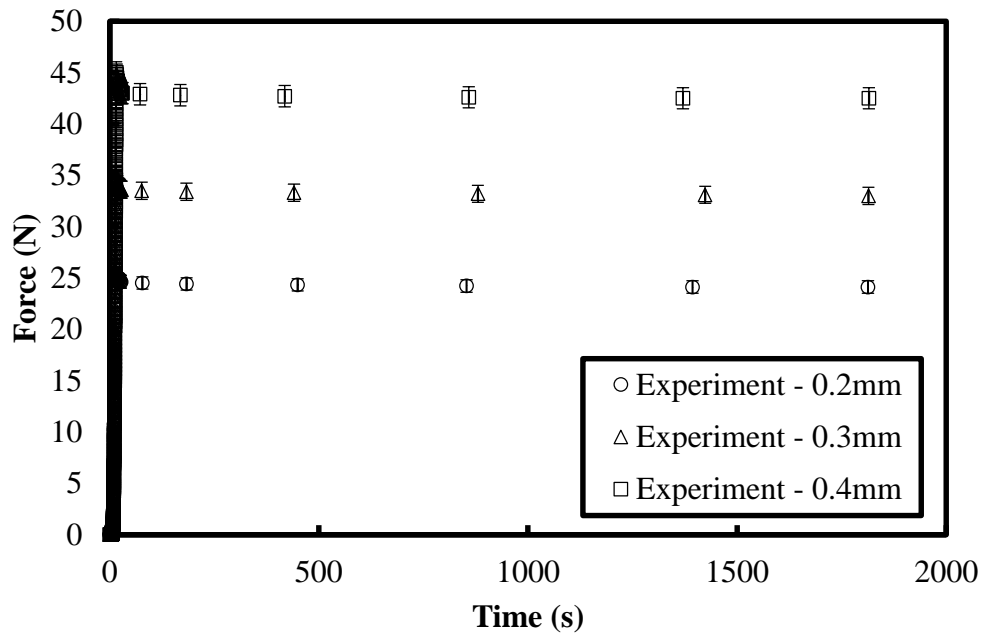
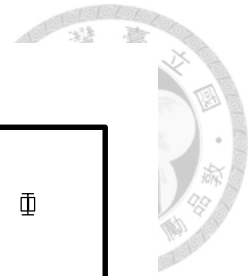


圖 3-12 平均正向力量與時間關係圖，誤差線表示為平均值±1 個標準差

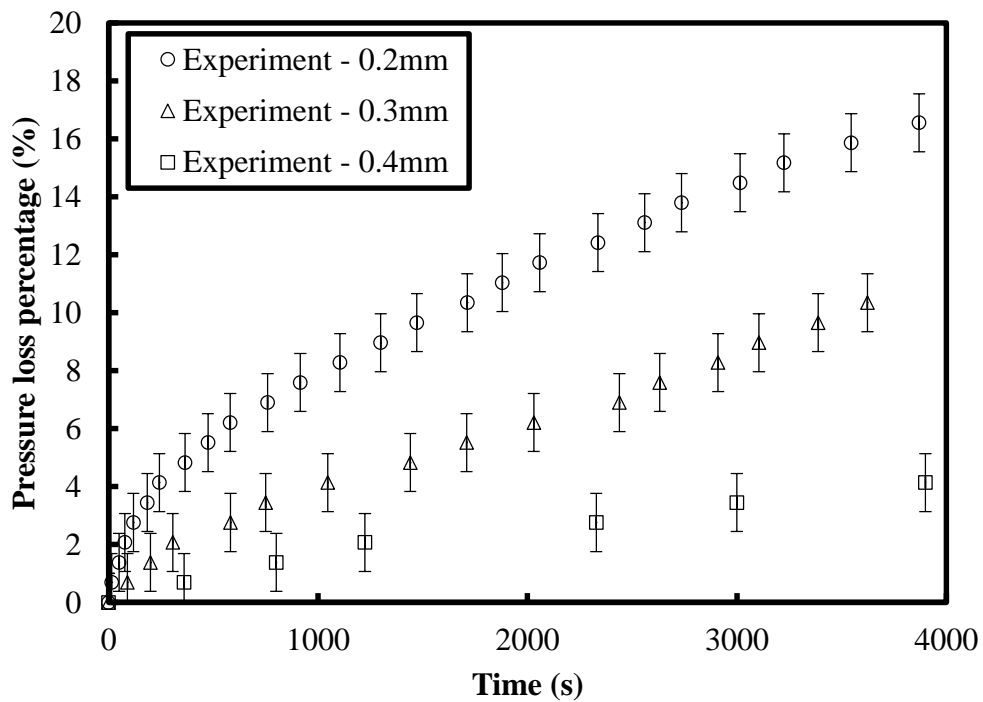


圖 3-13 平均壓力損失百分比與時間關係圖，誤差線表示為平均值±1 個標準差

3-3 耳機座連接器密封實驗



為驗證二合一連接器密封實驗之流程合宜性，本研究因此另行評估耳機座連接器之密封性能，實驗規範與前述二合一連接器所採用一致。密封實驗設備亦與前述相同，僅更替密封實驗金屬治具連接器固定端與矽橡膠固定端、耳機座連接器、與相對應之矽橡膠墊圈，此實驗之矽橡膠墊圈應變量範圍介於2.5%至5%之間。圖 3-14 顯示耳機座連接器與其匹配之矽橡膠墊圈，圖 3-15(a)與圖 3-15(b)則分別為密封實驗金屬治具連接器固定端與矽橡膠固定端。圖 3-16 顯示耳機座連接器密封實驗連接器擺放相對位置圖。接續經由插拔力試驗機量測矽橡膠固定端之正向力量，藉以比對有限元素分析之結果，圖 3-17 為 0.2mm、0.3mm、與 0.4mm 三種下壓量分別進行五次實驗之矽橡膠固定端平均正向力量與時間關係圖，接續經由數位壓力錶量測密閉腔體之壓力值，並計算相對應壓力損失百分比，如圖 3-18 所示為三種下壓量分別進行五次實驗之平均壓力損失百分比與時間關係圖。

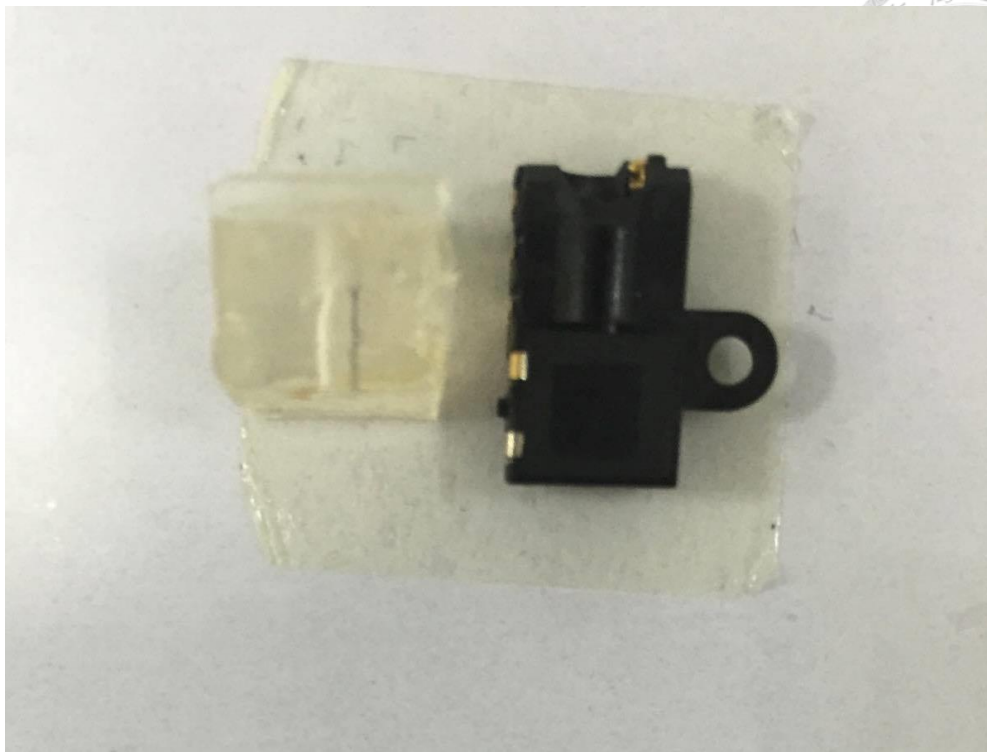
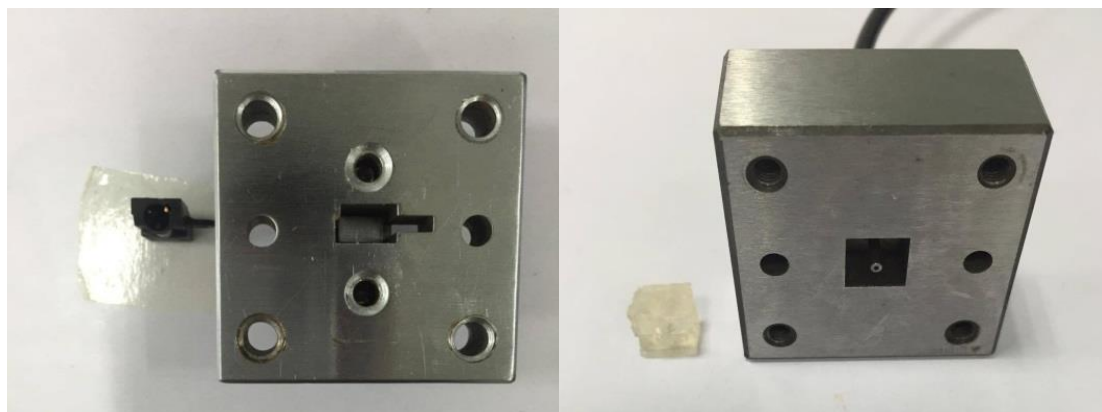


圖 3-14 耳機座連接器與其矽橡膠墊圈



(a)

(b)

圖 3-15 (a)耳機座連接器固定端金屬治具與(b)矽橡膠固定端金屬治具

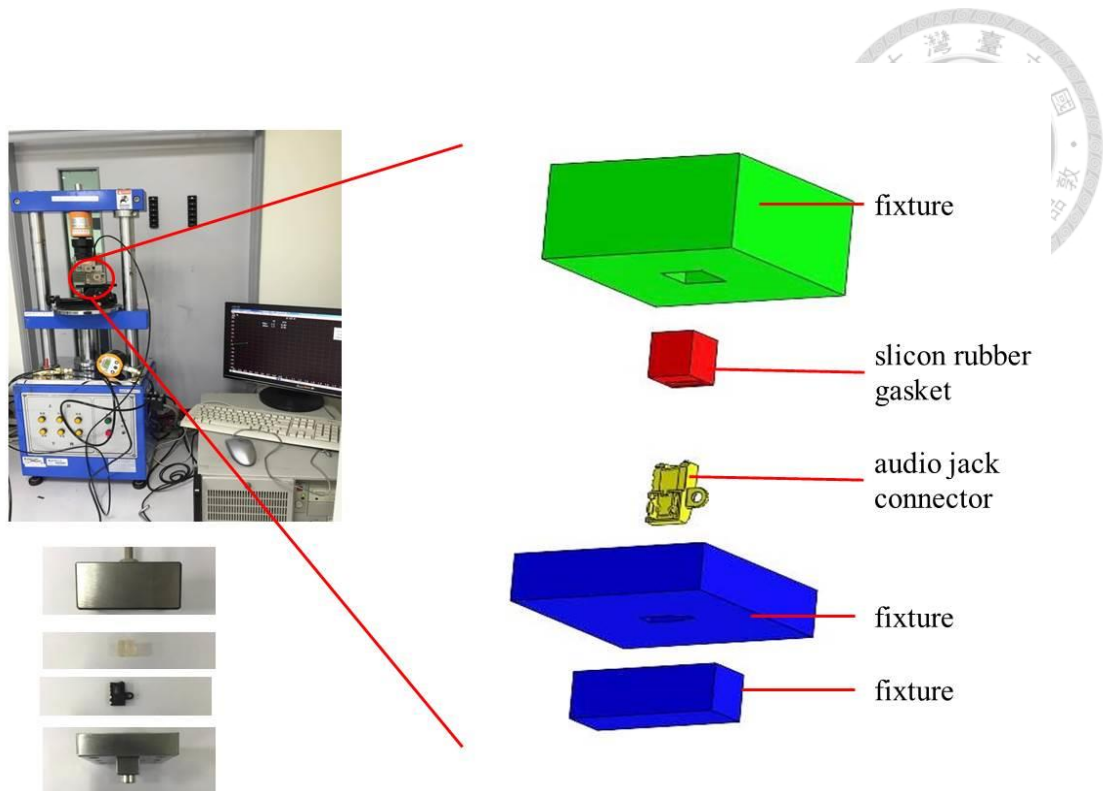


圖 3-16 耳機座連接器密封實驗連接器擺放相對位置圖

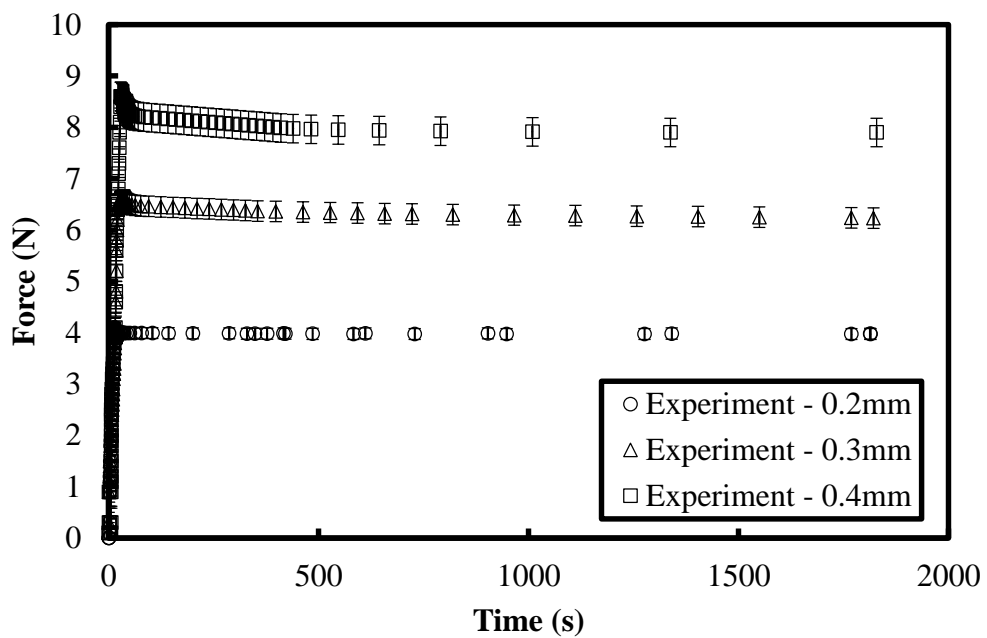


圖 3-17 平均正向力量與時間關係圖，誤差線表示為平均值 ± 1 個標準差

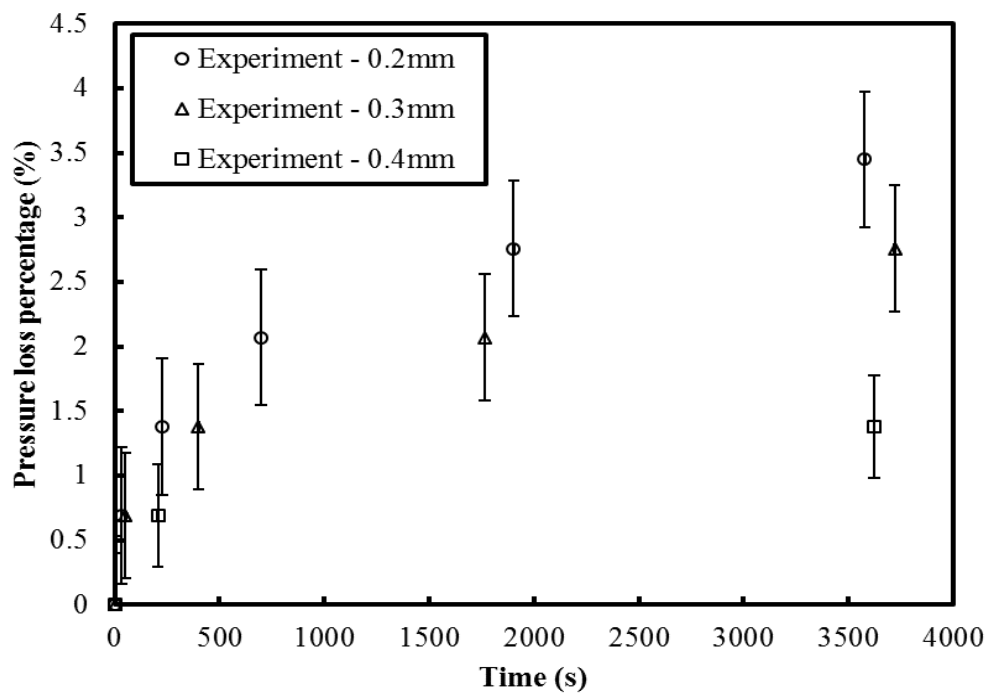


圖 3-18 平均壓力損失百分比與時間關係圖，誤差線表示為平均值 ± 1 個標準差



第四章 研究方法

4-1 橡膠數值模型

矽橡膠之應力應變反應通常呈現非線性關係，採用超彈性材料模型較能適切描述此類橡膠行為。多種超彈性材料模型以應變能方式呈現，如雙變數之穆尼-黎弗林模型(Mooney-Rivlin form)描述單位參考體積應變能(strain energy per unit of reference volume)與應變不變量關係，其形式為

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^{el} - 1)^2 \quad (4-1)$$

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2 \quad (4-2)$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^{(-2)} + \bar{\lambda}_2^{(-2)} + \bar{\lambda}_3^{(-2)} \quad (4-3)$$

其中 U 表示單位參考體積應變能， C_{10} 、 C_{01} 、與 D_1 為材料參數， \bar{I}_1 為第一偏量應變不變量(first deviatoric strain invariant)， \bar{I}_2 則為第二偏量應變不變量(second deviatoric strain invariant)， J^{el} 為彈性體積比(elastic volume ratio)，偏量伸長量(deviatoric stretches) $\bar{\lambda}_i = J^{\frac{1}{3}}\lambda_i$ ，其中 J 為總體積比(total volume ratio)， λ_i ($i=1, 3$) 為主伸長量(principal stretches)。另外奧格登模型(Ogden form)之形式為

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (4-4)$$

其中 μ_i 、 α_i 、 N 、與 D_i 為材料參數， λ_1 、 λ_2 、與 λ_3 為主偏量應變量(deviatoric principal



stretches)。多項式型式(Polynomial form)之形式為

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^{el} - 1)^{2i} \quad (4-5)$$

其中 C_{ij} 為材料參數。而阿魯達-博伊斯型式(Arruda-Boyce form)之形式則為

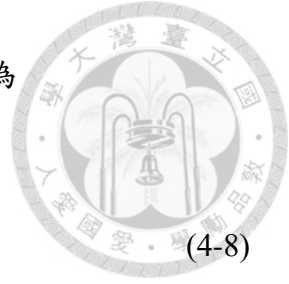
$$U = \mu \left\{ \frac{1}{2} (\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{20\lambda_m^2} (\bar{I}_1^2 - 9) + \frac{11}{1050\lambda_m^4} (\bar{I}_1^3 - 27) + \frac{19}{7000\lambda_m^6} (\bar{I}_1^4 - 81) \right. \\ \left. + \frac{519}{673750\lambda_m^8} (\bar{I}_1^5 - 243) \right\} + \frac{1}{D} \left(\frac{(J^{el})^2 - 1}{2} - \ln J^{el} \right) \quad (4-6)$$

黏彈性(viscoelasticity)係指材料承受負荷時表現出黏性與彈性特質，彈性係為有序固體(ordered solid)沿晶面之鍵(bond)伸長所致，黏性則為非晶質材料(amorphous material)內部原子或分子擴散結果。應力鬆弛現象係指物體變形後維持相同應變量一段時間，其內部應力隨時間增長而減少。本研究採用圖 4-1 所示之廣義馬克斯威爾模型(generalized Maxwell model)描述矽橡膠之應力鬆弛現象，此模型係將一個彈簧與數個馬克斯威爾單元模型平行並聯組合，適用於描述線性黏彈性質，其鬆弛模數 $E(t)$ 表示為

$$E(t) = E_e + \sum_{i=1}^n E_i e^{-\frac{t}{\rho_i}} \quad (4-7)$$

其中 E_e 為平衡模數(equilibrium modulus)， E_i 為鬆弛強度(relaxation strengths)， ρ_i 為鬆弛時間(relaxation times)， n 表示並聯單元模型個數， t 為時間變數，式(4-7)又稱為普羅尼級數(Prony series)亦或狄利克雷級數(Dirichlet series)。由式(4-7)可知，當

此模型趨近穩態，即 t 趨近無窮大時，此時鬆弛模數 E_{∞} 可表示為



$$E_{\infty} = E_e \quad (4-8)$$

將式(4-8)代入式(4-7)，初始狀態($t=0$)鬆弛模數 E_0 可表示為

$$E_0 = E_{\infty} + \sum_{i=1}^n E_i \quad (4-9)$$

式(4-7)因此可改寫為

$$E(t) = E_0 - \sum_{i=1}^n E_i \left(1 - e^{\frac{-t}{\rho_i}} \right) \quad (4-10)$$

進一步將式(4-10)等號兩端同時除以 E_0 可得

$$\frac{E(t)}{E_0} = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{E_i}{E_0} \left(1 - e^{\frac{-t}{\rho_i}} \right) \quad (4-11)$$

將式(4-11)應用於式(4-1)之穆尼-黎弗林模型，其材料參數 C_{10} 與 C_{01} 則表示為時間函數

$$C_{10}(t) = C_{10} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{\frac{-t}{\tau_k}} \right) \right) \quad (4-12)$$



$$C_{01}(t) = C_{01} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right) \quad (4-13)$$

其中 m 、 \bar{g}_k^p 、與 τ_k 為材料參數。描述矽橡膠墊圈材料之數值模型因此為

$$U = C_{10} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right) (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right) (\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1} (J^{el} - 1)^2 \quad (4-14)$$


因橡膠幾為不可壓縮材料，亦即 $J^{el} = 1$ ，故式(4-14)可改寫為

$$U = C_{10} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right) (\bar{I}_1 - 3) + C_{01} \left(1 - \sum_{k=1}^m \bar{g}_k^p \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_k}} \right) \right) (\bar{I}_2 - 3) \quad (4-15)$$

本研究採用三項之普羅尼級數，亦即式(4-15)中之 $m=3$ ，描述材料之黏彈性性質。

式(4-15)數學模型中，共有 8 個待定材料參數，分別為 C_{10} 、 C_{01} 、 \bar{g}_1^p 至 \bar{g}_3^p 、與 τ_1 至 τ_3 。

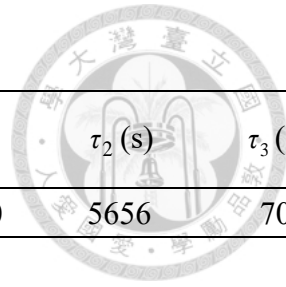
針對矽橡膠材料組成律參數之求取，進行單軸壓縮鬆弛之有限元素數值模擬，分析模型尺寸比照其相對應實驗試片尺寸，採用全模型之圓柱體，並經由固定圓柱體之一底面，透過一剛體進行壓縮，獲得位移與負荷關係，並轉換為公稱應變與公稱應力之關係。同時進行單軸壓縮拉伸之有限元素數值模擬，分析模型尺寸比照其相對應實驗試片尺寸，採用全模型之啞鈴型，並經由固定啞鈴型之一側面，透過施以另一側面位移負荷，獲得位移與負荷關係，並轉換為公稱應變與公稱應



力之關係。利用圖 3-2 之單軸壓縮鬆弛實驗量測數據與圖 3-6 之單軸拉伸鬆弛實驗量測數據，藉由反應曲面法進行二因子之中央合成設計(central composite design)，建立式(4-15)所含 C_{10} 、 C_{01} 、與決定係數(coefficient of determination) R^2 間之迴歸模式，並以望大 R^2 之目標函數計算獲得最佳之 C_{10} 、 C_{01} 組合。進一步進行最佳 D 型設計(D-optimal design)建立式(4-15)所含 \bar{g}_1^p 至 \bar{g}_3^p 、 τ_1 至 τ_3 、與 R^2 間之迴歸模式，亦以 R^2 望大之目標函數計算獲致最佳之 \bar{g}_1^p 至 \bar{g}_3^p 與 τ_1 至 τ_3 組合，如表 4-1 所列。圖 4-2 與圖 4-3 分別顯示矽橡膠單軸壓縮鬆弛分析與矽橡膠拉伸壓縮鬆弛分析所得公稱應力與時間關係與相對應實驗量測平均結果之比較，皆具備良好之吻合度。

表 4-1 矽橡膠材料組成律參數

C_{10} (MPa)	C_{01} (MPa)	\bar{g}_1^p	\bar{g}_2^p	\bar{g}_3^p	τ_1 (s)	τ_2 (s)	τ_3 (s)
0.055	0.0447	0.09	0.01	0.042	35000	5656	70



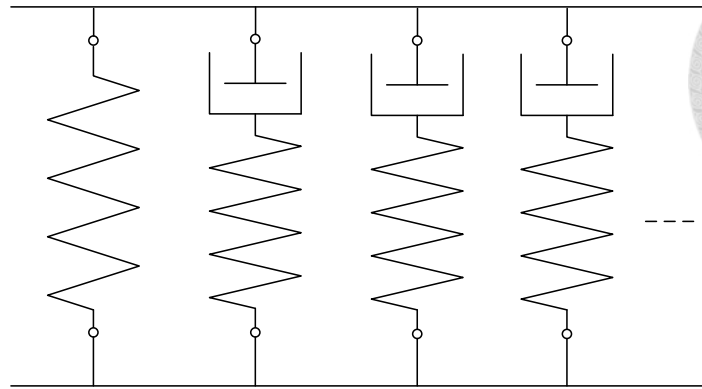


圖 4-1 廣義馬克斯威爾模型

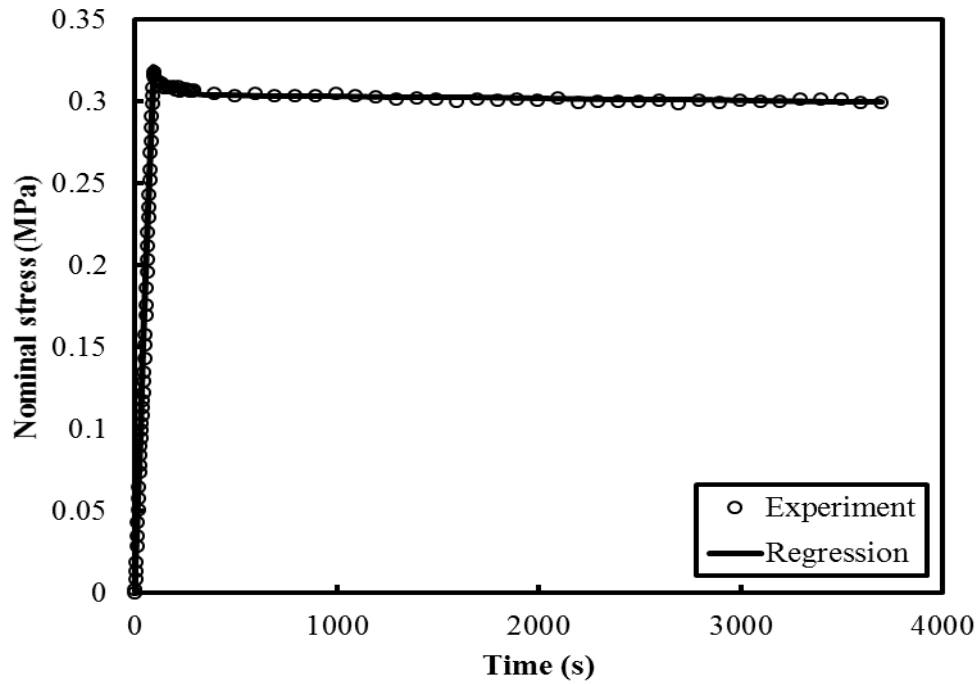


圖 4-2 矽橡膠單軸壓縮鬆弛分析結果與實驗量測數據比較圖

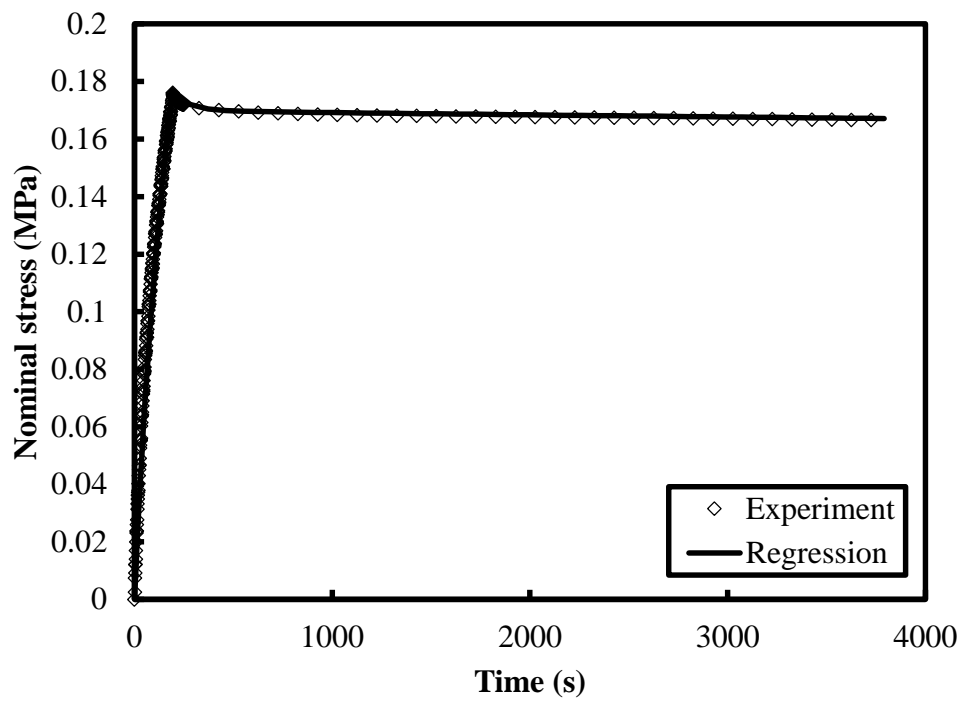


圖 4-3 矽橡膠單軸拉伸鬆弛分析結果與實驗量測數據比較圖



4-2 洩漏率預測模型

檢視過往文獻，Sun 與 Gu [9]根據哈根-泊肅葉定律(Hagen-Poiseuille flow theory)定義分子流態(Molecular flow type)之流率及克努森定律(Knudsen law)定義層流態(Laminar flow type)之流率，並針對墊圈材料歷時變化提出一時變洩漏率 L 預測模型為

$$L = \left\{ A_L \frac{1}{l\eta} \exp \left[B_L \exp \left(-\frac{C_L}{T} \right) t^\alpha \right] \left(\frac{S_{\max}(t)}{S^i} \right)^{-n_L} p_m + A_M \frac{1}{l} \sqrt{\frac{T}{M'}} \exp \left[B_M \exp \left(-\frac{C_M}{T} \right) t^\beta \right] \left(\frac{S_{\max}(t)}{S^i} \right)^{-n_M} p_m \right\} \times (p - p_1) \quad (4-16)$$

其中 l 為墊圈有效密封寬度， η 為氣體動態黏度(dynamic viscosity of gas)， $S_{\max}(t)$ 為墊圈最大接觸應力， S^i 為墊圈座應力(gasket seating stress)， T 為凱氏溫度(Kelvin temperature)， M' 為氣體分子量， p 與 p_1 分別為密閉腔體內部與外部氣壓值，平均氣壓 $p_m = (p + p_1)/2$ ， A_L 、 A_M 、 B_L 、 B_M 、 C_L 、 C_M 、 α 、 β 、 n_L 、 n_M 則為迴歸係數。表 4-2 為 Marr [17]所定義之氣體流動型態，第三章敘述之二合一連接器密封實驗量測所得之洩漏率約介於 1.71×10^{-3} 至 2.20×10^{-2} MPa · mm³ · s⁻¹ 間，而耳機座連接器密封實驗量測所得之洩漏率約介於 2.84×10^{-5} 至 7.20×10^{-5} MPa · mm³ · s⁻¹ 間，本研究檢視之氣體流動型態因此為層流態，式(4-16)可忽略分子流項，故改寫其為

$$L = A_L \frac{1}{l\eta} \exp \left[B_L \exp \left(-\frac{C_L}{T} \right) t^\alpha \right] \left(\frac{S_{\max}(t)}{S^i} \right)^{-n_L} p_m (p - p_1) \quad (4-17)$$



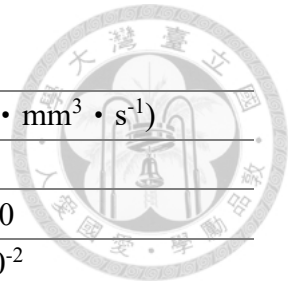
本研究檢視之連接器應用環境溫度雖界定為 -40°C 至 85°C 間，然實務上，仍於室溫環境進行產品檢測，本研究因此暫不考慮溫度效應對於洩漏率之影響，故將式(4-17)調整為

$$L = C_1 \frac{1}{l\eta} \left(\frac{S(t)}{S_i} \right)^{-C_2} p_m (p - p_1) \left(C_3 \exp \left(C_4 \exp \left(C_5 \left(\frac{S_{ip}}{S_i} \right) \right) \right) \right)^{-1} \quad (4-18)$$

圖 4-4 所示之 FACE A 為矽橡膠墊圈與二合一連接器接觸區域，此為密閉腔體與外部環境連接之部位，亦即洩漏發生之潛在區域。此區域具備數條可能洩漏路徑，當某一路徑包含之最大接觸應力相較於其他路徑包含之最大接觸應力小，則定義此路徑上之最大接觸應力位置為關鍵元素。其中 $S(t)$ 為此關鍵元素之接觸應力， S_i 為墊圈下壓至設計位置後之初始接觸應力， S_{ip} 為墊圈充入規範氣壓後之最大接觸應力， S_i 為矽橡膠材料之抗拉強度， C_i ($i=1, 5$) 則為迴歸參數。

表 4-2 氣體流動型態[17]

Types of flow	Leak Rate (MPa · mm ³ · s ⁻¹)
Turbulent flow	>1
Laminar flow	10 ⁻⁴ -10
Transitional flow	10 ⁻⁵ -10 ⁻²
Molecular flow	<10 ⁻⁵



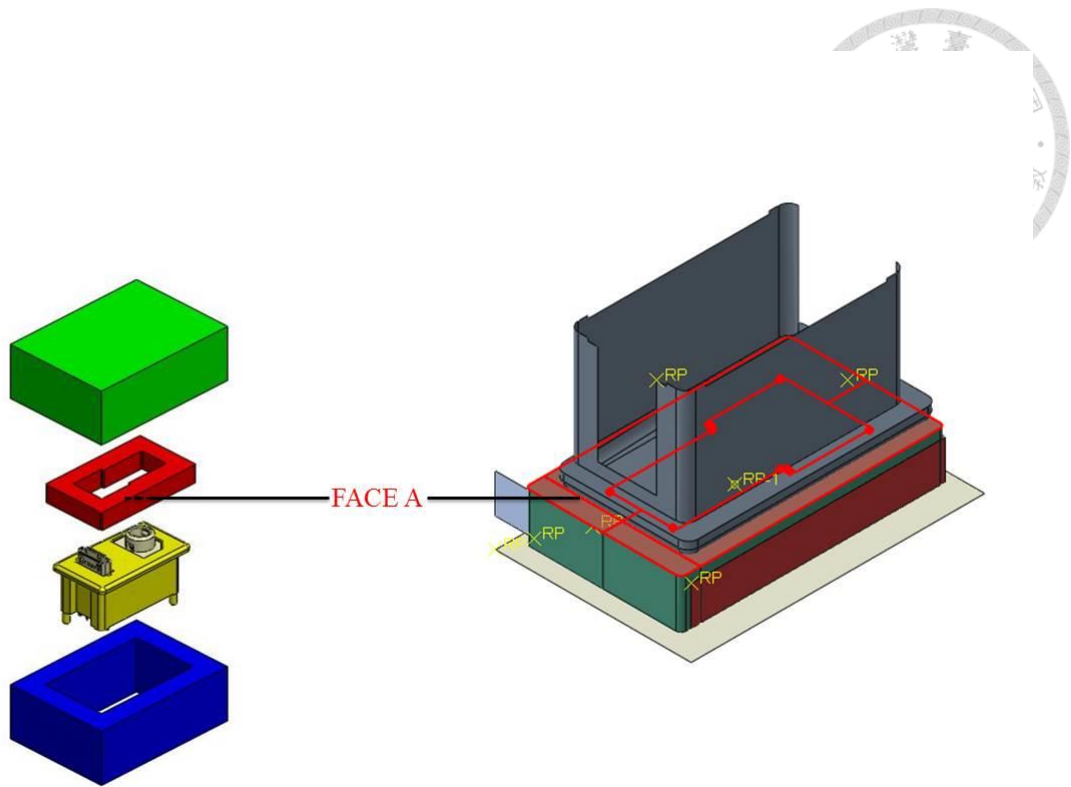



圖 4-4 二合一連接器密封分析矽橡膠墊圈接觸面示意圖



4-3 數值分析

圖 4-5 為本研究之流程圖，數值分析主要分為三個步驟，第一步驟為矽橡膠墊圈與二合一連接器之密封分析，輸入二合一連接器三維模型於 ABAQUS [2]，圖 4-6 與圖 4-7 分別為矽橡膠墊圈與二合一連接器有限元素分析模型圖。將矽橡膠組成律參數輸入並完成相關基本設定，經由調整二合一連接器之設計位置，二合一連接器密封分析之有限元素分析設置圖如圖 4-8 所示，其中 B、C、E、F、與 G 物件模擬金屬治具之矽橡膠固定端，A 為二合一連接器之有限元素分析模型，D 為矽橡膠墊圈之有限元素分析模型。由於矽橡膠墊圈與金屬治具於實驗中為緊配安裝，因此採用 ABAQUS [2]內*CONTACT INITIALIZATION DATA 之 INTERFERENCE FIT 功能模擬矽橡膠墊圈安裝於金屬治具之過程，透過此功能設定使得數值分析中墊圈呈現長端中間隆起，與相對應實驗觀察之現象相符。接續針對氣體輸入於密閉腔體之分析，採用 ABAQUS [2]內*FLUID CAVITY 功能進行輸入規範氣體對於矽橡膠墊圈承受負荷影響分析，其為用於一流體與腔體間互動功能，可選擇流體屬性為氣體或液體均勻填充於密閉腔體內。密閉腔體必須選擇包括一個基準點(reference point)，並選擇形成密閉腔體之表面。如流體為氣體時，需定義氣體理想莫耳分子量(ideal gas molecular weight)，亦可考慮氣體之莫耳熱容量(molar heat capacity)，為液體時定義液體密度(fluid density)，並可考慮流體體積彈性模量(fluid bulk modulus)與熱膨脹係數(fluid thermal expansion coefficients)。於此僅模擬氣體充填之過程，故輸入氣體理想莫耳分子量 $0.028\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、理想氣體常數 $8314.34\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ 、與絕對零度 0K ，分別於接觸條件輸入一大氣壓 0.1013MPa 與邊界條件設置腔體內部絕對壓力 0.1113MPa ，以符合密封實驗之設置，藉以獲得壓迫矽橡膠墊圈之正向力量，並與相對應實驗量測值進行比較。第二步驟進行二合一連接器三種下壓量之相對應壓力損失百分比評估，經由 ABAQUS [2] 獲得矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm 條件下關鍵元素之接觸應力，輸入表 4-3 洩漏



率模型所需幾何與環境參數與矽橡膠墊圈之抗拉強度，藉由數值方法調整式(4-18)內 5 個材料參數 C_i ($i=1, 5$)，獲得密閉腔體內洩漏率與時間關係，並與第三章所述相對應量測結果進行擬合。進而預測另兩種下壓量之洩漏率與時間關係，最終將三種下壓量之洩漏率對時間進行數值積分轉換為壓力損失百分比，與相對應之實驗值比較。第三步驟另針對採用相同墊圈材料之耳機座連接器，圖 4-9 與圖 4-10 分別為耳機座連接器橡膠墊圈與耳機座連接器之三維有限元素分析模型圖。耳機座密封分析設置如圖 4-11 所示，其中 B、C、D、F、與 G 物件模擬金屬治具之矽橡膠固定端，A 為耳機座連接器之有限元素分析模型，E 為矽橡膠墊圈之有限元素分析模型。由上述流程進行壓力損失百分比預測，並與相對應密封實驗量測所得進行比較，進一步驗證本評估流程之合宜性。

表 4-3 洩漏率模型所需幾何與環境參數

	l (mm)	η (MPa · s)	p (MPa)	p_1 (MPa)	p_m (MPa)
二合一連接器	3.5	1.86×10^{-11}	0.111	0.101	0.106
耳機座連接器	0.835	1.86×10^{-11}	0.111	0.101	0.106

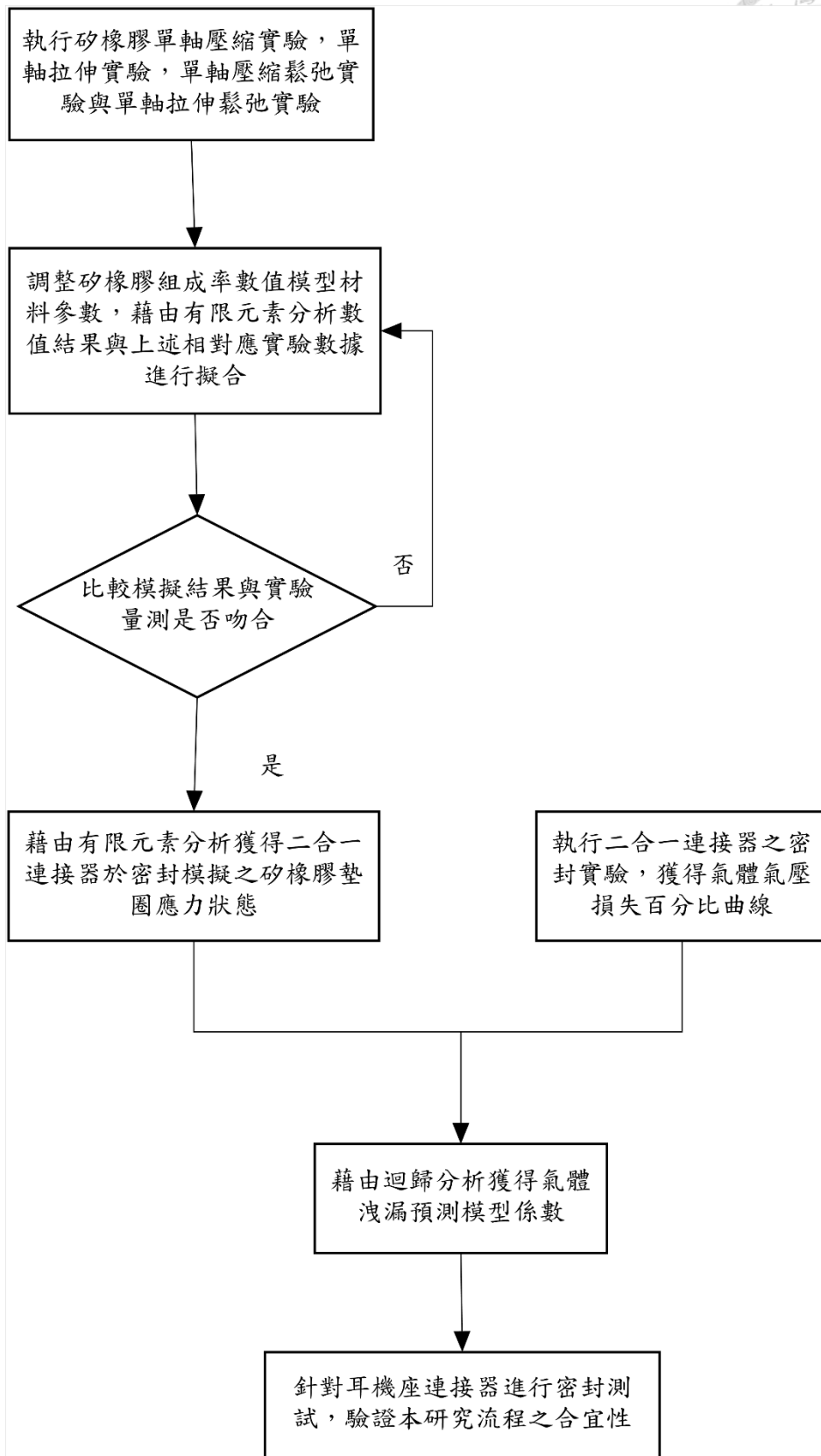


圖 4-5 研究流程圖

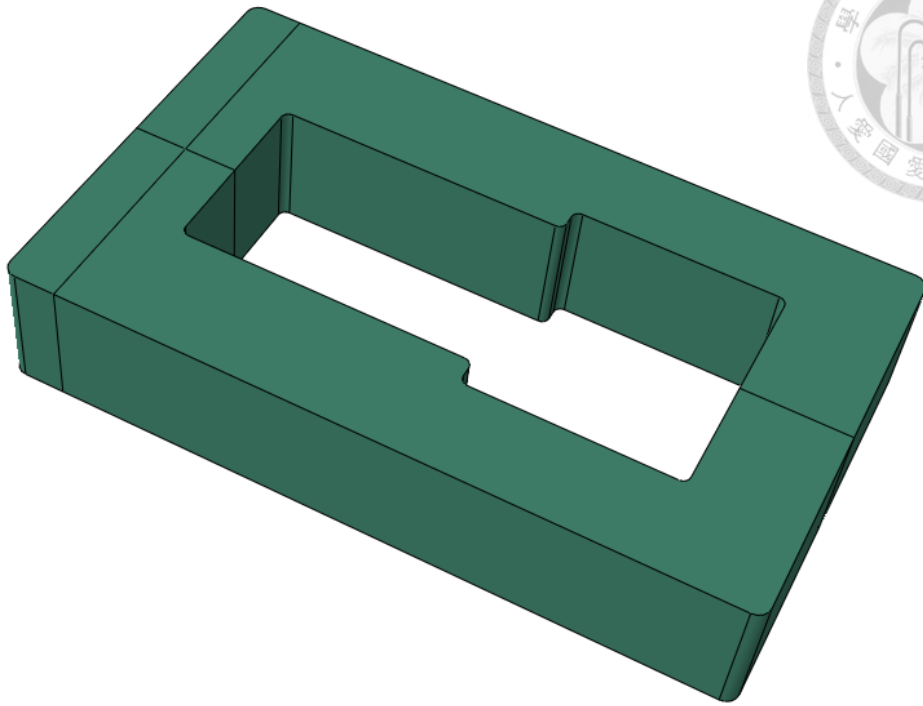


圖 4-6 矽橡膠墊圈有限元素分析模型

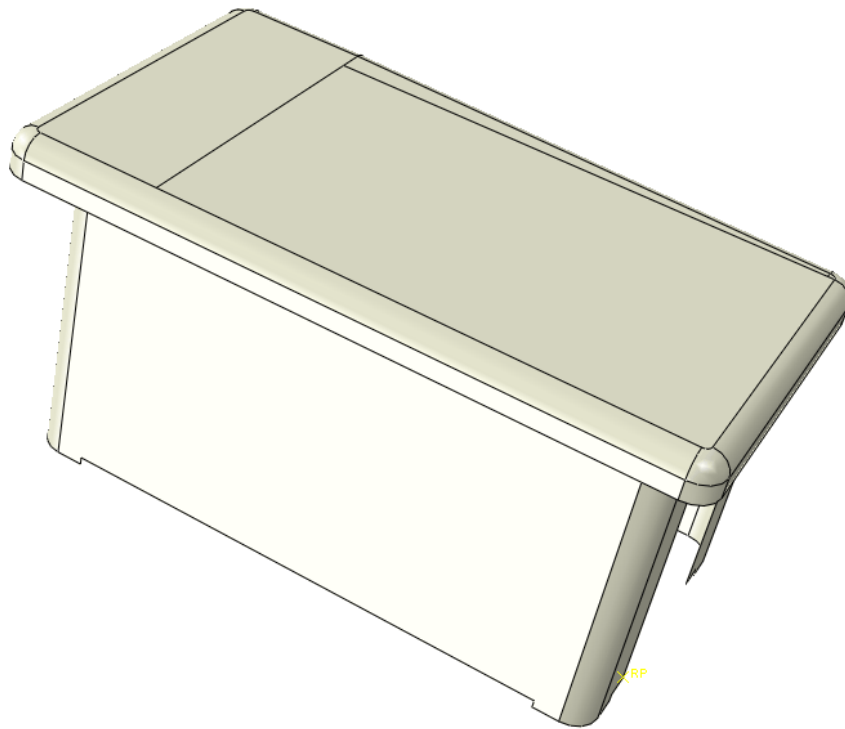


圖 4-7 二合一連接器有限元素分析模型

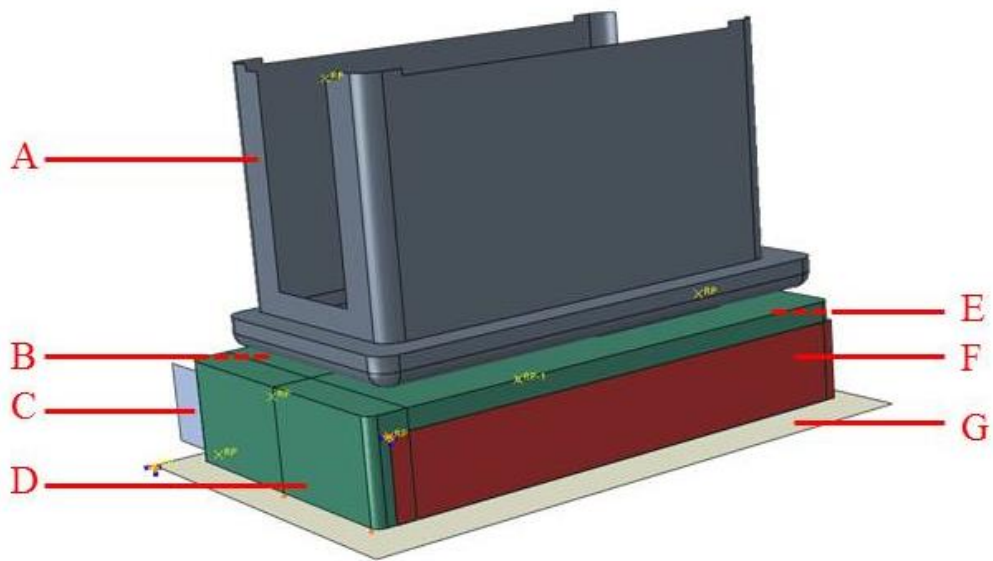


圖 4-8 二合一連接器密封分析之有限元素分析設置圖

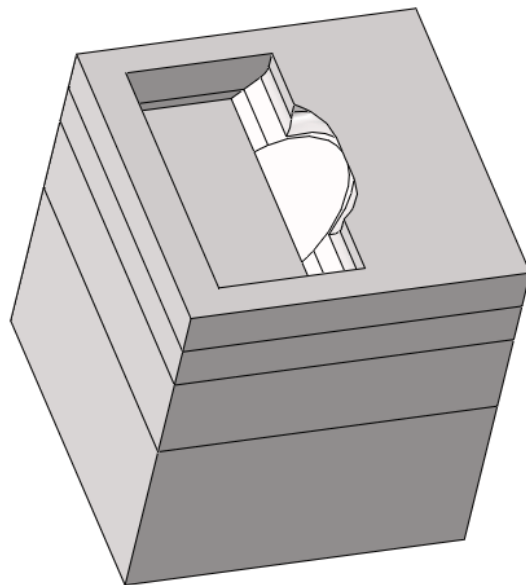


圖 4-9 耳機座連接器橡膠墊圈有限元素分析模型圖

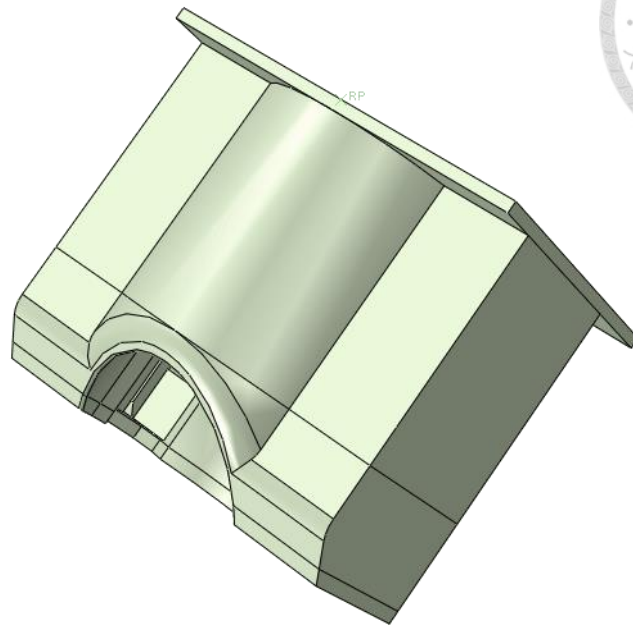


圖 4-10 耳機座連接器有限元素分析模型圖

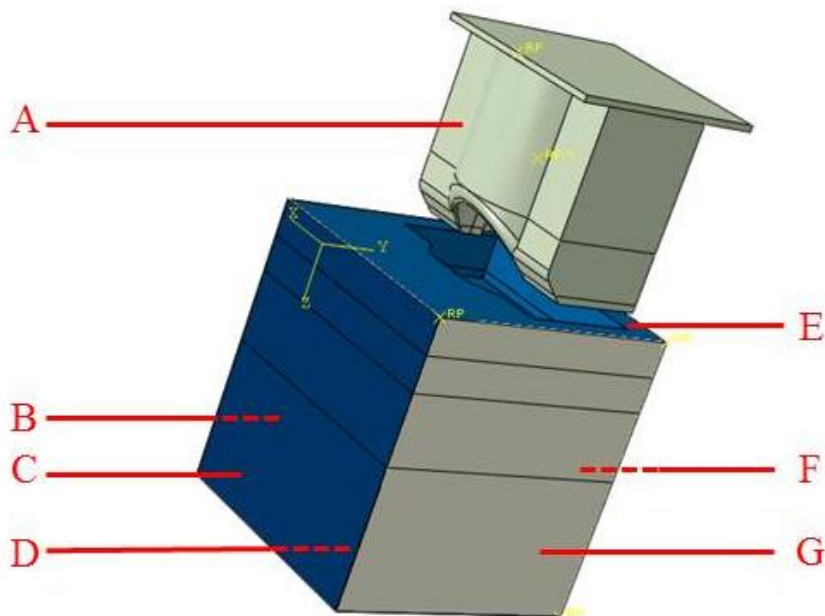


圖 4-11 耳機座連接器密封分析之有限元素分析設置圖

第五章 結果與討論



5-1 矽橡膠墊圈接觸分析

減積分元素可能產生沙漏模式(hourglass mode)，導致網格過度扭曲，因此需鋪設尺寸較小之網格。一階減積分元素亦可克服於承受彎矩負荷可能產生之剪切自鎖(shear locking)與於不可壓縮材料應用上產生之體積自鎖(volumetric locking)現象。有限元素分析結果與所採用之網格尺寸相關，其通常隨網格尺寸縮小而漸趨收斂。網格尺寸過大，可能導致分析結果不正確，然使用較小尺寸網格則需耗費較多運算資源，因此需藉由網格感度分析確立合宜網格尺寸。本研究將二合一連接器模型，劃分多種網格尺寸，比較不同網格尺寸條件下，矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm 反應之正向力量。圖 5-1 顯示矽橡膠墊圈網格尺寸與相對應正向力量之關係，當網格尺寸小於 0.4mm 時，反應正向力量趨近 24.1N，因此選擇網格尺寸為 0.4mm 進行接續分析。圖 5-2 顯示矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較圖，表 5-1 顯示此三種下壓量於鬆弛 1800 秒後，模擬與量測所得壓迫墊圈正向力量，兩者差異僅約 2.9%至 4.5%。圖 5-3、圖 5-4、與圖 5-5 分別顯示矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm、0.3mm、與 0.4mm 之接觸應力分布狀態，其中關鍵元素位置為圖中圓圈處。圖 5-6 顯示二合一連接器數值分析所得關鍵元素接觸應力與時間關係。接續利用相同矽橡膠組成律參數進行耳機座連接器之密封分析，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較如圖 5-7 所示，表 5-2 顯示三種下壓量於鬆弛 1800 秒後，模擬與量測所得壓迫墊圈正向力量，兩者差異約 3.3%至 9.6%。圖 5-8、圖 5-9、與圖 5-10 分別顯示耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm、0.3mm、與 0.4mm 之接觸應力分布狀態，其中關鍵元素位置為圖中圓圈處，圖 5-11 則顯示耳機座連接器數值分析所得關鍵元素接觸應力與時間關係。

表 5-1 二合一連接器矽橡膠墊圈鬆弛 1800 秒正向力量

承受下壓量(mm)	有限元素分析(N)	實驗量測平均值(N)
0.2	24.1	25.1
0.3	33	34.0
0.4	42.5	44.5

表 5-2 耳機座連接器矽橡膠墊圈鬆弛 1800 秒正向力量

承受下壓量(mm)	有限元素分析(N)	實驗量測平均值(N)
0.2	3.59	3.97
0.3	5.73	6.23
0.4	7.64	7.90

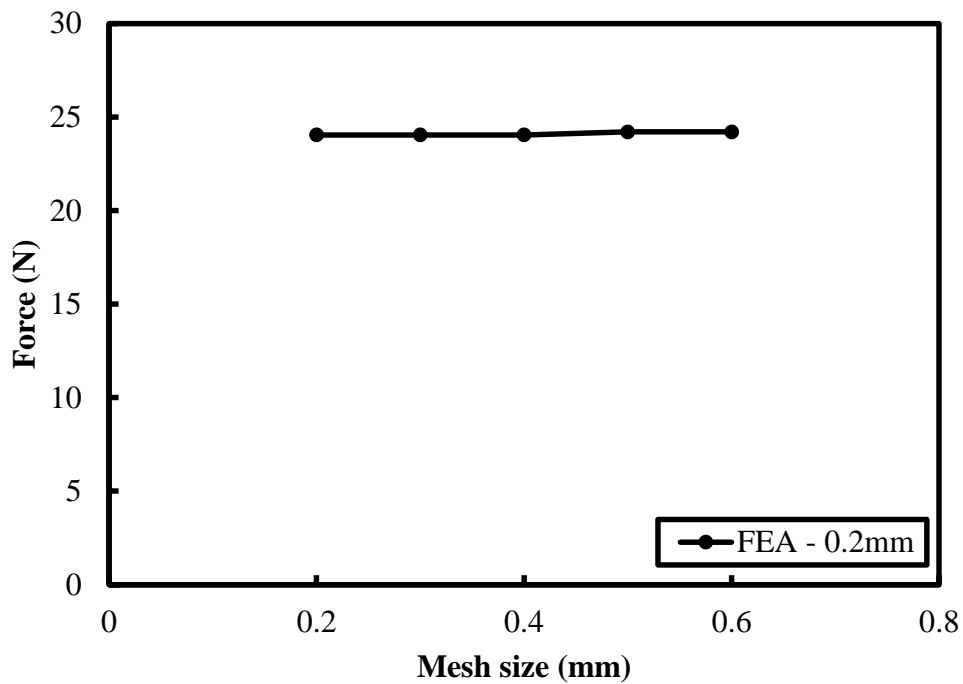


圖 5-1 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm 條件下，網格尺寸與相對應正向力量關係圖

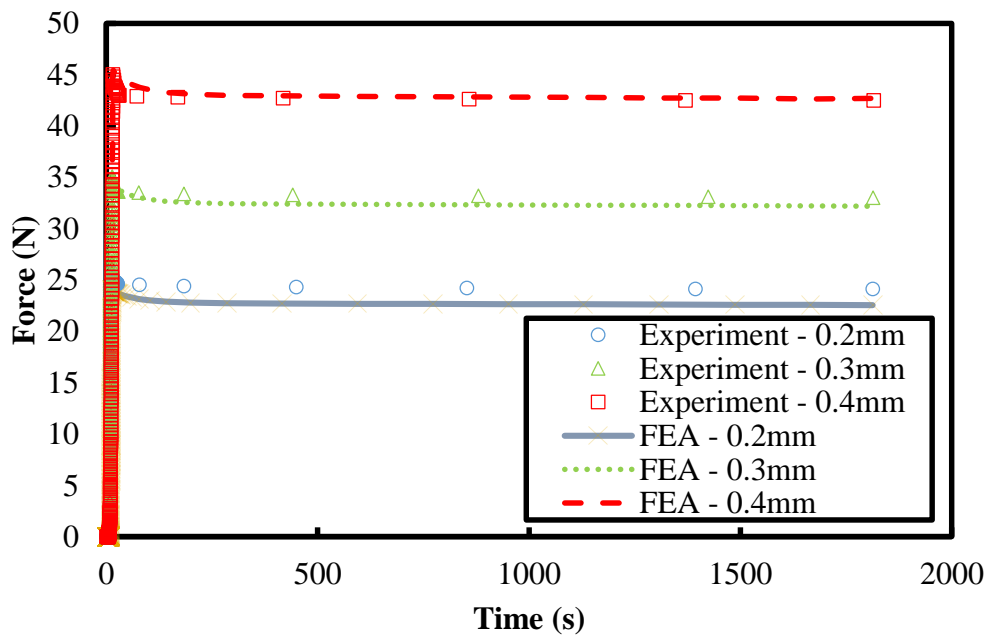


圖 5-2 二合一連接器矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊圈正向力量與相對應量測平均值比較圖

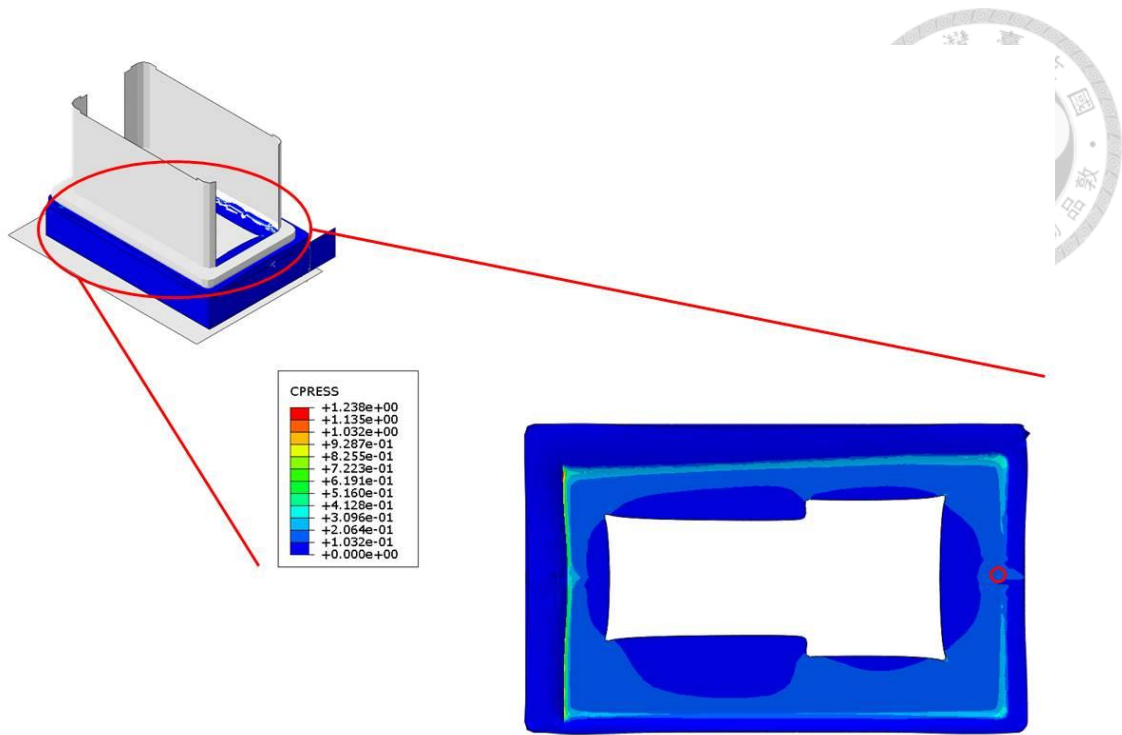


圖 5-3 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm 條件下之接觸應力分布圖

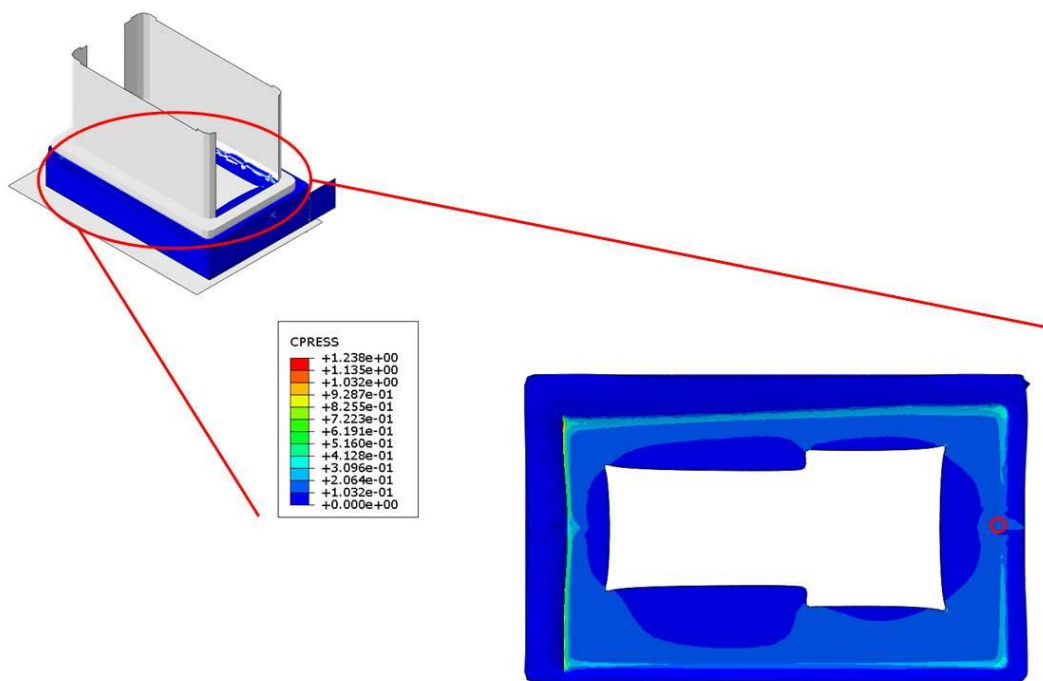


圖 5-4 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.3mm 條件下之接觸應力分布圖

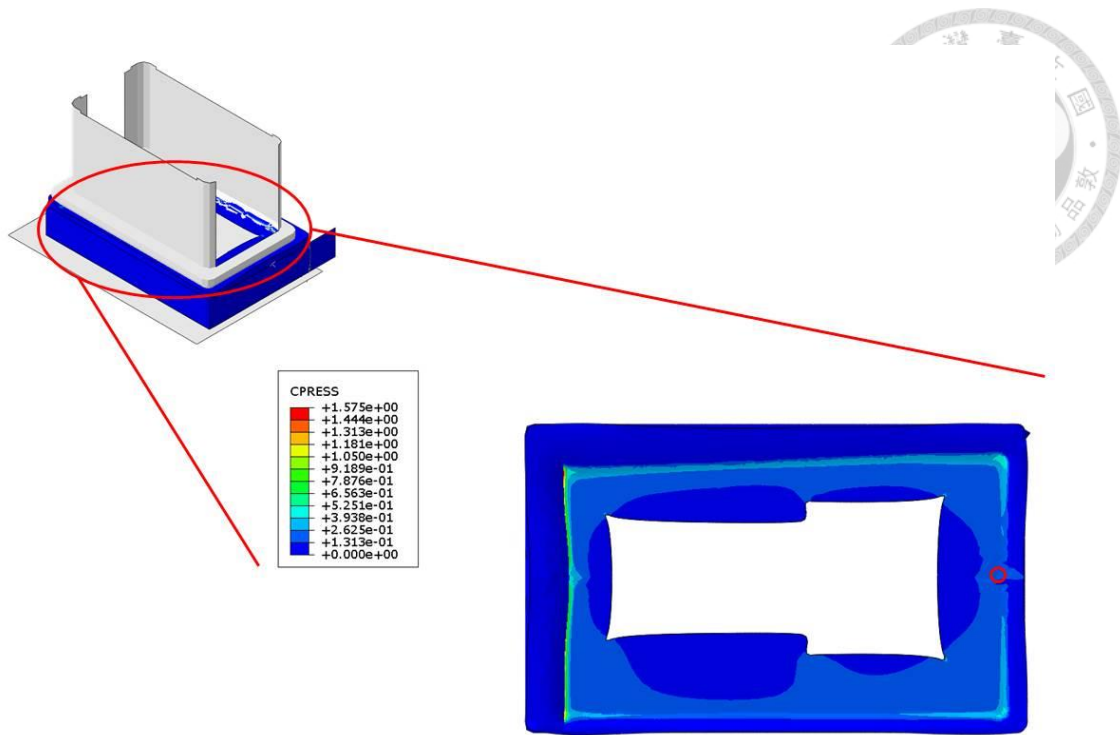


圖 5-5 二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.4mm 條件下之接觸應力分布圖

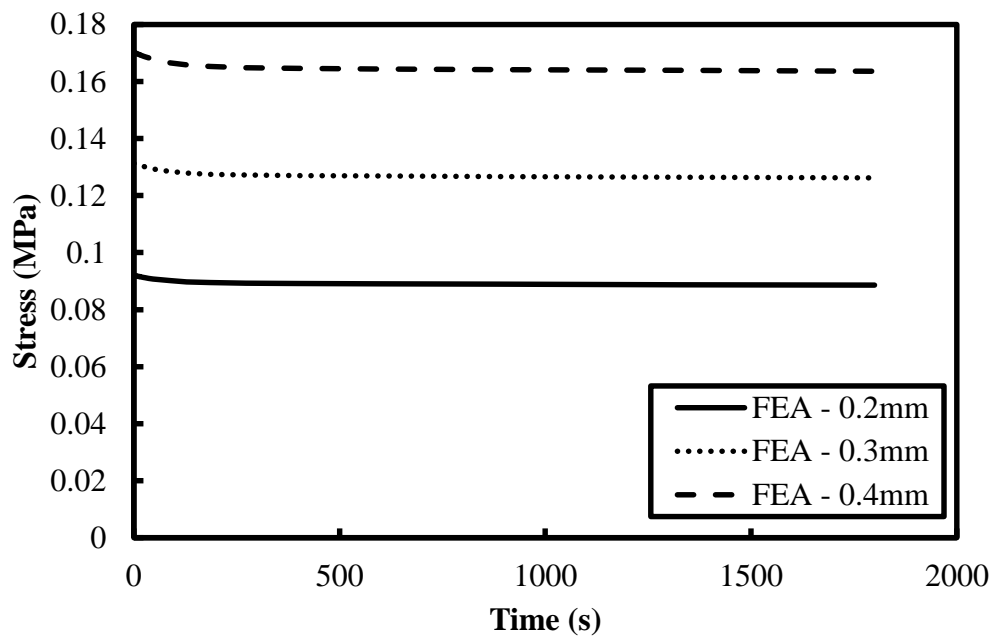


圖 5-6 二合一連接器矽橡膠墊圈承受三種下壓量條件下，關鍵元素之接觸應力與時間關係圖

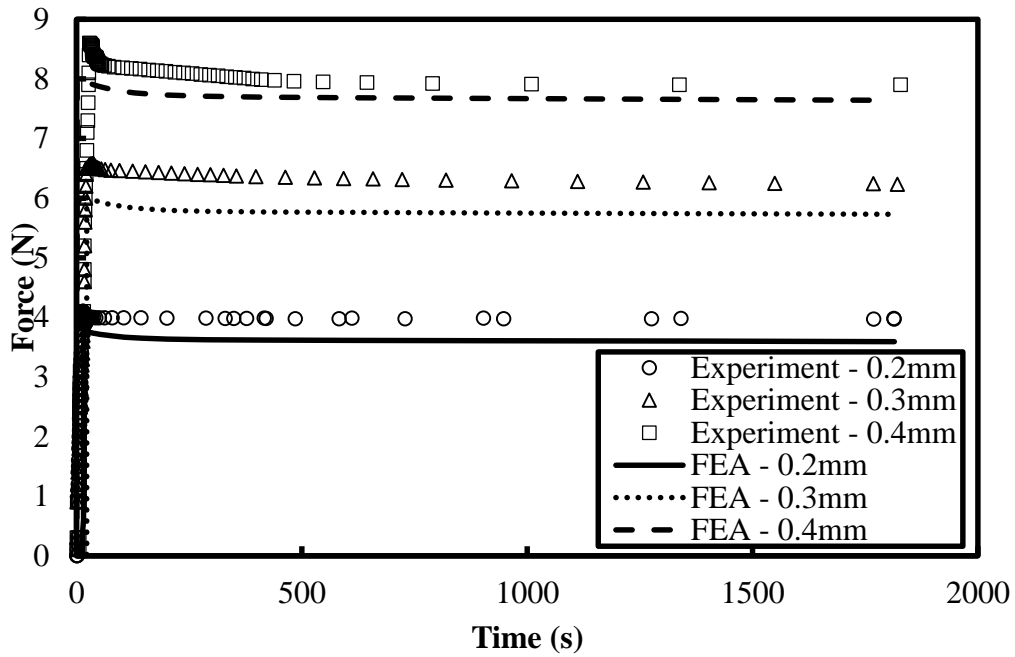
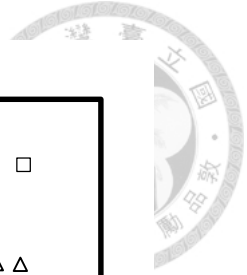


圖 5-7 耳機座連接器矽橡膠墊圈於三種下壓量條件下，有限元素分析所得壓迫墊

圈正向力量與相對應量測平均值比較圖

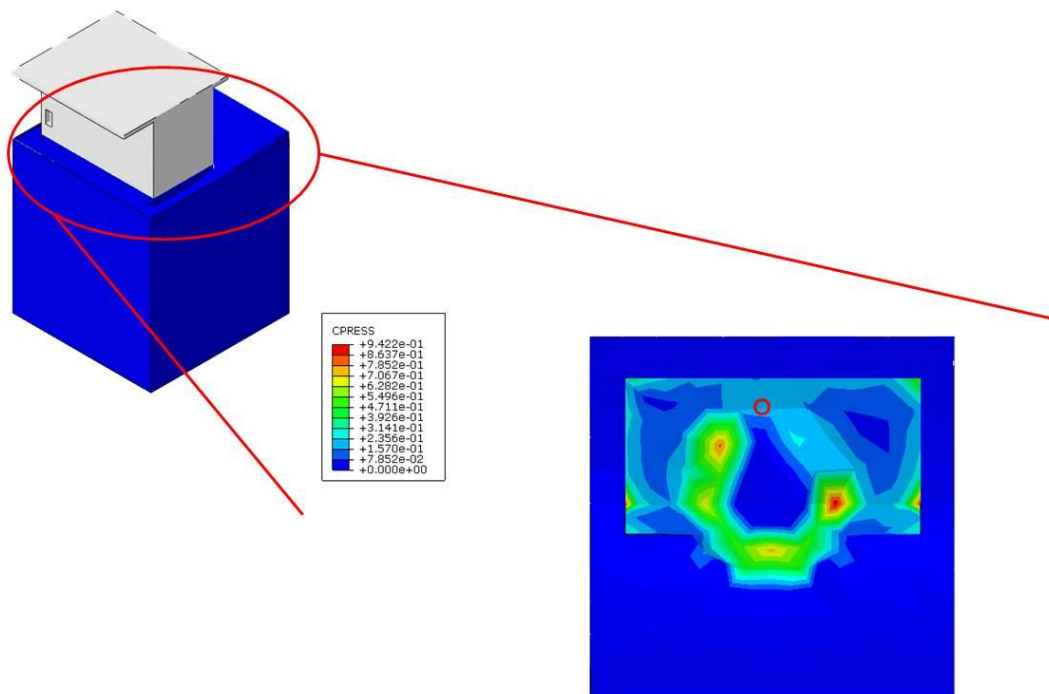


圖 5-8 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm 條件下之接觸應力分布圖

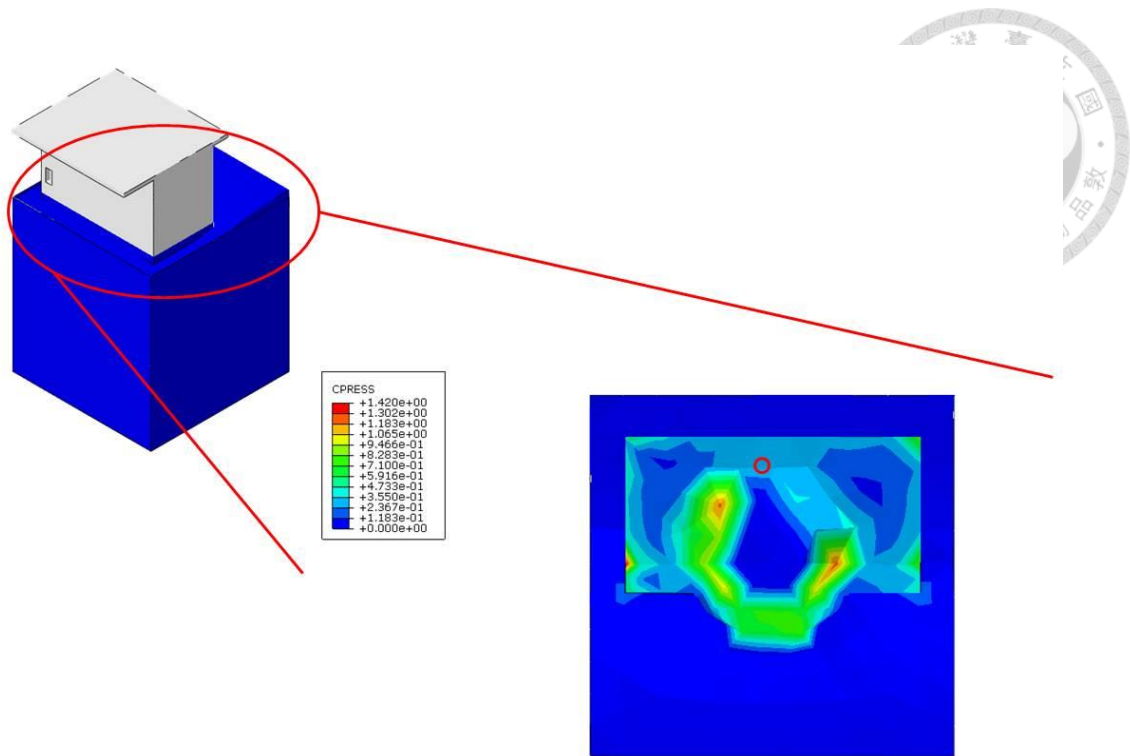


圖 5-9 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.3mm 條件下之接觸應力分布圖

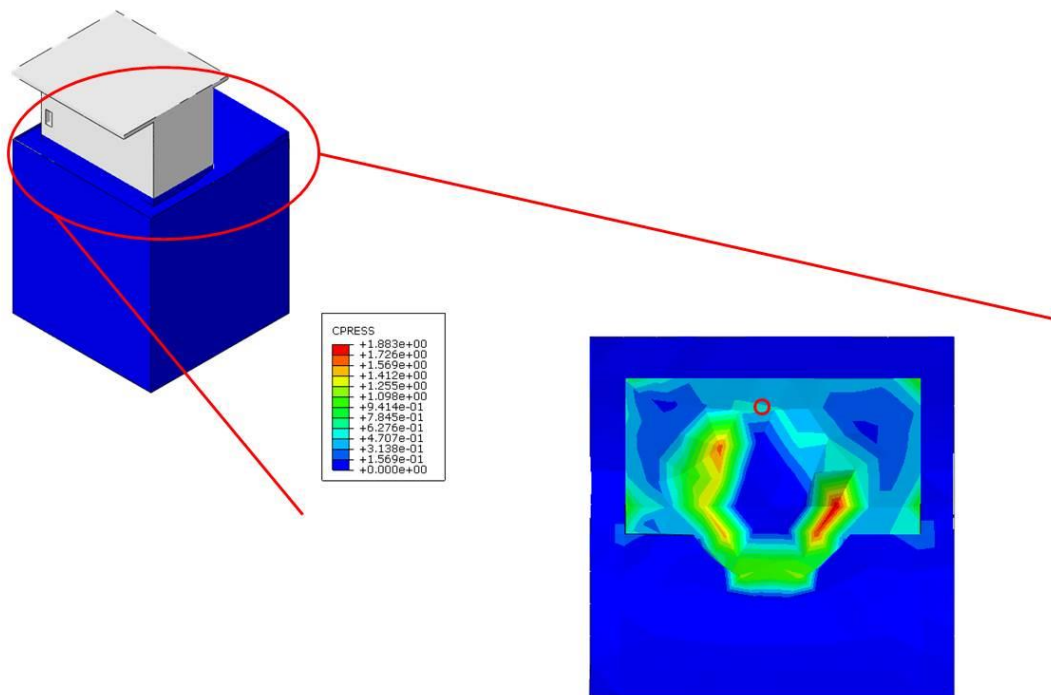


圖 5-10 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.4mm 條件下之接觸應力分布圖

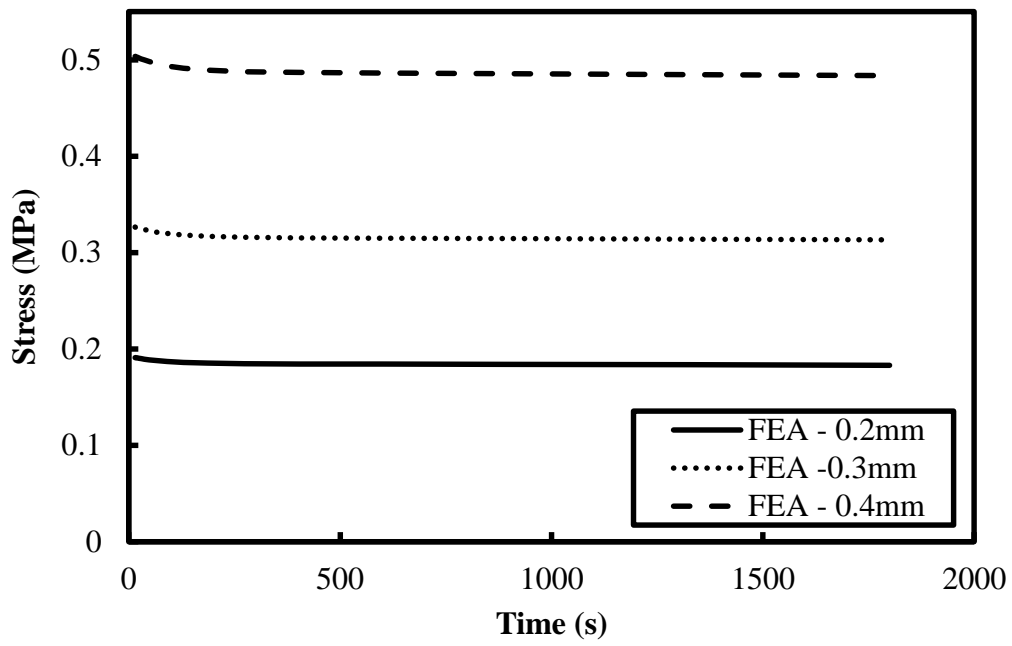
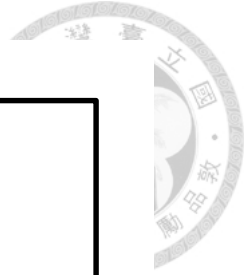


圖 5-11 耳機座連接器矽橡膠墊圈承受三種下壓量條件下，關鍵元素之接觸應力與時間關係圖

5-2 密封分析預測與實驗結果比較



利用二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm 條件下，關鍵元素之接觸應力與時間之關係，接續輸入表 4-3 列舉之洩漏率模型所需幾何與環境參數與矽橡膠墊圈之抗拉強度(S_i) 6.5MPa，藉由 MATLAB [1]中迴歸分析之非線性最小平方方法 (nonlinear least square)功能調整式(4-18)內 5 個材料參數 C_i ($i=1, 5$)，並與第三章所述相對應量測結果進行擬合，將迴歸結果整理列於表 5-3。接續預測墊圈承受下壓量 0.3mm 與 0.4mm 條件下之壓力損失百分比，圖 5-12 為數值分析結果與實驗量測平均結果比較圖。如前所述，測試規範為經過 1800 秒後，密閉腔體洩漏氣壓值不得大於初始氣壓值之百分之二，表 5-4 顯示三種下壓量於 1800 秒後，模擬與量測所得壓力損失百分比，兩者差異約為 2.8%至 10%。進一步預測耳機座連接器墊圈承受三種下壓量條件下之壓力損失百分比，與其相對應實驗量測平均結果比較，如圖 5-13 所示，表 5-5 顯示三種下壓量於 1800 秒後，模擬與量測所得壓力損失百分比，兩者差異則約為 4.5%至 7.8%。研究結果顯示，針對此兩連接器而言，矽橡膠墊圈均需承受下壓量略大於 0.4mm 之條件，方得使其壓力損失百分比符合規範。



表 5-3 洩漏率預測模型迴歸係數

$C_1(\text{mm}^4)$	C_2	C_3	C_4	C_5
3.62×10^{-9}	74.8	1.31×10^{-12}	-26.1	-1.01

表 5-4 二合一連接器於 1800 秒壓力損失百分比

承受下壓量(mm)	數值分析(%)	實驗量測平均值(%)
0.2	10.4	10.7
0.3	6.28	5.71
0.4	2.42	2.43

表 5-5 耳機座連接器於 1800 秒壓力損失百分比

承受下壓量(mm)	數值分析(%)	實驗量測平均值(%)
0.2	2.50	2.71
0.3	1.97	2.07
0.4	0.85	0.89

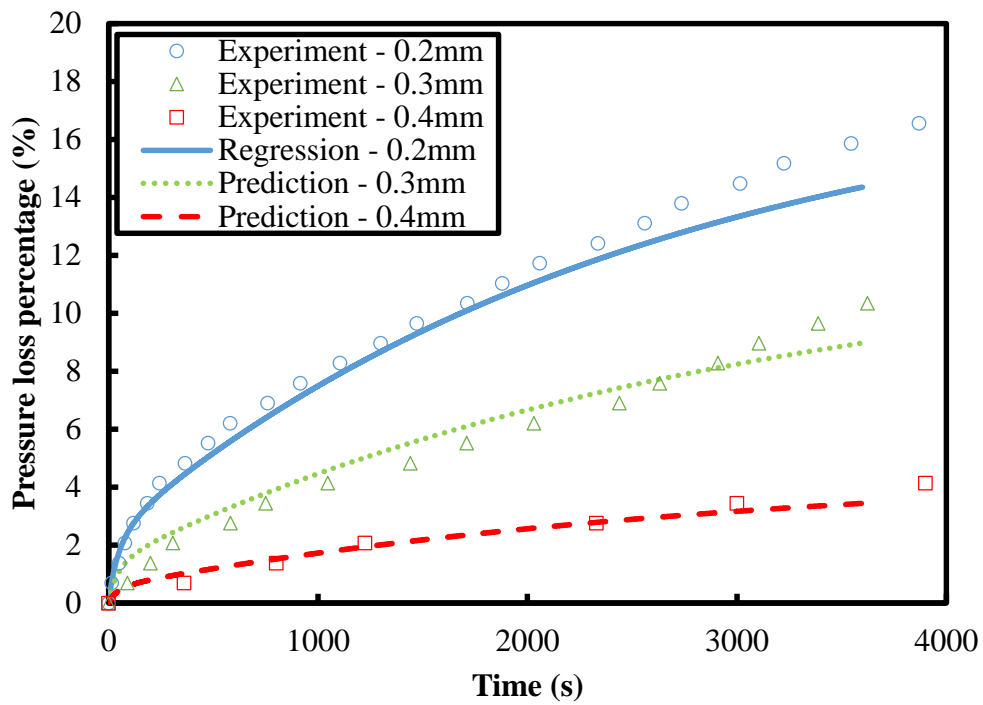


圖 5-12 二合一連接器密封分析與量測所得之壓力損失百分比比較圖

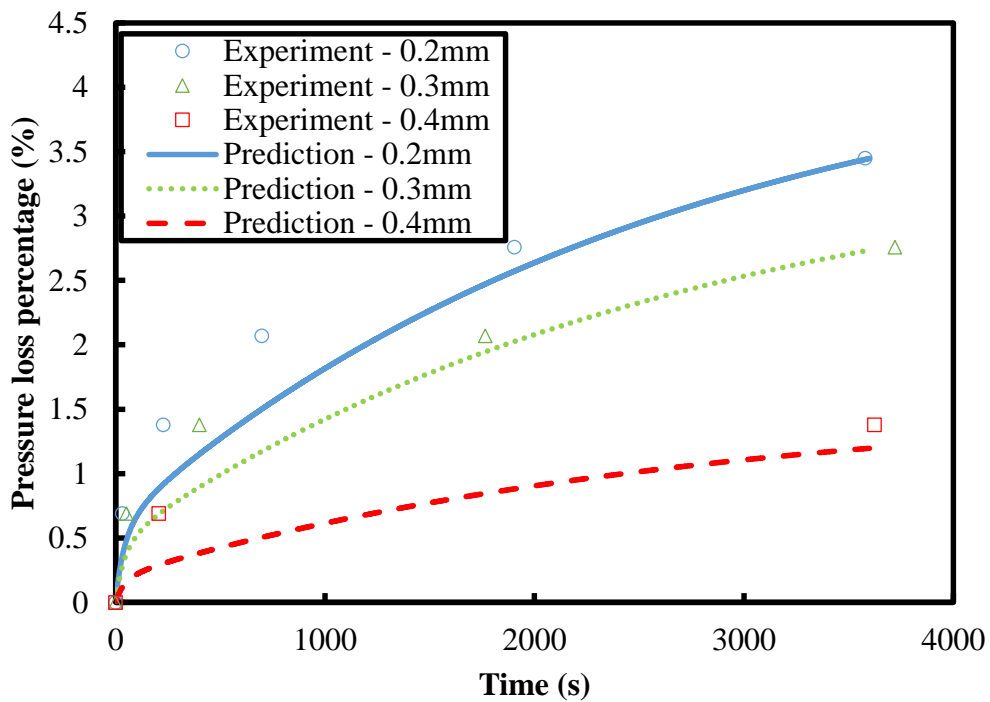


圖 5-13 耳機座連接器密封分析與量測所得之壓力損失百分比比較圖

第六章 結論




本研究針對矽橡膠墊圈應用於電子連接器之密封性能提供一系統化分析流程，首先將矽橡膠墊圈材料製成之標準樣本施以單軸壓縮鬆弛負荷，藉以獲得矽橡膠墊圈材料組成律參數。接續導入有限元素分析，獲取二合一連接器矽橡膠墊圈承受下壓量 0.2mm 條件下，關鍵元素之接觸應力。搭配密封實驗之壓力損失百分比量測數據，透過 MATLAB [1]針對之自行提出洩漏率模型進行參數迴歸，接續預測墊圈承受其餘較大下壓量條件下之壓力損失百分比，並與相對應實驗量測比較，具備良好吻合度。為驗證本研究之流程合宜性，另針對採用相同墊圈材料之耳機座連接器進行密封分析，預測墊圈承受三種下壓量條件下之壓力損失百分比，亦與相對應實驗量測比較，獲致良好一致性，彰顯本洩漏率模型可有效評估電子連接器之密封性能。

未來可依據本研究之成果，推廣至如 Liu 等人[14]之液體洩漏評估，其研究主要裝置基本上係由兩壓克力板間夾一墊圈材料組成，壓縮墊圈負荷可由組裝兩壓克力板之螺釘控制。墊圈上方形成一密閉腔體，液體藉由幫浦輸入此空間，同時利用壓力感測器紀錄密閉腔體壓力。裝置前方架設一攝影機，觀察液體洩漏情形。數值分析亦可遵循實驗設定進行模擬，進而提出適用於液體之洩漏預測模型，接續將本研究流程導入進行相關實驗與驗證，並檢視於設計階段之其它具備密封性能連接器，成信對於提升產品開發效率具備顯著助益。

參考文獻



1. MATLAB (R2010a). 2010. MATLAB User Manual, Release 7.10.0. USA.
2. Hibbit, H. D., B. I. Karlsson, and E. P. Sorensen. 2012. ABAQUS User Manual. Version 6.12. USA.
3. Yeong, S. C., W. S. Jeffry, and A. C. Lawrence. 2002. Ultra-low leak rate of hybrid compressive mica seals for solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 112: 130-136.
4. Shaobai, S., P. Jian, J. Sanping, and L. Jian. 2008. Prediction of H₂ leak rate in mica-based seals of planar solid oxide fuel cells. *Journal of Power Sources* 182: 141-144.
5. Peigat, L., M. Reytier, F. Ledrappier, and J. Besson. 2014. A leakage model to design seals for solid oxide fuel and electrolyser cell stacks. *International Journal of Hydrogen Energy* 39: 7109-7119.
6. Bouzid, A. H., and M. Derenne. 2002. Analytical modeling of the contact stress with nonlinear gaskets. *Journal of Pressure Vessel Technology* 124: 47-53.
7. Jolly, P. and L. Marchand. 2009. Leakage predictions for static gasket based on the porous media theory. *Journal of Pressure Vessel Technology* 131: 1-6.
8. Grine, L. and A. H. Bouzid. 2011. Liquid leak predictions in micro- and nanoporous gaskets. *Journal of Pressure Vessel Technology* 133:1-6.
9. Sun, Z. G., and B. Q. Gu. 2012. Prediction of Time-Related Leakage Rates of Bolted Flanged Connections by Considering the Maximum Gasket Contact Stress. *Journal of Pressure Vessel Technology* 134: 1-7.
10. Persson, B. N. J., and C. Yang. 2008. Theory of the leak-rate of seals. *Journal of Physics Condensed Matter* 20: 315011-315021.

- 
11. Lorenz, B., N. Rodriguez, P. Mangiagalli, and B. N. J. Persson. 2014. Role of hydrophobicity on interfacial fluid flow: Theory and some applications. *The European physical journal E* 37: 443-454.
 12. Yang, A. S., C. Y. Wen, and C. S. Tseng. 2009. Analysis of flow field around a ribbed helix lip seal. *Tribology International* 42(5): 649-656.
 13. Jeon, H., H. Seo, M. Kim, and J. Kim. 2012. A study on predictable model of waterproofing for mobile phone using finite element analysis based on evaluation of seal rubber. *ASME 2012 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference* 2: 131-136.
 14. Liu, Q., Z. Wang, Y. Lou, and Z. Sou. 2014. Elastic leak of a seal. *Extreme Mechanics Letters* 1: 54-61.
 15. Ke, Y., X. Yao, H. Yang, and Q. He. 2015. A measuring method of gas leakage along the contact interface of the stripped rubber seals. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 61: 299-304.
 16. Zhang, B., M. Yu, and H. Yang. 2015. Leakage analysis and ground tests of the O-type rubber ring seal applied in lunar sample return devices. *Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 299(3): 479-491.
 17. Marr, J. W. 1968. *Leakage testing handbook*. National Aeronautics and Space Administration.