

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

雙級熱壓縮儲氫系統模組建立及性能參數研究

Module development and performance study of two-stage thermal
hydride compressor

研究生：吳孝修

指導教授：崔燕勇博士

中華民國九十八年七月

雙級熱壓縮儲氫系統模組建立及性能參數研究

**Module development and performance study of two-stage
thermal hydride compressor**

研究生：吳孝修

Student : Wu Shiau-Shiou

指導教授：崔燕勇

Advisor : Tsui Yeng-Yung

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文



**Submitted to Department of Mechanical Engineering
Collage of Engineering**

National Chiao Tung University

In Partial Fulfillment of the Requirements

For the degree of

Master of Science

In Mechanical Engineering

July 2009

Hsinchc, Taiwan, Republic of China

中華民國九十八年七月

雙級熱壓縮儲氫系統模組建立及性能參數研究

研究生：吳孝修

指導教授：崔燕勇 博士

國立交通大學機械工程學系

摘要

氫氣儲存及輸送過程上之安全性偏低，故在氫氣使用時，如何儲存加壓是目前面臨難題之一。在本文中使用的儲氫合金材的特性，解決此類問題。儲氫合金材的體積儲存密度高且穩定性佳，而不同的溫度可使氫氣在儲氫合金材的吸氫壓力、放氫壓力特性滿足在壓縮轉換過程中所需的機制。本文討論使用熱源將不同之儲氫合金粉末特性改變，將多段壓縮氫氣，此方法相較於一般機械式氫氣壓縮機所需的耗能少，且安全性及穩定性都較好。

本研究經過多年對儲氫合金的研發，及研究其相關之參考文獻，發展出熱壓縮儲氫系統；說明儲氫合金特性及系統設計，此系統為熱驅動且無傳動元件的氫氣壓縮機。並討論氫氣壓縮系統隨著不同的入口壓力、不同冷熱源的轉換時間及熱交換之設計，所產生的最佳效益及結果。

Module development and performance study of two-stage thermal hydride compressor

Student: Wu Shiau-Shiou

Advisor: Dr. Tsui Yeng-Yung

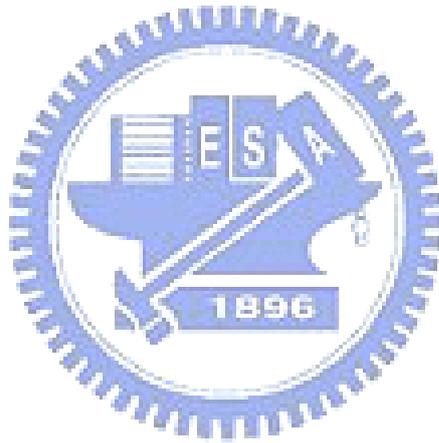
**Department of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University**

Abstract

The safety of hydrogen storage and transformed efficiency is inferior. The main problem is how to store hydrogen and compressor the pressure to while supplying to the fuel cell. The hydrogen metal is put to use to remove the drawback. The character of metal hydride is high volumetric density in safe and reliable hydrogen storage, and we can get specific pressure in need of transformation by exchange environmental temperature. Compared to the traditional mechanical hydrogen compressor, compressing several sorts of heated hydrogen metal in more effective, and it is also safe and steady. “Thermal Hydride Compressor System.”, which is the hydride compressor that perform by heat and need not transmission. To find the best operation efficiency in controlling difference inlet-pressure, the time of heat-exchange and heat-exchange chamber. This paper will also refer to the system-design and introduction of metal hydride.

誌 謝

交大機械所的兩年時光裡，首先感謝崔燕勇教授的許可及溫惠婷的引薦才有機會前往工研院做實驗並完成論文，在論文的指導上老師跨領域了解並諄諄教誨，不馬虎且適當的糾正其方向，才能使論文順利完成，而溫惠婷則是輔導本人進入陌生之氫能領域及兩年來不見斷得支持我在此也特別致上感謝，另外感謝工研院趙令裕學長、清大動機謝仲儒有你們在實驗室相互幫忙及扶持，使我了解團隊之重要，並且學習發現問題及解決問題之能力，再來感謝交大實驗室學長：林仕文、吳欣恩、李俊岩在課業上的照顧，及學弟：郭大慶、陳信宏、何光桓在生活上的幫忙，陳俊佑及張祚昌這兩年相處中的相互鼓勵，及感謝交大機械所的好友們：盧仁鈞、王俊傑、陳文慶等人。有你們讓我在交大的生活更為多采多姿。最後跟默默付出的父母親說：你們辛苦了。



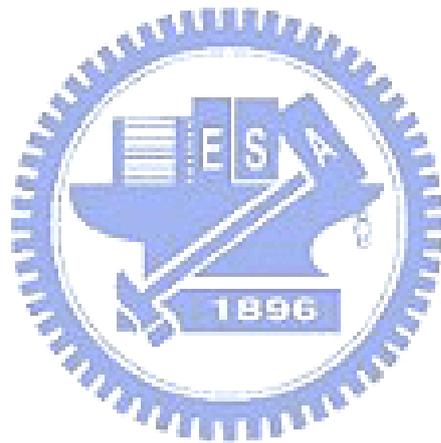
目 錄

中文摘要	iii
英文摘要	iv
誌謝	v
目錄	vi
表目錄	ix
圖目錄	x
第一章、簡介	1
1-1 研究背景	1
1-2 國內能源之發展現況	3
1-3 氫氣儲存方式	4
1-3-1 高壓氣體儲存	4
1-3-2 液態方式儲存	4
1-3-3 物理吸附 (奈米碳管)	5
1-3-4 金屬氫化物儲氫	5
1-4 熱壓縮式儲氫系統之現況	6
1-5 文獻回顧	7
1-6 研究目的	8
第二章、儲氫合金基礎理論與探討	10
2-1 儲氫合金介紹	10
2-2 儲氫合金之動力性質	11
2-3 儲氫合金之熱力性質	12
2-4 儲氫合金之活化	13
2-5 平台區之斜率	13
2-6 儲氫合金之遲滯現象	14
2-7 熱爆 (Decrepitation)	14
2-8 氣體雜質之影響	14
2-9 儲氫合金之應用領域	15
2-9-1 儲氫容器	15

2-9-2 氫純化	15
2-9-3 熱泵【32】	16
第三章、熱壓縮儲氫系統	17
3-1 儲氫合金材料特性選用	17
3-2 儲氫合金容器設計	18
3-3 熱交換器設計	20
3-4 系統設計	23
3-4-1 單級熱壓縮儲氫系統理論	23
3-4-2 多級熱壓縮儲氫系統理論	23
3-4-3 多級連續釋氫熱壓縮儲氫系統理論	24
第四章、系統建立與實驗方法	25
4-1 系統架構	26
4-1-1 儲氫系統控制流程	26
4-1-2 控制器運算流程	26
4-1-3 系統實際擷取資料	27
4-2 實驗設備	27
4-2-1 油端設備介紹	27
4-2-2 控制元件	28
4-2-3 氫氣端系統介紹	28
4-3 實驗步驟	28
4-3-1 油端系統	28
4-3-2 氫氣端系統	29
4-4 實驗初始化	30
第五章、結果與討論	31
5-1 儲氫材料之特性測試	31
5-2 實驗參數之現象反應	31
5-2-1 第一級(低壓)儲氫合金之吸放氫現象探討	32
5-2-2 暫存槽壓力建立之現象探討	32
5-2-3 暫存槽壓力建立及第二級儲氫合金吸放氫之現象探討	33
5-2-4 暫存槽壓力建立及所對應之瞬時流量	34



5-2-5 平均體積流率之探討	34
5-3 不同熱交換器之性能表現.....	35
5-3-1 不同熱交換器平均體積流率之比較	35
5-3-2 不同熱交換器壓縮時間之比較	35
5-3-3 不同熱交換器到達設定高壓之比較	36
5-3-4 不同熱交換器壓縮比之比較	37
第六章、結論	38
參考文獻.....	40



表目錄

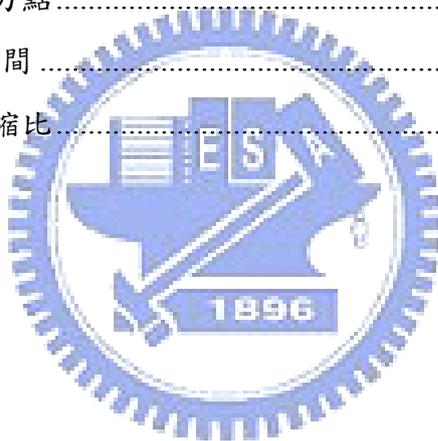
表 1-1 全國能源技術發展現況.....	43
表 2-1 週期表中各族元素與氫之結合特性【18】	44
表 2-2 四種儲氫合金類型之整體比較【19】	44
表 2-3 四種儲氫合金之基本性能【17】	45
表 2-4 世界各國金屬氫化物儲氫容器性能表【30】	46
表 3-1 氫氣壓縮機之比較【34】	47
表 3-2 氫氣壓縮機之比較續【34】	47
表 3-3 熱交換器之比較.....	48



圖目錄

圖 1-1 各種儲氫技術之目標設定【3】	49
圖 1-2 各種儲氫方式之儲氫重量/體積密度之比較【4】	49
圖 2-1 儲氫合金之吸放氫過程 (a) 吸氫過程 (b) 釋氫過程【20】	50
圖 2-2 氫化物吸氫過程以能階形態表示【21】	51
圖 2-3 儲氫合金之 P-C-T 曲線【21】	52
圖 2-4 遲滯損失【26】	53
圖 3-1 Van's Hoff 曲線【35】	53
圖 3-2 罐體設計圖	54
圖 3-3 鋁及不鏽鋼之不同溫度所對應之熱傳導係數	54
圖 3-4 鋁及不鏽鋼之熱交換器性能	55
圖 3-5 再生式熱交換器推導之示意圖	55
圖 3-6 第一級熱壓縮儲氫系統操作理論【35】	56
圖 3-7 多級熱壓縮儲氫系統操作理論	56
圖 3-8 雙級壓縮非連續示意圖	57
圖 3-9 雙級壓縮連續示意圖	58
圖 4-1 矩形熱交換器及儲氫合金罐體放置示意圖	59
圖 4-2 圓柱形鋁製熱交換器及儲氫合金罐體放置示意圖	59
圖 4-3 實驗設備實圖	60
圖 4-4 南分院實驗室系統監控	60
圖 4-5 儲氫控制系統架構圖	61
圖 4-6 系統動作流程圖	62
圖 4-7 PLC 控制流程圖	63
圖 4-8 人機介面規劃畫面	64
圖 4-9 油溫控制器	64
圖 4-10 PLC 控制器	64
圖 4-11 氫氣鋼瓶及降壓調節閥	65
圖 4-12 Yokogawa 壓力計	65
圖 4-13 RTD 溫度計	65

圖 4-14 實驗流程圖.....	66
圖 4-15 監控程式畫面.....	67
圖 5-1 低壓儲氫合金之特性曲線.....	67
圖 5-2 高壓儲氫合金之特性曲線.....	68
圖 5-3 雙級壓縮 Van's Hoff 圖.....	68
圖 5-4 第一級儲氫合金槽內壓力與轉換溫度轉換關係.....	69
圖 5-5 暫存槽內壓力與轉換溫度轉換關係.....	70
圖 5-6 第二級儲氫合金槽內壓力與暫存槽內壓力關係.....	71
圖 5-7 暫存槽內壓力與所轉換之瞬時流量對應圖.....	72
圖 5-8 暫存槽內平均體積流率對於循環次數對應圖.....	73
圖 5-9 導入鋁製熱交換器暫存槽內平均體積流率對於循環次數之比較.....	74
圖 5-10 90 分鐘所對應之壓力點.....	75
圖 5-11 壓力 2400psi 對應時間.....	76
圖 5-12 90 分鐘所對應之壓縮比.....	77



第一章、簡介

1-1 研究背景

自從工業革命開始，人類對於石化燃料的使用日漸倍增，燃燒大量的煤炭及石油產生工業產品及商業服務，但這些年來燃料裝置的進步，使得更有效率地使用能源，如在美國能源效率由十九世紀中期每 GDP(國內生產毛額)需花費 70MJ 的能量，下降至今日每 GDP 需花費 20MJ 的能量，一百多年來效率增進 3.5 倍，還有商用燃料的多元化，除了早期的煤炭石油外，人類也發展出天然氣、核能、再生能源等，其含碳量的比例其實是在下降的，碳與氫的比例 (C/H) 大約是：木材 (10/1)、煤(2/1)、石油 (1/2)、天然氣(1/4)，此種轉變乃是對於能源環境的重視，因使用石化燃料所產生的二氧化碳，造成地球環境的破壞，如：兩極融冰，暴風雨強度，人類的未來生存已出現警訊；另外提高能量密度也是未來能源的指標，固體燃料的市場佔有率也被液態燃料給取代，以交通部門在這轉變上最明顯，但近年來氣體燃料也有取代液化燃料的現象，天然氣佔有率有穩定成長，但主要使用對象乃限制於定置型發電，故必須尋找出一種替代石化燃料的能源，結合以上低的含碳量及高的能源密度，氫是未來較有機會替代的能源，氫存在於世界上的各個角落，氫能源沒有分配不均的情形，氫在使用上及最終生成的產物，並不會造成對地球環境的破壞，故氫能源的研究已逐漸受到世人的重視。

許多世界知名科學家包含我國中央研究院院士李遠哲博士都預言，二十一世紀是氫能源的世紀，因為在這世紀中，氫能將取代化石能源為主導人類文明發展，原因有四：

- (1) 化石能源即將使用完畢，人類所仰賴的石油及天然氣在本世紀中旬後蘊藏量已無法供給人類需求，在此之前，兩者之價格將飆漲而嚴重影響全球經濟發展和世界和平，而氫氣為世界上存在最多元素之一，可說是取之不盡，用之不竭。
- (2) 環境污染嚴重：人類在二十世紀大量使用化石燃料，導致地球上的土地，空氣及水資源都有嚴重的污染問題，危及人類得生存及物種的演化，而氫轉換成能量所產生的副產品只有水，不會對環境造成許多的破壞。
- (3) 全球氣候的惡化：燃燒化石燃料所產生的溫室氣體已嚴重影響人類的生存，造成氣候的變遷，破壞了自然的生存法則，而氫為能源時，在轉換的過程中不產生任何的溫室氣體。
- (4) 能源分配不均：少數的工業國家用掉全世界大部分的能源，使得這些工業國家透過不同的手段，如：外交，軍事，經濟等手段，控制了能源分配，嚴重威脅到全球各國的供需平衡，而氫能無所不在，所以無分配的問題，以上四

點是使用氫能來取代石化燃料中，最重要的論點，但在取代的過程中，也會遇到許多的問題。

真正要使用氫氣當作動力來源還有許多障礙，例如:1937年的Hindenburg飛艇災難，事實上災難的發生確實是氣體點燃爆炸產生，但要使氫氣爆炸需要三大元素：氧化劑(比如空氣等)、火花產生與氫氣的濃度，一旦這三個因素聚集，氫氣極可能產生燃燒或爆炸。其中最關鍵的是火花的產生是由飛船帆布表面的靜電所產生，而非氫氣自動的爆炸，因此在使用氫氣的安全考量上，需要一段很長時間教育、宣導及相關法規之規定，讓世人對於氫氣之認知才有所改變；另外以相同之重量比較，氫氣所含的能量是石油的三倍，但氫氣的儲存方式還是沒有辦法像傳統液態燃料那樣簡單緊密，以汽車為例，如何有效的縮小其容量空間，使汽車駕駛座更為寬敞，汽車駕駛人提供所需的行駛距離和性能，儲存裝置的氫容納量必須足以達到目前可接受的480公里最低的行駛距離需求。儲存槽必須以需要的流速釋放氫氣以便在道路上加速，並在實際的溫度下能良好操作，最後還得在數分鐘內加滿或充填完成，且價格必須有競爭力。但目前的氫儲存技術離以上目標都還相當遙遠。

國際能源總屬於1977年簽署「氫使用協定」是目前最大的氫儲存研究團隊。成立於2003年的「氫經濟國際合作計畫」已有17國政府參與，致力於推動氫能源與燃料電池技術。2004年12月亞太經合會(Asia Pacific Economic Cooperation, APEC)能源工作組(Energy Working Group, EWG)與工業科學技術組(Industrial Science and Technology Working Group, ISTWG)於泰國召開「未來能源技術展望會議」，利用情境推演規劃方式(Energy Scenario planning)歸納至2030年未來能源科技發展之重點方向，主要四項領域為：1.氫能與燃料電池 2.生質燃料 3.化石能源淨潔利用技術 4.非矽材料低成本太陽電池及核融合技術等。氫能源並在這次會議中，在主要未來研究發展重點。此外，美國能源部在能源科技基礎研究之領域，主要為奈米技術能源利用、氫能與燃料電池、及能源安全之應用等方面。另外，美國能源部也於2005年開始執行「國際氫儲存計畫」，成立三所卓越研究中心，在2006年，這項計畫就提供了3000萬美金的經費給80項左右的研究計畫。

由此可看出，全球投入氫能產業的熱潮，會隨著能源價格飆漲，產生更大前進之動力。

1-2 國內能源之發展現況

國內能源科技研究發展主要依據民國 87 年 5 月全國能源會議及後續包括第 6、7 次全國科學技術會議在內之相關會議結論作為規劃及推動方向，以期於民國 99 年(2010 年)達成累積節約能源 28%以上及再生能源發電容量配比達 10%以上。依據上述政策目標，我國能源科技發展以「再生能源」、「能源新利用」及「節約能源」等三大領域為推動重點表 1-1。

其中氫能產業為國內發展之重心，人類花了將近百年的時間才建立目前方便好用的石化能源經濟體系，自不可能在短短數年之間就可輕易轉換到陌生的氫能經濟體系。在轉進氫能經濟體系時，能源使用者不僅將面臨較高的使用成本、環境建構不足、缺乏使用經驗等問題。為解決上述問題，世界各國除積極開發技術外，同時也廣泛進行示範計畫提供技術驗證，累積使用經驗，發掘不預知的問題，提供教育推廣，先導使用者環境建構，以及建立或修正法規、標準等功能，創造誘因和提供動力以加速新產品普及。推動示範計畫進行，不僅應該考慮產品及其技術的特色，更須考慮目標環境的特性及實施時間。氫能源技術依領域可分為生產、運輸、儲存、利用、應用等。在各領域分別以低成本、高效率之中小型現場製氫技術；新能源使用方式之環境建構，加氫站、能源站示範計畫，研發現有運輸系統適用之較佳材料、組件；低成本、輕量化儲氫系，改善燃料電池汽車之聯繫界面；低成本、長壽燃料電池及高效率引擎、渦輪機；分散式發電、燃料電池汽車等研發重點。氫能源示範應用之目的為：

- 1.研發成果與先導產品技術驗證
- 2.累積使用經驗，發掘不預知的問題，在產品普及之前預先消除問題
- 3.教育推廣，以促進產品更易於被社會所接受
- 4.建構新技術應用產品導入使用環境誘發新產品、新應用
- 5.新創產業提供工作及提升產業競爭力
- 6.累積數據作為國內建立或修正法規、標準之參考。

為了展示我國氫能技術的研發成果，工研院選定為工研院南分院，建立氫能開發/應用示範專區；一方面除可展示國內發展之氫能源技術與硬體設備，並驗證其系統耐久性運轉與實用性外，另一方面亦可作為國人認識氫安全性與應用性之宣導教育場所，以利氫能產業的推動及氫能經濟社會早日來臨。其中氫能的運轉的使用鍊上，產氫、儲存、壓縮及最後的應用上，在南分院已經有完整的規劃，工研院研發相關團隊建立此系統並

且與市售上研發出來的相關產品作為比較，而目前氫能專區以建構完整市售產品之氫能使用鍊，而工研院自行研發的系統只有儲存及壓縮已移交至南分院，而儲存與壓縮則採用熱壓縮儲氫系統取代傳統隔膜式壓縮機，熱壓縮儲氫系統具備以上氫能源示範專區應用之重點項目，為國人先導型研發系統。

1-3 氫氣儲存方式

根據研究顯示，在常溫常壓下（一大氣壓約等於每平方公尺 1.03 kg/cm^2 ），氫氣的相態為氣態，能量密度只有液態汽油的 $1/3000$ 。容積75公升的箱子儲存一大氣壓的氫器，只能推動一般汽車152公尺左右，因此要達到系統可用的程度需提高儲存密度；氫氣是世界上分子量最低的元素，但具有爆炸的危險性，故如何安全儲存氫氣是氫能源發展上遇到的瓶頸之一，氫儲存方式有：氣體鋼瓶儲氫，液態儲氫，奈米碳儲氫，儲氫合金儲氫...【1】等等，其中在國內最常使用的是前面兩種方法。

1-3-1 高壓氣體儲存

壓縮儲氫方式是將氫氣以氣態形式壓縮儲存於高壓容器中，可在常溫下使用，是目前最簡單和最常用的儲氫方法，耐高壓的儲氫容器及材料是此方法的關鍵，傳統高壓鋼材製成的儲氫壓力容器利用耐高壓（約300bar）的鋼材所製造，通常儲存的氫氣壓力大約為200bar。而利用儲氫罐儲存氫氣的缺點則是儲氫密度偏低；創新開發的高強度儲氫容器罐瓶採用碳纖強化材料製成，可以耐高達600bar之高壓，而平常使用時則填充至450bar的儲存壓力，儲氫重量可達總重量的3~6wt.%。

1-3-2 液態方式儲存

液態儲氫具有儲存氫氣質量的比例，提高能量密度，目前液氫的儲存重量比約16wt.%，體積容量約 $0.04 \text{ kg H}_2/\text{L}$ 。但是氫的液化溫度低 -253°C ，氫氣液化成本高，能量損失大氫氣液化大約需要消耗掉液化氫氣本身所含能量的40%，而且存在蒸發損失，除此之外，由於氫液化的臨界溫度很低，在此溫度(33.2K)之上液態氫無法存在，因此液態氫只能存放在開放的系統當中，否則在室溫封閉系統中會有極高的壓力產生，導致危險性的發生，所以在常壓下蒸氣損失將是無法避免的。故在室溫下液化氫氣所需的能量理論值約為 3.23 kWh/kg ，但實際上卻需要達到 15.2 kWh/kg ，需要極好的絕熱裝置來隔

熱，才能防止液態氫不會沸騰汽化，導致液體儲存設備非常龐大，因此較適合於陸上大型儲槽及海上運送船舶儲槽。

1-3-3 物理吸附（奈米碳管）

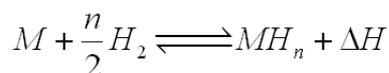
物理性吸附的方法則是利用材料本身的多孔性以及與氫氣分子間的吸引力達到聚集氫氣分子的目的，目前常見的吸附材料大都為碳基材料如碳纖維、活性碳以及奈米碳管等。CarPetis and Peschka【2】兩位學者首先提出在低溫條件下氫氣能夠在活性碳中吸附儲存。他們研究得知利用氫在多種活性碳上的吸附等溫線（adsorption isotherm），氫氣在活性碳上的吸附容量可以達到8.2 wt%以上。

。1998年 Browning et al.【3】對於奈米碳纖維(Graphite nano-fiber, GNF)的儲氫能力進行研究，溫度 600°C 時通入乙烯氣體，並以 Fe/Ni/Cu 為金屬觸媒進行反應生成奈米碳纖維，發現這樣的材料在室溫及 120atm 的環境下，擁有 4.18 wt.%的儲能力。由於碳是一種良好的氣體吸附材料，對於很多氣體都有不錯的吸附能力，而這種性質的產生是由於：(1)材料本身結構存在著許多微細的顆粒以及相當緻密的多孔結構；(2)在碳原子與被吸附的氣體之間存在著相互吸引的作用力。



1-3-4 金屬氫化物儲氫

金屬氫化物的儲氫原理乃使大量的氫氣為金屬所吸收，並轉變成金屬氫化物的形式儲存，氫就以固態結合的形式儲存於其中。氫和氫化金屬之間可以進行可逆反應，當外界有熱量加給金屬氫化物時，它就分解為氫化金屬並釋放出氫氣，其反應式如下式所示：



式中M：儲氫合金， MH_n ：金屬氫化物， ΔH ：反應熱

用儲氫合金材料儲存與輸送氫，有以下特點：(1)體積儲氫密度高；(2)不需要高壓容器和隔熱容器；(3)安全性好，沒有爆炸危險；(4)可得到高純度氫。以MmNi_{4.5}Al_{0.5}(Mm為混合稀土金屬)儲氫合金儲氫裝置為例，該儲氫系統與過去150bar的高壓氣瓶方式相比，在相同儲氫量下，其容器體積僅為高壓氣瓶的1/4。整個系統的體積變小，使汽車的運氫量相應增大，容器壓力降到10bar以下，提高了安全性，並且同時還提高了氫的純度，使氫燃料的附加值增加。由於儲氫合金對在適度的溫度壓力條件下發生可逆回應的特性，儲氫合金不僅可將氫氣在低壓環境下以固態模式儲存，儲氫合金應用於各種氫氣壓

縮及能量傳遞的媒介。如圖1-1【4】，全世界的汽車產業、政府和學界研究人員，都投入極大的心力欲克服氫儲存容量之限制，以早日達到預計目標，圖1-2為各種儲氫方式之儲氫重量/體積密度之比較【5】。

1-4 熱壓縮式儲氫系統之現況

美國 Ergenic 公司在 2001 至 2003 年，接受美國能源部經費對熱壓縮儲氫技術做一系列開發與先導實驗系統。Ergenic 公司除了完成熱壓縮儲氫的先導系統建立，並完成利用熱壓縮儲氫系統將氫氣中混雜的一氧化碳、二氧化碳與氧氣等不純氣體加以排除的能力測試，藉以提高燃料電池的使用壽命。該公司所建立的先導系統可製造出高達 560 大氣壓的高壓氫氣，不過 Ergenic 公司後來被加拿大 HERA 氫氣儲存系統公司所購併。HERA 公司目前提供微量熱壓縮儲氫泵的商品，壓縮能力可達 200 大氣壓，流量為每小時 2.5 立方公尺，是利用電熱器加溫當做動力來源。

挪威的 IFE (Institute of Energy Technology) 規劃在 2003 至 2006 年要開發出供給汽車燃料電池用高壓氫氣使用的熱壓縮儲氫系統，預期可以提供的壓力為 345 大氣壓以上的高壓氫氣，未來並希望發展出壓縮能力達 700 大氣壓以上的商業機種。冰島大學也計劃利用冰島具有的豐富地熱資源當做能源，建立大型熱壓縮儲氫系統。

日本製鋼所 (Japan Steel Works) 針對儲氫合金應用與發展已超過 20 年，是日本主要開發儲氫合金的公司，該公司將儲氫合金應用在氫氣儲存與取代冷媒壓縮機應用上。熱壓縮儲氫系統是因應客製氫氣儲存設備的需求，依照客戶需求進行儲氫系統的改良，加熱儲氫合金達到加壓氫氣的目的。

俄羅斯與烏克蘭等獨立國協科學家從 1970 年代，即針對儲氫合金技術做了長久的開發研究。其在 2005 年於國際氫能期刊所發表的回顧文章中顯示，獨立國協中的烏克蘭目前具有將氫氣加壓到 300 大氣壓的熱壓縮儲氫系統技術能力。

工業技術研究院在經濟部能源基金的支持下，配合未來氫能技術運用所需要的熱壓縮儲氫系統，目前已完成實驗型熱壓縮儲氫系統，在 150°C 溫度下，可將氫氣壓力提高到 200 大氣壓。預期到 2009 年，將可完成把氫氣壓力提升到 345 大氣壓以上的大型熱壓縮儲氫系統。

1-5 文獻回顧

Jemni et al. 【6】於1993年發表出一簡單的二維儲氫合金之熱質傳模擬，計算模擬在儲氫合金的研究早期是非常罕見的，故此模擬為了化簡方程式，將動量方程式簡化成此 Darcy's law，由於其他項對於吸放氫的性能影響不大，但對於目前的模擬來說，還略顯粗糙，但讓後人在儲氫合金的模擬上有相當重大的發展，而此篇文獻討論不同的儲氫合金罐體內部的直徑與熱交換床的選擇是影響儲氫合金吸放氫重要得參數，並且說明入口壓力及熱交換器的溫度也是吸放氫關鍵的參數之一。

Willers 與Groll 【7】於1999年發表將儲氫合金應用於熱轉換器系統並效益研討，藉次證明儲氫合金在能源領域中為相當具有前途的應用材料，並在同年將合金應用至熱波裝置。

Muthukumar 【8】於2002年發表出單級熱壓縮儲氫合金的參數研究，本篇文章構思了一個完整的循環，並且改變不同的熱傳導參數，對流參數及管徑的差異，尋找出最適合的熱傳條件，由本篇文章可得知，熱交換床的設計會直接影響熱壓縮儲氫合金系統效益。

Faouzi 【9】於2003年將動量方程式引入Darcy's law並且利用CVFEM模擬，成功模擬出吸氫時，內部合金粉末溫度的變化，不同的入口管徑大小及對於儲氫合金內部吸放氫的影響可以忽略的，以及儲氫合金內部空間的流場變化，故藉由次篇文章可做儲氫合金罐體內部的散熱設計，以達最佳的罐體吸放氫之能力。

Aldas et al. 【10】分析金屬反應床放氫反應，之後並研究圓柱體內的多孔金屬床氫固化過程。他們的實驗腔體為半徑25mm、60mm高的圓柱體，腔體內充滿了LaNi₅的多孔性合金。此研究中選擇環形的多孔金屬床，數值結果顯示在冷卻的腔體表面附近的合金迅速地完成吸氫反應，而在腔體中心則需要很長的時間。

趙令裕 【11】於2007年模擬出儲氫合金的吸氫過程中，會釋放出大量的化學熱，為了加快吸氫的速率，因此可能改善熱傳效率的方法，一為改變內部熱傳結構以提高熱傳效率，二為找出適合的幾何尺寸以達到較佳吸氫速率。

鄭裕庭，郭照圳等人 【12】於2007由吸熱性質的儲氫合金將被用來維持晶片的工作溫度和吸收晶片上放出的熱量。氫氣從微管道充入裝滿儲氫合金的散熱器，當儲氫合金放出氫氣時，將會觸發吸熱反應，並且從儲氫合金散熱器底部帶走大量的熱。

趙令裕，林振源 【13】於2008年參考國外文獻，發表出對於儲氫合金的新的研究方

向，由於儲氫合金的特性關係，搭配系統的設計，研發熱驅動且無傳動元件之熱壓縮儲氫系統。

1-6 研究目的

無論高壓氣態儲氫技術或金屬/固體吸附儲氫材料，都需要壓縮機提供較高的工作壓力，來增加儲氫金屬在常溫下儲氫能力，或者提供高壓氫氣作為高壓氣態儲氫的來源。傳統上使用機械式氫氣壓縮機提供所須的高壓(約5,000–8,000psi)，能源效率為 8-12%；若利用熱壓儲氫技術所衍生之先進熱壓縮儲氫壓縮機，其能源效率值達 15%。熱壓儲氫技術，係利用各種合金在不同溫度下，有不同的儲氫氣壓；可利用工廠廢熱加熱合金，提升儲氫壓力，故可取代機械式氫氣壓縮機。

由於氫氣製造工廠大部分都會產生廢熱，因此如能利用這些廢熱來使用為熱壓縮儲氫系統的能源，則可以使運轉費用更為降低。除此之外，熱壓縮儲氫系統沒有複雜且需要耐高溫高壓的動件設計，因此可以減少壓縮機的運轉維護成本與減低氫氣壓縮機的運轉噪音。當然除了消極的減低氫氣壓縮成本外，使用熱壓縮儲氫系統，更可以在加壓過程中將氫氣純度提高，更積極的提升了所生產高壓氫氣的附加價值。

由於儲氫合金具有隨溫度改變時，具有不同的吸附和脫附壓力的性質，因此熱壓縮儲氫系統即透過應用此一合金的物理特性，利用低溫時吸附低壓氫氣，並利用高溫釋放出具有較高壓力的氫氣，達到將低壓氫氣加壓成高壓氫氣的壓縮機功能，可取代機械式壓縮機的功能。使用熱壓縮儲氫系統與利用傳統機械式壓縮機來壓縮氫氣至少具有低能源成本（直接使用熱能）、低設備費用（主要是儲氫合金和熱交換的製作成本）與獲得高純度氫氣的好處（儲氫合金特性），因此熱壓縮儲氫系統的開發，在氫能開發上是具有很高價值的技術應用。

由於文獻回顧中，儲氫合金大多數探討吸放氫過程中，所產生之能量變化，或者對於罐體內部之熱量變化，以及熱傳條件的改變對於吸放氫的影響，且對於應用方面來說，許多研究團隊利用合金特性，做散熱及熱泵應用，也有其他文獻提出單級熱壓縮概念，但只討論到改變熱媒對於系統的影響，對於多級儲氫合金的串接運用，及其連續吸放氫特性，還有熱媒轉換時間控制中並沒有討論，而本研究採用雙級的熱壓縮儲氫系統，低壓之儲氫材為NaLi₅合金，高壓之儲氫材為TeZr合金，故可以建立更高之壓力，並且討論到壓力建立的情形、連續的做動原現象觀察及系統參數變更。

本研究先對不同儲氫合金做特性分析，觀察其再不同溫度時吸放氫之重量百分比濃度變化，之後系統規劃將其合金置入系統中，探討不同的入口壓力，對於系統建立壓力之情形，以及不同的冷熱源轉換時間對於吸放氫特性的影響，由於入口壓力越高吸氫的速率越快，必須尋找出較佳的入口壓力，使壓縮比可以有效的提升，並且不影響系統建立壓力的時間，以達最佳之效能，本研究選定三組不同的入口壓力分別為 570psi(40kg/cm²)、640psi(45kg/cm²)及 710psi(50kg/cm²)，而轉換時間的探討是在於選定系統建立最快的效益，本實驗選定了 20 分鐘、30 分鐘及 40 分鐘三種不同之轉換時間分析，故兩者為本研究目的中之重要參數，最後改變其熱交換器之設計，並分析其整體壓縮效率。

因此本實驗歸納以下三大重點：

➤ 儲氫材料的選擇

可以在低溫高壓下釋放氫氣之材料

低成本與高抗毒化材料開發

➤ 熱交換器與交換床設計

具高熱傳效率

合金床可有效固定，不至造成本體變形

耐高壓殼管的材料開發與設計

➤ 系統操作參數的建立

最佳化操作參數模式的建立，以提高系統效率



第二章、儲氫合金基礎理論與探討

2-1 儲氫合金介紹

當今的儲氫合金市場規模，光是在氫燃料電池的應用上面就有350億美元，尤其在美國能源部公布全面使用氫燃料電池的時間發表後，氫儲存儼然成為未來的能源工業核心。其中儲氫合金採料發明由Philips實驗室於1969年發現了LaNi₅合金是一種高儲存密度約1.4wt%的稀土基類的合金，由於價格高且易氧化使合金儲存容量衰減，故有一段時間沒開發應用，直到Willims於1984年以鈷取代了鎳，鈹少量取代鎳，因而製造出抗氧化性能高的合金，因此稀土基類的合金又再度掀起研究風潮【14、15】。儲氫合金是指將多種活性極高的金屬元素，經過真空熔煉的技術，製成具有良好吸氫能力的合金。儲氫合金吸氫原理是有一種與氫氣很強親和力的吸氫元素(A元素)與一種吸氫能力極小或根本不吸氫過度元素(B元素)所燒結而的合金粉末，其中A元素和B元素排列的非常規則，因此介於A元素和B元素之間的空隙也相當規則，這些空隙很容易可以讓氫原子進出，其編號為AmBn來表示，這兩種金屬儲氫材料自1960年發展至今，只有美國Ovonic、德國GFE與日本的日本鋼鐵三家公司寡佔大部分市場。另外可供實用的儲氫合金，應具備以下條件【16】：

1. 容易活化，單位質量、單位體積吸氫量大。
2. 吸附和釋放氫的速度快，可逆性好。
3. 有較平坦和較寬的平衡平台壓區。
4. 吸附、分解過程中的平衡氫壓差即遲滯小。
5. 金屬氫化物的生成焓小。
6. 壽命長，反覆吸放氫後，合金粉碎量要小且衰減小，能保持性能穩定。
7. 在空氣中穩定，安全性能好，不受N₂、O₂、H₂O、H₂S等氣體毒害。
8. 價格低廉、不污染環境、容易製造。

以下為儲氫合金主要的金屬元素的成分，並做簡單介紹：

吸氫元素：氫氣很強親和力的吸氫元素(A元素)，並且有想當強的鍵結能力，如：

Mg、Ti、Zr、La等金屬元素。

調節元素：一種吸氫能力極小或根本不吸氫過度元素(B元素)所燒結而的合金粉

末，B元素則將氫分子解離成氫原子也具催化作用，可調整吸釋氫的

動力及熱力性質【17】，如：V、Mn等金屬元素。

催化元素：此種元素在吸放氫的過程中可以作為催化性的元素，幫助氫分子在接近金屬母材的表面時，易於分解為氫原子而進入金屬母材內部，如：Ni、Fe、Co、Cu等金屬元素等。

功能性元素：此種元素可以增加合金本身的抗氧化性、抗腐蝕性，如：Cr、Ni、Mo等金屬元素。

由於純元素氫化物的特性，如吸放氫平台壓力、吸放氫溫度、吸放氫速率與儲氫量等因素，不符合實際應用上之需求，使得氫化物的發展受到限制。週期表中各元素與氫之間的結合特性如表2-1【18】。一般常見的儲氫合金依照組成元素的原子比例可分為：Mm稀土基之金屬AB₅型、鋁基Laves相AB₂型、鈦基AB型、鎂基A₂B型四大類。表2-2為四種儲氫合金之基本性質【19】，表2-3則為四種儲氫合金之整體比較【17】。

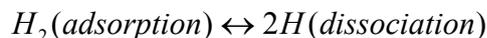
2-2 儲氫合金之動力性質

當儲氫元素或合金與氫氣接觸，反應生成氫化物，其過程大致上可分為以下幾個步驟，此步驟可明顯表達出氫合金之相變，所產生之動力效應氫化物形成與分解如圖2-1【20】所示。：

1. 物理吸附(Physisorption)當氣態氫分子接近儲氫元素或合金表面時，氫分子H₂會藉由凡得瓦爾力 (Van del Waals'force) 的作用力，吸附在儲氫合金表面。



2. 化學吸附(Chemisorption)吸附在合金表面上的氫分子，鍵結會被打斷分解成氫原子，產生化學吸附熱，此時除了動力性質也伴隨著熱力性質發生。



3. 表面穿透 (Surface Penetration) 以化學吸附在合金表面之氫原子，藉由擴散跳躍 (Diffusion Jump) 之作用，到達合金之次表面 (Subsurface)。
4. 擴散(diffusion) 分解後的氫原子，將由金屬次表面進入金屬，佔據合金晶格間隙位置，形成與合金相同結構之 α 相固溶體。
5. 當氫原子繼續藉由擴散進入金屬合金內部， α 相固溶體之濃度達到飽和，此時金屬與氫化物介面產生相變化，形成 β 相氫化物(Hydride)。氫氣藉氫化(Hydrogenation)過程，使得儲氫合金可大量吸收氫氣，且將氫氣安定儲存於合金內部，合金從固相

轉換成固溶相。而由於此一氫化過程，使得 α 相固溶體外圍被 β 相氫化物包圍，hydrogen site能量對不同金屬而言有不同之能量釋放反應，hydrogen site <0 氫分解反應為放熱，反之為吸熱過程，故此反應為可逆(reversible)過程，因此當 β 相氫化物分解成 α 相固溶體時，所有反應過程之順序均為反向。如圖2-2【21】為氫化物吸氫過程以能階形態表示。

對金屬而言，氫溶解度隨溫度上升而增加屬於吸熱型金屬，如Fe、Co、Ni、Cr、Cu、Al等，部分過渡金屬與氫反應形成固溶體；反之，溫度上升氫溶解度減少屬於放熱型金屬，如Ti、Zr、Pd、V等金屬。

2-3 儲氫合金之熱力性質

每一種溫度對應一條P-C-T曲線，圖2-3【21】所示此圖縱軸為對數壓力座標，橫軸為吸氫濃度百分比，因有產生熱的發生故需要移除熱量才能恒定溫度，平台的壓力在吸氫的過程中維持相當穩定，但當合金吸飽氫氣後，在高的平台壓力仍然無法讓合金做吸附。

在低濃度的氫氣固溶於金屬晶格內部時，會形成 α 相固溶體，如 α -phase。由於只有少量的氫原子固溶於金屬晶格內部，所以不會造成金屬母材結晶結構的改變，所以此一固溶體與金屬母材具有相同之結晶結構。在 α -phase區域固溶於金屬母材之氫原子濃度與所施加氫氣壓力平方根成正比，即Sievert's定律【22】：

$$C = k_s^{-1} P^{\frac{1}{2}}$$

其中C為固溶於母材之氫氣濃度，P所施加之氫氣壓力， K_S 為一常數。 K_S 亦可表示為：

$$\ln K_s = \frac{[\Delta H_s - T\Delta S_s]}{RT}$$

其中 ΔH_s 及 ΔS_s 分別為溶解焓(Enthalpy)與溶解熵(Entropy)。當氫原子濃度壓力會使得金屬母材晶格膨脹，使得氫原子之間的交互作用力變的越來越明顯，此時氫含量較高之氫化物 β 相開始成長。根據Gibbs相律：

$$F = C - P + 2$$

F為系統的自由度，C為系統中成分數，P為系統中相數。此時系統中含有兩個成分(金屬與氫氣)，三個相(α 、 β 與氣相)，所以僅有一個自由度，即在定溫的狀態下，壓力

不隨成分之改變而有所變化，因此有平台區(Plateau)的出現。

在 α 相變態成 β 相時，其平衡壓力 P_{eq} 可以利用Van's Hoff定律加以說明描述：

$$\ln P = -\frac{\Delta H}{RT} + \frac{\Delta S}{R}$$

其中 ΔH 及 ΔS 分別為 α 相變態成 β 相之反應焓(Enthalpy)與反應熵(Entropy)。對於大部分的儲氫合金而言，反應熵的變化與儲氫合金並沒有太直接的關係，所以反應熵 ΔS 可以視為常數【23】。而反應焓 ΔH 則與氫原子之作用力有關【24】，因此反應焓 ΔH 也代表了金屬與氫原子之鍵結強度。若氫原子持續進入 α 相固溶體中使 α 相完全變態完 β 相氫化物時，氫化物之平衡壓會隨著氫原子濃度的增加而再次上升，此時增加更多的壓力，對應之濃度百分比增加是非常有限的，故對儲氫合金沒有更多吸氫效果。

2-4 儲氫合金之活化

將合金粉末加入至罐體，或者製造的過程中，合金粉末與空氣接觸，使得儲氫合金易與氧於表面上形成一氧化層，此氧化層會使儲氫合金的材料的孔隙給阻礙，吸放氫的速率及容量會受到衰減，故在應用儲氫合金的情況下，必須經過活化的程序，此程序是要產生新合金粉末表面，因為在高溫高壓的情況下，合金粉末易破裂且分裂更細微粉末，此時有新的表面產生，可使合金粉末易與氫氣做結合且反應，活化的程序必須先將儲氫合金給抽至真空狀態，使得罐體內部沒有多餘的氣體殘留，在加熱罐體此時內部的合金破裂產生新的表面積，灌入高壓且極高純度的氫氣，破壞氧化層並讓合金吸氫及釋氫，最後將罐體的氫氣給排放至大氣，既完成一次的活化，此循環來回數次使合金活化完成，其中活化溫度，加壓壓力及時間隨著不同的合金粉末作為調整。

2-5 平台區之斜率

平台區為P-C-T曲線中氫濃度變化相對於壓力變化較小之區域。平台區斜率一般以下列方程式來表示：

$$slope = \frac{d(\ln P)}{d\left(\ln \frac{H}{M}\right)}$$

大部分儲氫合金的運用以平台區斜率接近零為最好的考量。而有些平台區斜率不為零的原因，一般認為是由於合金在製備的過程中所造成內部原子排列不均勻【25】，使

得氫原子會先進入能量較低的間隙位置，隨著氫原子濃度增加，而後再進入能量較大的間隙位置，造成其平台壓力上升。若將製備好的儲氫合金施以退火處理，使得合金內部均質化則可以減少此一現象之影響。

2-6 儲氫合金之遲滯現象

如圖 2-4【26】所示吸氫與放氫之平台差異稱為遲滯 (hysteresis)，此現象之導因說法眾多，有學者指出此乃應變能 (strainenergy) 差導致自由能變化引起【27】；或是在形成或分解氫化物時產生的彈性變形 (plastic deformation) 所致【28】，氫化物的比體積是大於母材金屬的，因此母材金屬周圍的氫化物承受較大的內部應力，如果應力超過金屬本身的彈性限，則差排會生成並環繞在氫化物周圍。在放氫的過中差排幾乎不會改變，而由於力學上的損失使我們把在吸放氫循環過程中不可逆的彈性變形做為聯想，這就是遲滯的由來起源。但在某些金屬與氫原子的系統中，氫化物的析出是薄板狀的，因此母體基材之內應力會大大的減少，而遲滯在這樣的系統中就會明顯的減少，一般在運用的層面上我們會希望是如此。



2-7 熱爆 (Decrepitation)

熱爆指的是金屬粒子在儲氫的過程中因為吸放氫循環後，造成母體晶格體積膨脹收縮，而使得金屬粒子破裂，尺寸下降，此一自我微粉化的過程稱之。熱爆後的微小粉體對於熱的傳輸以及管路閥門都會有不適當的影響。大部分氫化後的粉體熱傳導係數通常會變得不好，在工程需求上會需要更多額外的熱能以進行吸放氫反應。另一方面，微粉化後的粉體會在不適當的管路中造成阻塞，導致容器具有更高的氣體阻抗，提高了反應槽壓力，甚至造成反應槽破裂。因此，就功能性與應用方面而言，由熱爆所引起的粉體阻塞是我們應當避免的。

2-8 氣體雜質之影響

儲氫合金與雜質氣體間的結合會造成幾種形式的損壞：(1)毒化(poisoning)；(2)延遲(retardation)；(3)反應(reaction)；(4)無毒(innocuous)，上述的作用彼此會交互影響，伴隨著溫度與循環次數而有明顯的改變。從科學的觀點來看，這些交互作用是變化多端與

複雜的，例如：CO氣體在室溫下對於AB與AB₅型儲氫合金是一種毒化氣體，但當溫度升至100°C以上時，CO氣體則會轉為相對弱的延遲及反應氣體【29】。

2-9 儲氫合金之應用領域

本實驗相關儲氫合金之應用領域為以下三大項，儲氫容器、氫純化及熱泵之應用，由於熱儲氫容器的內部配置一直是本實驗很大的關鍵，如何有效安排合金，在有限體積內儲存更多的合金，並且避免合金粉末散溢出儲氫罐體，還得提升其熱傳效果；另外，熱壓縮儲氫系統未來會結合產氫之裝置，使產出的氫氣藉由熱壓縮儲氫系統轉換為高壓型態，但使用端需較高純度且高壓力的氫氣時，儲氫合金也能有效扮演純化壓縮的角色，最後吸放氫之吸放熱特性，未來還可應用至熱泵領域，可說是多重耦合研究型題目，本小節討論儲氫合金三大應用領域：

2-9-1 儲氫容器

由於鋼瓶高壓氣及液態氫方式存在不安全、耗能高、經濟性差等缺陷，而發展出金屬氫化物儲氫材料，其技術是以氫原子態儲存於合金，在吸放氫程序中，產生擴散、相變、化合等過程，受到熱效應與速度的控制，不易爆炸、安全性高。

目前世界各國對儲氫容器已進行廣泛的研究與發展，表2-4中為世界各國開發金屬氫化物儲氫容器的性能【30】。由表中可得知，所開發儲氫裝置的體積具有多樣性，其最小的儲氫量只有0.7m³，最大可達2000m³，其容器的結構有內部冷熱型、內部隔離型、外部冷熱型、多管型等【31】，作為儲氫材料有AB系、AB₂系、AB₅系等。

2-9-2 氫純化

工業生產中，如石油精製、化學工業、冶金工業等均有大量含氫尾氣排出，含氫量有些可達50~60%。目前處理方式大都是排空或燃燒，因此，若能對部分氫加以回收利用，在經濟上具有很大意義。另外，積體電路、半導體器件、電子材料、光纖等生產過程中需要超高純氫氣，目前多採用價格昂貴的鈹管或鈹膜淨化器。若能利用儲氫材料吸放氫特性，不但可以回收廢氣中的氫，也能使氫純度達6N以上，其價格便宜、安全，對於能源和經濟具有重要意義。隨著金屬氫化物在工程上應用的進展，20世紀70年代後期發展出金屬氫化物純化氫的方法。作為淨化氫氣用之合金要求與儲氫合金相同，需要儲

氫量大、易活化、反應迅速、耐毒化、抗粉化、成本低等。常用的合金有：LaNi₅、LaNi_{4.7}Al_{0.3}、MmNi_{4.5}Al、TiFe_{0.85}Mm_{0.15}、TiFe_{0.85}Ni_{0.15}、Mg₂Ni、TiMm_{1.5}、MmNi₅。目前西德、日本和美國等已先後研製出小型金屬氫化物氫淨化器系統【32】，這些系統在分離O₂、Ar、N₂N₂、CO、CO₂和CH₄氣體均能表現出良好的效果，如精製氫的純度高、安全性高與操作方便，缺點是除水效果差。

2-9-3 熱泵【33】

在靠近兩極的國家，由於需要大量的熱能維持基本的生活條件，燃燒許多的煤炭或者使用大量的電源，導致環境污染的破壞，或者消耗過多的能源，因此積極尋找替代加熱之裝置，熱泵空調系統或許會是較佳的替代方案，但目前以新型金屬氫化物熱泵空調系統被認為最有前景因此，它具有下列優點：

1. 可利用廢熱、太陽能、地熱等熱源驅動熱泵工作。
2. 系統為氣固相作用，而無腐蝕問題，且無傳動零件，磨損、噪音現象可排除。
3. 系統工作範圍大且工作溫度可調，不須破壞大氣臭氧層之工作介質。
4. 可達到夏季製冷、冬季供暖之雙效目的。

金屬氫化物熱泵的開發主要在兩方面：回收廢熱用熱泵和冷暖用空調熱泵。由以上條件得知氫化物熱泵具有很多優點，在能源與環保方面具有重要意義，但目前仍處於試驗階段，效率跟安全性還需長時間之評估。

第三章、熱壓縮儲氫系統

壓縮機循環的操作程序包括進氣、加壓與排氣等三個步驟。熱壓縮儲氫壓縮機系統有加壓操作程序與一般容積式或離心式壓縮機相同。所不同者為容積式壓縮機加壓行程氣體總量固定，藉由改變容積來加壓氣體；而熱壓縮儲氫壓縮機系統則是固定容積，而藉由改變儲氫合金的釋氫壓力特性，增加固定容積內氣體總量來達到加壓氫氣的功能。為完成壓縮程序，因此系統的設計須整合熱交換器、冷卻與加熱流體及氫氣管路設計。

機械式氫氣壓縮機主要是利用容積的改變來達成氫氣加壓目的，壓縮前氫氣的壓力為 P_1 ，所佔體積 V_1 ，經過活塞壓縮後所佔體積 V_2 ，由波以爾定律假設溫度不變下，氫氣最後的壓力 $P_2 = P_1 \cdot V_1 / V_2$ ，機械式氫氣壓縮機主要以電力為動力來源。熱壓縮儲氫系統利用冷熱溫差來驅動儲氫合金將低壓氫氣加壓成高壓氫氣的氫氣壓縮機系統，以下為兩者之比較表3-1及3-2【34】，可以明顯看得出兩者之間的最大差異，就是壓縮時電能的需求量，另外在一般的機械式壓縮機，產生高壓的情況下，氫氣純度上的提升是目前遇到相當大的瓶頸，而熱壓縮儲氫系統所產生出來的氫氣純度高達6N以上，此濃度範圍內的高壓氫氣，是非常具有經濟價值，因此熱壓縮儲氫系統的附加功能，是有機會取代一般機械式壓縮機最大關鍵。以下為熱壓縮儲氫系統的四大主要元件的開發。

3-1 儲氫合金材料特性選用

圖 3-1【35】為不同的儲氫合金 Van's Hoff 曲線，橫座標為溫度，縱座標為壓力，此圖規劃出三種不同的溫度區域，使用者可以在自我環境最佳取得的溫度範圍，以及所需要的壓力範圍，選擇儲氫粉末，另外可看出 Van's Hoff 曲線斜率越陡，代表較短的溫度差裡面可以獲的較高的壓力差，但這並不能代表此粉末會有較佳的吸氫濃度百分比以及所吸收或釋放較少焓的熱量，故選擇的粉末得參數也是相當多且極為複雜，可使用多種合金材料相互匹配可組成壓力比更高的熱壓縮儲氫系統。

本實驗第一級採取 AB_5 型之 $NaLi_5$ 儲氫合金，此合金之特性為儲氫量大且活化較為容易，並在 150 度時可產生約 70bar 以上之壓力，此壓力可使高壓儲氫材料吸收較為有效率，且價格較為便宜，而第二級為 AB_2 型之 $TiZr$ 之儲氫合金，此合金在有限的溫度範圍裡面，可產生超過 200bar 以上之壓力，並且氫的吸藏量也非常高，但活化較為困難，尤其是高壓儲氫材料，要活化時所對應之高壓高溫的環境，在系統中比較困難去營造此

環境；兩儲氫材料共通之關聯為，溫度 40 度到 150 度之間吸藏氫量相當， NaLi_5 的合金高溫出口壓力可當作 TiZr 的合金入口壓力，且 TiZr 合金出口壓力為系統所設定之壓力，由於高低壓儲氫材料之重量濃度百分比相近，因此每一組儲氫材料的量較為相等，由圖 3-2 金屬材料之排放得知儲氫合金槽儲存之合金約 1.4kg，儲氫槽外徑 6cm，儲氫槽內徑 5cm，儲氫槽長度為 30cm，鋼絲絨所佔之長度為 13.2cm，多孔性不鏽鋼管外徑 0.5cm，儲氫合金可放置之體積為 316.512cm^3 ，故換算得知儲氫合金之密度為 4500kg/m^3 ，本儲氫罐預留較多且保守的膨脹空間，以避免合金單一方向膨脹，導致罐體毀損。

另外實驗中氫氣來源為研究級高壓鋼瓶，此鋼瓶壓力為 150bar，且容量為 40L 純度 99.995%(4N) 高純度的氫氣，這對於儲氫合金的保護較佳且使用壽命也可延長，可以避免不必要的氣體與儲氫合金粉末結合，導致儲氫合金粉末的壞死，此壞死的氫合金必須再度活化，將粉末產生新的表面，才有辦法在度吸收及釋放氫氣，故在實驗時，除了使用高純度的氫氣外，在實驗開始前，使用氫氣將管路中殘餘氣體擠壓排放至外界，避免殘留之不純氣體污染氫氣的純度。

3-2 儲氫合金容器設計

加壓的過程中，熱壓縮儲氫系統是利用儲氫合金的特性使氫氣的型態改變，先是以物理及化學變化將氫氣和合金結合，以氫合金的方式儲存，儲氫槽內之狀態是非常穩定，故較沒有安全上的疑慮，再藉由能量的改變使氫合金解離成氫氣及合金，此時所加入之能量會產生一相對應之氫氣壓力，故相對應的氫氣壓力離開合金的鍵格裡，並且擴散將氫氣給排放出來，故能量如何傳遞至合金粉末，是實驗設備中非常重要的環節，本實驗採取圓形的不鏽鋼罐體，由於本實驗做動的壓力範圍屬於較高的壓力，因此採取不鏽鋼的材料罐體，增加罐體承受的應力，並且與氫氣較不會產生反應，導致罐體的脆化，另外使用圓形的幾何形狀，在於內部合金粉末存可以存放較多的量，以及四面八方的熱傳量較為均勻，使合金接收能量速率較快且均勻，另外合金粉末內部的擺設也相當關鍵，由於合金粉末吸收氫氣之後體積會有膨脹的情形，故在腔體內部必須有空間使合金粉末自由的膨脹，但在膨脹的過程中避免在單一位置的累積，導致腔體的變形，故本實驗以鋼絲絨來減緩合金膨脹時所殘留的應力，且固定合金粉末的位置，其導熱性質也相當好，但經過長期的吸放氫的過程，合金粉末會漸漸崩解，使得粉末變得更為細小，最小的顆粒直徑為 2 奈米左右，故在儲氫槽內過濾的裝置也是不可缺少，此過濾裝置為多

孔性不鏽鋼材，可均勻的將氫氣引入至合金內部，及有效增加吸收氫氣之時間，腔體內部牽扯了許許多多熱傳、應力、機構設計、化學及物理領域，故許多學者也對罐體設計上提出新的作法，本實驗在低壓儲氫槽是由工業技術研究院自行設計，罐體內部的陳設如圖 3-2，而高壓的儲氫槽則是使用漢氫公司所製造的罐體。容器外型設計。根據不同應用場合，儲氫槽需與熱交換媒介有足夠的導熱和冷卻能力，使材料吸放氫反應能順利進行，並達到預定的速度與壓力要求。

以下為對工研院自行設計之儲氫罐體，簡單運算其熱傳分析，儲氫合金容器外對流熱傳係數假設為水側對流平滑管，其值約為 $4000\text{w/m}^2\cdot\text{K}$ ，儲氫容器以不鏽鋼內徑約為 6cm ，管壁厚度約為 5mm 而內徑之多孔性不鏽鋼管管壁厚度約為 1mm ，不鏽鋼管壁熱傳約 $18\text{w/m}\cdot\text{K}$ ，管內氫氣對流熱傳較難估算，根據論文內實驗結果，約在 $2000\text{w/m}^2\cdot\text{K}$ ，管內之儲氫合金有效熱傳則約為 $1.087\text{w/m}\cdot\text{K}$ ，

$$U_i = \frac{1}{A_i R_{th}} = \frac{1}{A_i} \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_i}}{2\pi k_s L} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k_m L} + \frac{\ln \frac{r_o}{r_2}}{2\pi k_s L} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad A_i = 2\pi r_i L$$

$$U_o = \frac{1}{A_o R_{th}} = \frac{1}{A_o} \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln \frac{r_1}{r_i}}{2\pi k_s L} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k_m L} + \frac{\ln \frac{r_o}{r_2}}{2\pi k_s L} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad A_o = 2\pi r_o L$$

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{r_i \ln \frac{r_1}{r_i}}{k_s} + \frac{r_i \ln \frac{r_2}{r_1}}{k_m} + \frac{r_i \ln \frac{r_o}{r_2}}{k_s} + \frac{r_i}{h_o r_o}}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{h_i r_i} + \frac{r_o \ln \frac{r_o}{r_2}}{k_s} + \frac{r_o \ln \frac{r_2}{r_1}}{k_m} + \frac{r_o \ln \frac{r_1}{r_i}}{k_s} + \frac{1}{h_o}}$$

$$U_o = \frac{1}{\frac{0.003}{2000 \times 0.0004} + \frac{0.003 \ln \frac{0.003}{0.0025}}{18} + \frac{0.003 \ln \frac{0.0025}{0.0005}}{1.087} + \frac{0.003 \ln \frac{0.0005}{0.0004}}{18} + \frac{1}{4000}}$$

整體 U_o 值約為 $117.54\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$

3-3 熱交換器設計

由於本系統的熱交換器使用的是不鏽鋼材料，此材料的熱儲能力相當好，故流體能量的傳送並非直接針對儲氫槽，而是有許多的能量傳遞到熱交換器，因此再生式的冷熱源轉換時候，冷熱源須花相當多的時間將熱交換器給冷卻或加熱至所需的溫度，帶走或供給儲氫槽的熱量也就變少了，且本次實驗熱交換的幾何形狀為矩形，故四周會有許多的渦流，或者短循環在內部產生，所以選擇較佳的熱交換器的材料以及幾何形狀，也是影響系統的效率原因之一，因此本論文使用了圓柱狀鋁製熱交換器導入做為比較，由於鋁製的熱交換器其 K 值較不鏽鋼來的高如圖 3-3，鋁製熱交換器的熱傳率及熱容量就不鏽鋼來的好，因此比較少的熱量在鋁製熱交換器累積，由圖 3-4 得知兩種不同熱交換器，對於本系統所產生的影響，此兩種材料之比較為矩形不鏽鋼熱交換器及圓柱狀鋁製熱交換器，且加熱及冷卻溫度為 160 度及 35 度，冷熱轉換時間為 20 分鐘，由加熱上可觀察出，其加熱的速度鋁製熱交換器遠快於不鏽鋼，且呈現像步階型態的樣式延續，而不鏽鋼再加熱速度較為緩慢，其熱容率較高，因此必須將其所能容量的熱給補滿，溫度才會提升，而冷卻於冷源其內部之降溫能力，由於冷凍能力比加熱之能力較差，且冷卻時會混合上次些許熱油的熱量，因此冷源的溫度會有提升的現象，熱負荷也較多，故冷卻時的數據，就比較不明顯，但還是可以看出鋁製熱交換器其溫度還是會比不鏽鋼來得低，故此熱交換器的材料為本實驗較佳的選擇，但我們得觀察其所對應的出入口壓力及整體系統壓力建立之時間，來判斷是否有更佳的使用效率。

另外為了改善容器的熱交換效率，可在容器的中央設計一熱交換管路，增加熱媒在熱交換器內存留的時間，不過這會使冷熱源的幫浦之壓降提升，導致幫浦所耗的能量提高。此外熱交換器也有殼內熱交換器，此設計裝置可以迅速的將熱源移除或提供，因此效率的提升是可以期待的，但其施工較為困難，且水源管路所承受的壓力必須達到吐出壓力，故整體成本非常昂貴，且儲氫粉末充填均勻性也比較難顧慮，而本實驗採取殼外熱交換器，裝置簡單，且價格便宜，並且此裝置不需要耐高壓，但熱傳速率較為緩慢，表 3-3 為兩種熱交換之比較。

以下為簡單再生式熱交換器之數學推討模型，由於本實驗為固定床式對稱型態之熱交換器，雖然無法與採取假設一模一樣，但其中之影響不大，故其結果則是相去不遠，因此採取 Λ - Π 法【36】來說明之，搭配以下假設：

1. 填料的比熱為定值。

2. 熱側與冷測流體在冷熱週期切換時無混合現象。
3. 流體與填料間的對流熱傳係數為定值(熱側與冷側可以不同)。
4. 進入熱交換器的入口溫度為均勻分布且不隨時間變動。
5. 冷熱切換周期固定，且熱損失甚小可忽略。
6. 流體洩漏的效應甚小可忽略。
7. L/D 比大於 6 以上，故熱流特性以簡單之一維尺度來描述。

加熱週期熱傳量=儲存在再生式熱交換器中的熱量

$$dQ = \frac{M_m c_{p,m}}{L} \frac{\partial T_{m,h}}{\partial t}$$

m 代表流體 h 代表加熱週期

加熱週期熱傳量=熱側流體的顯熱變化+儲存在通過熱側流體的熱傳量

$$dQ = \frac{h_h A}{L} (T_h - T_m) = \rho_h c_{p,h} V \frac{\partial T_h}{\partial t} + \rho_h c_{p,h} V u \frac{\partial T_h}{\partial x} = m_h c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} + m_h c_{p,h} u \frac{\partial T_h}{\partial x} \quad \text{右邊第}$$

一項為流體的熱效應，第二項為流體被加熱的顯熱效應

$$m_h = \rho_h \cdot A_{fr} \cdot L \quad A_{fr} = \text{截面積} \quad V = \text{體積} = A_{fr} \cdot L \quad \text{時間} t = \frac{L}{u}$$

$$\begin{aligned} dQ &= \frac{h_h A}{L} (T_h - T_m) = m_h c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} + m_h c_{p,h} u \frac{\partial T_h}{\partial x} \\ &= m_h c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} + m_h c_{p,h} \frac{L}{t} \frac{\partial T_h}{\partial x} = \frac{m_h}{t} t c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} + m_h c_{p,h} \frac{L}{t} \frac{\partial T_h}{\partial x} \\ &= m_h \frac{L}{u} c_{p,h} \frac{\partial T_h}{\partial t} + m_h c_{p,h} L \frac{\partial T_h}{\partial x} = m c_{p,h} L \left(\frac{1}{u} \frac{\partial T_h}{\partial t} + \frac{\partial T_h}{\partial x} \right) \end{aligned}$$

$$\text{熱效率比：} \eta_{reg,c} = \frac{T_{c,out} - T_{c,in}}{T_{h,in} - T_{c,in}}$$

$$\text{熱側熱效率比：} \eta_{reg,h} = \frac{T_{h,in} - T_{c,out}}{T_{h,in} - T_{c,in}}$$

熱尺寸(熱交換器熱傳性能的大小)與 $\epsilon - NTU$ 法中之 NTU 類似： $\Lambda = \frac{hA}{m c_p}$

$$\text{縮減週期：} \Pi \equiv \frac{hA \left(P - \frac{L}{u} \right)}{M_m c_{p,m}}$$

P 為週期， $\frac{L}{u}$ 為填料時間

$P \gg \frac{L}{u}$ 所以 $\Pi \equiv \frac{hAP}{M_m c_{p,m}}$ 下標 h 為加熱週期 下標 c 為冷卻週期

$$\Lambda_c = \Lambda_h \Pi_c = \Pi_h$$

以上條件稱為對稱，此時熱側與冷側的熱效率比相同即 $\eta_{reg,c} = \eta_{reg,h}$ 如圖 3-5 所示，由圖 3-4 與圖 3-5 比較可明顯看出實驗之再生式熱交換與理論上是相當符合。

考慮板片軸向熱傳導效應影響，假設單一方向之熱傳量為定值，升溫之速度一定，故將能量方程式之熱擴散項可簡單簡化成下式：

$$\frac{dT}{dt} = \theta = const$$

帶入能量方程式求熱傳量，

$$q_x = k_m \left(\frac{dT}{dx} \right)_x = \rho_m c_{p,m} \theta x$$

$$\therefore \left(\frac{dT}{dx} \right)_x = \frac{1}{\alpha_m} \theta x$$

$$\alpha_m = \frac{k_m}{\rho_m c_{p,m}}$$

可推導出一無因次參數，其參數為熱擴散係數，

$$T = \frac{\theta}{\alpha_m} \frac{x^2}{2} + C$$

邊界條件 $x = w$ ， $T = T_s$ ，可求出上式的常數 C 值 ($C = T_s - \frac{\theta}{\alpha_m} \frac{w^2}{2}$)

$$T_s - T = \frac{\theta}{\alpha_m} \left(\frac{w^2 - x^2}{2} \right)$$

接下來 $\bar{T} = \frac{\int_0^x T dx}{w}$ ，可計算出板片的平均溫度 \bar{T} ，並將 C 值帶入

$$\bar{T} = \frac{\int_0^x T dx}{w} = \frac{\theta}{\alpha_m} \frac{w^2}{6} + C = \frac{\theta}{\alpha_m} \frac{w^2}{6} + T_s - \frac{\theta}{\alpha_m} \frac{w^2}{2}$$

$$T_s - \bar{T} = \frac{\theta}{K_m} \frac{w^2}{3}$$



板片與氣體介面的熱通量為

$$q_{x=w} = k_m \left(\frac{dT}{dx} \right)_{x=w} = \frac{k_m \theta}{\alpha_m}$$

很明顯可觀察出熱通量與熱傳導係數有相當大的影響，未來系統結合產氫時，由於產氫技術需要相當多的熱量，因此如何導引過多的熱量來傳送至儲氫合金內部，導致產氫儲存及壓縮氫氣同時進行，為未來規劃之重點，但熱交換器的設計仍以上面兩大數學分析所引導出來的參數為主軸。

3-4 系統設計

介紹了以上許多影響熱壓縮儲氫系統建立之因素，可以了解看似簡單的系統組合，卻包含了許許多多的小細節，如何注意這些小細節，並且嚴謹完整的規劃，以減少對實驗的錯誤率及系統效率的提升，以下則為系統上之理論，藉由儲氫合金的特性，改變合金粉末之溫度進而影響合金之平台壓力，使系統可儲存及加壓之效果。

3-4-1 單級熱壓縮儲氫系統理論

圖3-6【37】所示為單級熱壓縮儲氫系統的基礎理論，氫氣供給源在A點提供適當的氫氣壓力給合金，合金濃度漸漸增加，此時合金的粉末已漸漸的從 α 態轉換至 β 態當到B點時合金濃度已經飽和狀態下，提供熱量使合金粉末溫度到達C點，C點是以高壓型態將氫氣釋放出來至D點，D點為輸出端，此循環為單級單一循環的過程，故連續使用的情況下，必須將合金再度冷卻至A點，且吸氫的情況下會放出熱量，釋氫的情況下吸收熱量，系統所需要的熱源是使用由油溫控制器提供，未來則是會配合產氫的廢熱，藉由管路使廢熱回收，到達系統所需求的能量，因此固定一組熱源一組冷源，以及如何將能源快速且準確的傳送的需要的熱交換器，控制系統就相當重要，本系統是使用電磁閥並且藉由程式的撰寫來調控閥門的位置。

3-4-2 多級熱壓縮儲氫系統理論

在固定的操作溫度下，單一儲氫合金所能提供的壓縮比有限，為了提高壓縮比，可用一系列不同平台壓力之合金，由低壓至高壓依序串接一起如圖3-7，提供 P_L 之低壓壓力給低壓儲氫槽在低溫下吸氫，低壓儲氫槽在高溫中所對應之低壓平台壓力，可排放至

中壓儲氫槽當低溫時所對應入口壓力，而中壓儲氫槽在高溫中所對應之平台壓力，可排放至高壓儲氫槽當低溫時所對應入口壓力，高壓儲氫槽高溫時所釋放出來之平台壓力既為高壓氫氣；圖3-8為雙級熱壓縮儲氫壓縮機系統管路示意圖，在氫氣壓縮行程中，由逆止閥控制氫氣流動方向，先將氫氣來源管路與儲氫合金管路間通連，並將熱交換流體流經熱交換器中，以帶走儲氫合金的反應熱量維持一穩定操作溫度，當第一級儲氫合金吸氫完成後，利用電控系統切換冷熱源，將熱流體流經熱交換器A中提高儲氫合金材料的釋氫壓力，而冷流體流入另一組熱交換器B，冷卻第二級儲氫合金溫度進行吸氫後，再次切換冷熱源，加熱第二級儲氫合金釋放高壓氫氣；當出口壓力增壓到大於後端壓力值時，系統出口之逆止閥開啟，完成氫氣加壓，利用二組以上儲氫合金反應床反覆進行吸放氫的動作，可提供連續加壓供氫的系統性能。且在低壓儲氫槽及高壓儲氫槽的作動溫度上，選擇吸放氫在同一區間，以簡化管路配置的問題。

3-4-3 多級連續釋氫熱壓縮儲氫系統理論

本系統亦可擴充為多級連續釋氫型態之熱壓縮儲氫系統，如圖 3-9 所示，兩套的系統，相互之間採取 180 度之轉變，因此當一組儲氫瓶釋放氫氣時，另外一組儲氫瓶正在吸收氫氣，當到達轉換時間時，則交換做動原理，因此可提高兩倍的壓縮時效性，且只需要多花兩組儲氫合金床及熱交換器，看似簡單的系統提升，但卻遇到重大的問題，由於氫氣流向的控制並非我們可以簡單的操作，逆止閥為簡單的機械零件，要使逆止閥作動其兩端必須要有一定壓差，但氫氣的分子量低，且本系統之流量緩慢又少，因此逆止閥在兩端壓差不明顯情況下，很難有效作動到正確方向，導致逆止閥無法達到全關或全開，造成無法維預期氫氣流動之方向，因此系統無法運作。

非連續系統配置較為簡單，配合手動閥的開關可有效避免其問題，連續裝置的熱壓縮系統，必須找到理想之逆止閥之作動壓力，才能有效控制氫氣之流向，避免氫氣在系統內循環，而未將氫氣排放至正確位置。

第四章、系統建立與實驗方法

本系統需要一組冷熱供給源，及轉換冷熱源的機制，此機制結合工研院電控相關人員，以雛型模式討論方式相互溝通撰寫而成，控制不同溫度之流體，流向儲氫合金，進而改變儲氫合金的特性，本實驗使用兩只恆溫油槽，並且將油溫控制在40度到160度之間，這兩種溫度的範圍，選用是兩種合金相互耦合的情況下，所能產生較佳匹配效果，40度為常溫的溫度，因此不必須要多耗能量控制油溫使得作工效率的提升，而160度所設定之熱媒溫度到達熱交換器入口的熱散失，故設定約為10度之溫降，使熱交換器入口溫度可控制在150度左右，150度對應之高壓儲氫合金可達到200bar以上的吐出壓力，因此我們系統選用這兩種溫度來當此系統的媒介溫度熱煤油為加溫或降溫到此溫度，帶走或提供熱量給合金的媒介，合金罐體裝置於熱交換器內，圖4-1交換器為矩形的容器(46cm x 18cm x 9cm)，外殼為不鏽鋼材，另外也選用了圓柱鋁製熱交換如圖4-2，比較兩熱交換器對系統所產生的效率；其中senser包括壓力計、溫度計、熱媒流量計及氫氣流量計，各感應器之位置擺設如圖3-8，壓力計所量測的位置分別為第一級儲氫合金，第二級儲氫合金，暫存槽，RTD溫度計所擺設的位置為熱交換器入口及出口，熱媒流量計為量測恆溫油槽泵所提供的流量，氫氣流量計為最後量測暫存槽之氫氣所排放之流量；氫氣的供給藉由一般市售之高壓高純度氣體鋼瓶提供，利用調壓閥將高壓鋼瓶降壓，並調整至實驗壓力，本次實驗量測了20分鐘，30分鐘，40分鐘三組轉換的時間，入口給定的壓力為570psi(40kg/cm²)、640psi(45kg/cm²)、710psi(50kg/cm²)三種不同壓力，出口壓力藉由管路排放至暫存槽，且暫存槽容積為1L，冷熱源轉換的溫度為40度及160度，研究出最佳的轉換時間及入口壓力。另外更換熱交換器，探討熱傳現象對壓縮效率之影響。

由於此系統 98 年 1 月移交工研院南分院，實驗室及系統規劃上，與新竹工研院有較大的出入，新竹工研院為室內狹小的空間，因此氫氣的擺放在室內，避免洩漏之氫氣在室內累積，故將室內使用抽風櫃維持負壓，方可有效將洩漏氫氣給抽離於室內如圖4-3，而工研院南分院在場地使用上，大致可分為三大區塊，外氣區域，監控室及正壓室如圖4-4，外氣區域為氫氣加壓過程的地方，將此區域置於大氣則是當發生氫氣發生洩漏之危險性時，有較多的外氣量將氫氣濃度給於稀釋，避免濃度累積造成引爆的危險性，另外本系統最終壓力高達200bar，壓力釋放時造成安全上的問題，本系統採取降壓排出，且在管路不同的位置上，裝置洩壓閥，使得異常的壓力現象可以藉由洩壓閥排放

至大氣，再者本系統氫氣端除了建築物本身屋頂外，並未在加裝遮蔽物，其因有二，第一避免濃度累積，第二在爆炸時，採向上爆衝。

正壓室則因本系統需要許多的電力機構，驅動熱媒或擷取數據，故將所有電源集中處理並放置於室內區域內，且採取正壓風機，將室內維持正壓，避免氫氣在室內累積達一定濃度且電力轉換上火花之產生導致爆炸的危險性。

監控室則是人員操控系統的位置，此位置離系統氫氣供給及加壓源，有一段安全的距離，在此可控制整個系統之操作，且正壓室的牆厚，也比還未完成之法規標準來的嚴格，故本系統位置處理上，非常安全，但人員操作上必須遵守場地保管人的指示，以及相互的配合，以維持實驗室的安全性。

本系統中有關於電控裝置主要是利用可程式控制器(Programmable Logic Controller, PLC)、AD 模組完成擷取所有類比訊號與儲氫系統程式控制動作，並結合人機介面以達到圖形化介面控制之目的。

4-1 系統架構

儲氫系統架構如圖 3-8 所示，主要是由加熱槽、散熱槽、散熱器、泵浦(M1、M2)、流量計、溫度感測器(TC)、氣體壓力感測器及流體閥門(V1~V8)所組成的。透過 AD 模組擷取感測器訊號至 PLC 運算後，再由 PLC 控制流體閥門改變冷熱流體來達成吸氫與釋氫動作，控制系統架構如圖 4-5 所示。

控制流程可分為儲氫系統運轉流程與控制器程式運作流程兩個部份；

4-1-1 儲氫系統控制流程

儲氫系統的運轉流程如圖 4-6 所示，當系統啟動時必須先將冷卻泵浦、散熱器及加熱槽啟動，然後先將兩個儲氫槽預充氫約 30 分鐘，接著再將其中之一的儲氫槽作釋氫的動作約 30 分鐘，另外一儲氫槽則保持現狀，待釋氫動作完成時再換另一個儲氫槽作吸氫動作，此動作將儲氫槽內殘餘之氣體排放至大氣，而完成釋氫動作之儲氫合金則轉換作吸氫動作，之後兩個系統則持續作吸氫與釋氫動作的交替。

4-1-2 控制器運算流程

流程圖如圖 4-7 所示，系統開始運轉時先以手動方式開啟冷卻泵浦、散熱器及加熱

槽，如圖中的虛線框中所示。接著系統將等待一秒鐘的時間等待 AD 模組備妥，然後進行流量計、溫度感測與壓力計的讀取，在程式設計為了提高精準度之下，將以 10ms 為每次讀取時間，每分鐘計算一次平均值。

待讀取第一筆資料進來後，以確定系統運轉正常後再進行吸氫與釋氫之動作。在吸氫與釋氫動作中必須切換閥門以達到吸氫釋氫之反應，此部分所需要注意的為閥門開關的等待時間上的設定，為了減少冷熱流體相互混合影響而降低了系統流體溫度之情形下，在閥門開關之間會相互延遲時間約為 1~3 秒。

4-1-3 系統實際擷取資料

在經過實際連線測試已可正確擷取溫度、氫氣壓力、流量計的類比值，再經由 PLC 運算後進行吸氫與釋氫的流程控制，並將數據存取至電腦，圖 4-8 為人機介面的監控畫面。

4-2 實驗設備

本設備是藉由熱量來源變化，進而對儲氫合金特性改變，而產生壓縮氫氣的效果，故此設備需要一組穩定的熱量來源，以及良好的熱交換器，避免不必要的熱量在熱交換器中存留，且藉由電磁閥的控制，使得熱量可以隨時轉換到儲氫合金上，以下介紹系統所需要的元件及控制設備。



4-2-1 油端設備介紹

油端系統為此實驗設備中，控制熱源的元件，由許多的元件構成封閉迴路，油隨著管路到熱交換器容器中，提供或帶走儲氫合金所需熱量，故油端為實驗中很重要的參數，此參數可控制吸放氫特性，故油管路設計必須要快速放熱及吸熱，已有較佳性能發揮。

油端系統的迴路：油溫度控制器如圖4-9利用馬達將熱媒傳送出去，藉由電磁閥調控，使得熱媒傳送到熱交換器，進而影響儲氫合金罐體，熱媒隨著管路在經由電磁閥傳送回溫度控制器，此時會先經過過濾器及流量計，完成熱媒的循環。

4-2-2 控制元件

為本設備的樞紐，在此使用PLC如圖4-10控制。此元件為本系統控制的核心，此元件可以控制電磁閥開關，並且接受壓力訊號源及溫度訊號源，且在內部暫存的記憶體內，換算相對之壓力及溫度，並藉由RS-232傳送至電腦端，電腦利用vb程式讀取資料。

4-2-3 氫氣端系統介紹

本設備將低壓氫氣壓縮為高壓氫氣釋出，氫氣來源端如圖4-11的氣體純度越高，對於儲氫合金的保護性越好，壓力計如圖4-12為量測儲氫合金的吸放氫壓力，故壓力計必須隨著儲氫合金工作的壓力高低，作一較佳的選擇，溫度量測方面，使用了RTD如圖4-13。

4-3 實驗步驟

實驗步驟分成兩大區塊，其中先將油端系統先給開啟，由於油端系統危險性較低，且是熱壓縮儲氫系統中，導引氫氣壓縮的媒介，故先將油端給開啟，再者輸送氫氣至系統，其中抽風櫃開啟維持室內負壓，避免氫氣洩漏在室內累積，而南分院則為開啟電控室之送風扇，同樣避免造成氫氣濃度過高的情形，以下分別簡介兩種系統，其流程圖為4-14：



4-3-1 油端系統

1. 開啟總電源並且將以下電源給開啟，確保系統正常運作及安全防護啟動。
 - (1) 抽風櫃：為實驗過程中，重要的保護裝置，此裝置將避免氫氣洩露，與氧化劑高濃度混合，火花的產生導致爆炸，因此抽風櫃必須將空氣抽放到外界，將實驗室內保持負壓室情況下，故洩漏氫氣時，可以將氫氣抽放到外界，混合的濃度也大幅稀釋，安全性也相對增加許多；另外南部工研院則為電控室正壓風散，同樣避免火花與氫氣同時存在。
 - (2) 溫度控制器：此機台為加熱油溫裝置，加熱使用電熱器產生熱量，而冷卻油溫之裝置需配合冰水機及水套將油溫控制到 40 度左右之範圍。
 - (3) 系統電源：為控制端的電源，如人機介面上的控制電源，以及監控程式中的電腦電源，此電源穩定性必須相對提高，由於監控程式在實驗操作上，一旦移除電源，剛實驗的數據，將無法再取得，故電源的使用上的負荷，不能有跳電的問題。

題出現。

2. 啟動人機介面如圖 4-8

(1) 設定吸放氫時間參數，吸放氫的時間單位定義為(1min=100scale)，故依據實驗的參數，作此調整

(2) 在主畫面中點選熱壓縮儲氫系統，將 on/off 開啟，此時電磁閥將會作動，介面上的閥門在正確位置時，熱媒直接進入系統，此時系統正常運作。

3. 電腦連結 RS-232 並開啟程式，此時必須點選 Open_RS232，因為 PLC 所接受的溫度及壓力訊號，才可傳授到電腦裡。

4. 檢測流量計是否正常運作，避免人為及系統操作問題，使流量無法正常送至系統端。

(1) 高溫流量計的估算範圍約：6~8gal/min 約(27~36L/min)

(2) 低溫流量計的估算範圍約：4~6gal/min 約(18~27L/min)

40 度 黏滯度 29 sct

100 度黏滯度 50.2 sct



4-3-2 氫氣端系統

1. 將氫氣鋼瓶開啟，並調節氫氣鋼瓶端的出口壓力，使鋼瓶出口端壓力為該實驗供給壓力。

2. 建立暫存槽的氫氣壓力，使暫存槽的氫氣壓力為氫氣鋼瓶所供給壓力，此氫氣的供給為氫氣鋼瓶供給。

3. 開啟資料儲存程式，紀錄本次實驗之數值

(1) 儲氫監控系統程式→RS232.exe，如圖 4-15。

(2) 點選系統→計算位置→點選計算。此時程式讀入所有 sensor'。

(3) 點選 Open_RS232 及點選系統系統運轉中，使系統與控制端連線，並擷取資料，簡略看數字有無不實。

(4) 鈎選”是否儲存實驗數據”，設定檔案名稱及儲存路徑。

4. 開啟高低壓儲氫罐，實驗開始

4-4 實驗初始化

初始值的設定，以提高實驗結果的穩定性及比較性，初始值最重要控制元素既為冷熱源、儲氫槽內部殘餘氫氣及閥門的開關與否，在殘餘氫氣的排除上，將熱油在高低壓儲氫槽內分別做加熱釋氫，順序上已先加熱高壓腔體再加熱低壓腔體，熱油循環時間的控制上面分別為30分鐘，將槽體內部的的高壓氫氣降壓且排放至大氣。在低壓釋氫時，必須將高壓儲氫瓶給關閉，避免高壓儲氫瓶吸收低壓儲氫槽所釋放出來之氫氣，造成實驗初始值誤差，經過第一個循環過後，將加熱後的高壓腔體閥門給關閉，此時熱油端加熱至低壓腔體，並準備將實驗數據讀入電腦並存入檔案，當實驗開始時，將排放至大氣的降壓流量閥關閉，此時暫存槽內部無任何壓力殘餘，且兩儲氫槽內部的氫氣也藉由以上步驟給排出自大氣，此時有良好的初始狀態，實驗開始的瞬間，將低壓端的腔體閥門給開啟，由實驗的高壓鋼瓶提供氫氣給予吸附，壓力會經由管路至暫存槽，整個系統壓力會在一平衡狀態，而在加熱高壓腔體閥門不作開啟機制，因熱油加熱腔體時，有一延遲時間，此時儲氫槽內部溫度，所對應的平台壓力仍然可吸附氫氣，造成初始化的錯誤，所以必須得等到儲氫合金內部的溫度到達所對應較高的吸氫壓力下，才將腔體的閥門給開啟。此刻為最佳的初始狀態，故實驗的準確性及比較性就提高許多。



第五章、結果與討論

5-1 儲氫材料之特性測試

儲氫合金之溫度越低情況下，所能儲氫的比重較多，且吸放氫的平台壓也就比較低，儲氫合金越高的溫度情況下，所能儲氫的比重就比較少，且吸放氫之平台壓也就比較高。目前系統設計採用的第一段材料為 LaNi_5 型合金當作低壓端使用，如圖 5-1 所示根據實驗測試該合金在 40°C 的儲氫比重達 1.3% 以上，在高壓釋氫方面，溫度於 150°C 可達到 1000psi 以上 (68 kg/cm^2)，但釋氫比重很明顯的就比低溫測量時來的少；第二級壓縮儲氫合金的選用 TeZr 合金材料，如圖 5-2 所示依據實驗測試後該材料 40°C 的吸氫壓力約在 630psi ($40\text{-}50 \text{ kg/cm}^2$) 之間儲氫比重達 1.0% 左右，而 150°C 平台壓力約為 3000psi (210 kg/cm^2)；由於在此系統注意低溫吸氫高溫釋氫之情形，及平台壓之儲氫之比重，並沒有觀察其遲滯的現象對系統帶來之影響，故沒測試在同一溫度下吸放氫之曲線之情形，且高壓之儲氫合金，在高溫吸收氫氣所對應的壓力上，比較難去營造其高壓之環境，故圖 5-1 及 5-2 只有在測量其 40°C 吸氫及 150°C 釋氫之情形。圖 5-3 為實際上 LaNi_5 及 TeZr 合金之 Van's Hoff 曲線之偶合圖，其 LaNi_5 合金在 150°C 所對應之壓力高於 TeZr 合金之 40°C 所對應壓力，故兩種儲氫合金可串接運用在溫度範圍之間，另外觀察出在有限溫度裡面， LaNi_5 合金曲線斜率大於 TeZr 合金，故 LaNi_5 在此溫度較有明顯的壓力轉換現象。

5-2 實驗參數之現象反應

本實驗主要是藉由合金的特性將壓力提升，在本系統中各階段的壓力為本實驗量測的主要條件，其中入口的壓力計，可觀測鋼瓶入口壓力是否為實驗設定值，如圖 3-8 所示為本實驗之簡圖，圖中分別有三支壓力計，分別可讀出第一級儲氫合金釋放氫氣的壓力特性，而第二支壓力計則可以看出第二級儲氫合金吸氫及釋氫的壓力變化，此吸氫的壓力為第一級所釋放出來的壓力，而第三支壓力計量測暫存槽體內部的壓力，因此藉由此壓力的變化換算體積流率，而溫度計分別可觀測出熱煤油在熱交換器出入口的溫度變化，由熱交換器出口溫度可以推估儲氫合金內部的溫度範圍，氫氣入口壓力採用 570psi (40 kg/cm^2)、640psi (45 kg/cm^2)、710psi (50 kg/cm^2) 三種壓力，選擇此三種壓力去判斷哪種入口壓力對於本系統的效能是最好的，由於入口壓力越高當然在壓力的建立上會

相對比較快一點，但並非會有較佳的壓力比；入口壓力在不同的情況下建立的圖形是差不多的，以下採取640psi的入口壓力去觀察其不同測量點的測量值，其入口壓力為中間值，所呈現出來的圖形會有較佳的現象觀察。

5-2-1 第一級(低壓)儲氫合金之吸放氫現象探討

圖5-4、5-5、5-6，為不鏽鋼之熱交換器之對應系統，所產生之壓力及溫度現象探討，並舉例入口壓力640psi對於不同熱交換時間所產生之壓縮壓力影響，由圖5-4顯示640psi在不同轉換時間內第一級儲氫合金的壓力變化，圖表中橫軸座標為時間，左邊縱軸座標為壓力，右邊縱軸座標為溫度，此圖為溫度及壓力偶合圖，其中在交換時間為20分鐘的情況下，因熱交換器設計關係及本身材料影響，熱煤油必須花許多時間將熱交換器冷卻至設定值，故在20分鐘內無法將儲氫合金的內部熱源移除至所設定溫度（40度），吸收氫氣量比設定溫度來的少，釋放出來的氫氣也因時間的關係，使氫氣無法完全釋放出來給第二級的儲氫合金吸氫，故整體壓縮的時間相對較其他轉換時間長，在40分鐘的情況下可看出第一級合金釋放氫氣量已經明顯被第二級合金給吸附，在於油溫轉換時所對應的壓力是相對其他轉換時間來的低；此接觸點會隨著轉換次數的增加，接觸點所對應之壓力也會隨之增加，這與第二級所能吸收的氫氣的總量有關，當第二級所能吸收的氫氣量較少時，第一級也就無法將氫氣排給第二級儲氫槽吸氫，但此時暫存槽的壓力已經遠大於第一級釋放的氫氣壓力，故第一級釋放之氫氣無法排放至暫存槽時就會在儲氫槽內部循環，此循環量就隨著轉換次數的增加而增加。

5-2-2 暫存槽壓力建立之現象探討

圖5-5為暫存槽壓力與熱交換器出口溫度的轉換關係，在第一個轉換期間中，壓力漸漸升高，由於第一級儲氫槽將氫氣釋出由第二級儲氫槽吸收及隨著管路氫氣至暫存槽，此時暫存槽之壓力為入口壓力，故暫存槽內部壓力上升，因第二級儲氫槽也同時吸氫，故上升的壓力是相當有限的；另外以轉換溫度與暫存槽內壓力的接觸點可看出建立暫存槽壓力的延遲時間是隨著背壓的升高而增加，排放氫氣的時間也就變短，故可知第二級儲氫槽所釋放的氫氣量是漸漸減少；壓力爬升完畢40分鐘還有一段時間是沒有壓力建立，在於第二級儲氫槽內部的壓力已經釋氫完畢，而20分鐘在壓力還在爬升的情況下

就轉換了熱源，可得知釋氫還沒結束，故系統壓縮氫氣的時間也就拉長，以下結果可看出30分鐘的效果比較好，壓力爬升完畢既溫度轉換，損失時間最短，效率最好。

另外比較這兩只熱交換器的溫度曲線，有差異的地方在於第一級儲氫合金熱量傳遞比較明顯，曲線沒有在依恆定溫度維持一段時間，而第二級熱交換情形沒那麼劇烈，第一級NaLi₅的合金焓值較大，故對熱媒的負荷較多，溫度維持在150度及40度的時間就比較少，而第二級之儲氫槽所產生的焓值較少，熱媒的負荷也就較少，故不同的儲氫合金除了匹配其儲氫量之外，其對應相關之壓力內所產生之焓值也得選用，避免配合其中一儲氫槽導致過多的能量損耗。

5-2-3 暫存槽壓力建立及第二級(高壓)儲氫合金吸放氫之現象探討

圖5-6為第二級儲氫合金槽內壓力與暫存槽內部壓力的對應圖，此對應關係可以看出第二級儲氫槽吸放氫的特性，其中第一個循環吸氫過程中第二級儲氫合金的壓力是與暫存槽的壓力是相同的，由於開始熱煤油加熱的速率比冷卻的速率來的快，第一級儲氫合金釋放氫氣速率也就會比第二級儲氫合金所吸收氫氣來的快，壓力就在暫存槽及第二級的吸氫端給建立了起來，但隨著實驗進行時間拉長，吸氫及釋氫速率趨於穩定，暫存槽內部壓力也就沒再增加；而第二級儲氫槽壓力在第二個循環因合金內部的溫度還沒到達較穩定的狀態，第一級釋氫速率比第二級吸氫速率來的快，故壓力有增加再降低的情形的小曲線情形，而後幾個循環因第一級的釋氫壓力到第二級吸氫壓力的時間較久，故合金內部的溫度較為穩定，其中第二級之吸氫曲線中，趨勢比較平緩的曲線為吸收第一級氫氣壓力，第二級儲氫合金釋氫時隨著暫存槽壓力越高，故釋出的氫氣要至較高的暫存槽時，所花的時間較長，且在釋氫完畢輪至吸氫的情況下，管路中的高壓力，使得合金得吸收管路本身的高壓氫氣，及釋氫的過程中將壓力提升至暫存槽內的壓力，此管路內所含的氫氣循環現象，我們稱此現象為短循環，短循隨著壓力的增加，短循環的量越來越多，故管路的設計應該越短越好，避免如此現象影響越來越劇烈。

另外因再生式之熱交換關係，熱量開始進入儲氫罐體中，外圍的儲氫合金溫度較高，所對應之平台壓力較高，內部的儲氫合金溫度較低，所對應之平台壓力較低，故儲氫槽內在轉換的時刻，會有內部不同溫度之合金產生吸放氫之現象，但經過一段時間，整體儲氫合金溫度所對應之平台壓大於第二級吸氫之壓力或暫存槽時，既從儲氫罐體釋放出高壓氫氣至其所對應之排放位置。

5-2-4 暫存槽壓力建立及所對應之瞬時流量

圖5-7為暫存槽內壓力所對應之瞬時流量，瞬時流量為出壓力建立時，其流量隨著不同的時間變化，圖表中橫軸座標為時間，左邊縱軸座標為暫存槽內壓力，右邊縱軸座標為此壓力所轉換之體積流率，此流量是藉由壓力傳送之數值，經由理想氣體方程式將數值轉換而成，由於暫存槽體積為1L，因此壓力的變化除時間的變化，既為體積流率的換算，在高壓的情況下所對應之流量較少，由於Van's Hoff曲線得知，壓力的提升導致對應之wt%減少，因此儲氫槽所能吸收的氫氣量就明顯變少了，流量的轉換上也就比前一個轉換時來的低，另外，在沒有吸放氫時流量會有為小的震盪，由於壓力為壓力傳送器傳送之電流值，此電流值在PLC運算上會有小小的誤差，因此估算起來會有些為震盪之現象。

5-2-5 平均體積流率之探討

圖5-8代表暫存槽內體積平均流率隨著實驗時間增加變化情形，此圖的橫軸座標為轉換的次數，其中吸氫及釋氫合起來代表一次轉換，而縱軸為平均體積流率，平均流率可對應暫存槽壓力來比較，故可得知在實驗設定之背壓下，本系統可有多少之平均流率，平均流率的計算是藉由理想氣體方程式，將壓力差換算成體積流率，實驗初始第一個循環下，因為暫存槽內的背壓低，故體積流率較高，且不同入口壓力影響也比較少，但中間的循環隨著背壓增加，不同壓力的所影響的體積流率變化明顯，由P-C-T曲線可觀察出如此的情形，因為在固定的溫度下平台壓的提升所對應的濃度也就增加，故能吸氫的量就減少，且提高溫度釋放的氫氣，由於背壓的提升限制了釋氫的量，另外入口壓力較高所吸氫的速率也較快，釋放出來的氫氣較多，在實驗的後期，由於背壓以經快到達儲氫合金所能釋氫的最高壓力，故流量有比之前循環來的少，在20分鐘轉換的過程下，710psi最後銳減原因在於此時背壓以快到達對應溫度中之極限壓力，故轉換過來的流量是最低的，另外入口壓力比較高的情況下吸氫的量比較多，但20分鐘轉換的過程下，由於前面兩次循環中，暫存槽壓力的影響較少，因轉換時間內無法將瓶身內的氫氣給釋放完畢，故前兩次的循環入口壓力的影響就少於轉換時間的影響，熱源就進行交換，流量是相似的，但隨著多次的轉換，體積流率就會受到背壓的影響就會比較明顯，

而30、40分鐘的現象就較為明朗，710psi的入口壓力的轉換流率在任何循環次數中都是最高的。

5-3 不同熱交換器之性能表現

由於以上的實驗可得知，自行設計熱壓縮儲氫系統的是有其壓縮能力，但所耗費的時間很長，由文獻回顧得知，儲氫合金槽必須快速且均勻的受熱，才能夠使儲氫合金在短時間內可以吸氫及釋氫完成，因不鏽鋼熱交換器的材質熱容量其大，導致系統做再生式循環時，有較大的熱負荷，故改變熱交換器之幾何外型還有材質，觀察其對系統的影響，以同樣的入口條件及熱媒溫度，並重覆以上之實驗來對比，以下導入鋁製圓柱型熱交換器來說比較之。

5-3-1 不同熱交換器平均體積流率之比較

圖5-9為導入鋁製熱交換器之性能比較，虛線為鋁製熱交換器，實線為不鏽鋼熱交換器，不鏽鋼熱交換器數值為圖5-8，可看出在20分鐘的情況下，鋁製熱交換器與不鏽鋼熱交換器的流量差異非常大，鋁製熱交換對於熱媒得負荷相當少，因此熱媒指需要花少許的能量提供或帶走熱交換器的熱容量，而將大部分的能量轉換至儲氫合金，且一開始暫存槽背壓較小，壓力的建立就相當高，換算過來之頻均流量就較多，在20分鐘轉換下，前面幾個熱交換次數顯示了此熱交換器對系統的效率有產生極大的效果，且在第三第四次的熱交換都有維持相當高的體積流率，故可明顯得知此熱交換器在20分鐘的轉換下有相當好的發揮效能，但在40分鐘的情況下，熱交換器的影響就變少了，由於轉換時間長，導致熱媒有足夠的時間將熱交換器及儲氫槽提供或帶走能量，因此太多時間閒置的情況下，分散了體積流率的數值，而不鏽鋼熱交換器的熱容率在40分鐘下對於熱媒也不會構成太大負擔，因此轉換時間越長下熱交換的影響越小，對系統的效率上卻造成比較不好的影響。

5-3-2 不同熱交換器壓縮時間之比較

由於本實驗為雙級非連續熱壓縮儲氫系統，單一時間的壓力受限於非連續性的影響，而在不同的交換時間所產生的壓力無法得知較佳估計，故使用了連續釋放氫氣的時

間來分析，所謂的連續釋氫時間則是扣除第二級吸氫的時間，所剩下來的數值就為第二級所釋氫的時間，此時間穿插起來並選用90分鐘來觀察其壓力值，由於90分鐘在鋁製的熱交換器中，所產生的壓力已經快到達極限壓力，因此選用了90分鐘，圖5-10 (a)為連續釋氫時間90分鐘的壓力，橫軸為熱媒的轉換時間，縱軸為此時間點所對應之壓力，其中以710psi的壓力所製造出的氫氣壓力最高，原因在於暫存槽的背壓因入口壓力的關係初始壓力相對較高，且20分鐘壓力低是因冷熱源還沒傳遞到儲氫合金本身的內部，儲氫合金的吸放氫氣量就會變少，在30分鐘在不同的入口壓力的情況下，所產生的壓力是最佳的，可以得知此時熱交換時間與儲氫合金的吸氫能力已經有相當程度的偶合，故這段期間為本次實驗的最佳轉換時間，40分鐘因熱交換時間太長，導致儲氫合金所吸收氫氣以吐出完畢，閒置太多時間，另外最佳的提供壓力為710psi，而鋁製熱交換器則有不一樣的結論如圖5-10 (b)，由於此熱交換器之材料的熱容效應不高，故熱媒直接針對儲氫床加熱或散熱，故在時間上面，20分鐘的情況下，為最佳之轉換時間，越長的轉換的時間對系統效能越差，但此數據並無法找到一極值，故可以簡單猜想最佳之轉換時間會比20分鐘來的早，所以改變不同熱交換器，最佳轉換時間也就大不相同，通常越好的熱交換器或者越好的儲氫槽之設計，可以縮短其冷熱源轉換時間，越短的轉換時間在相同的總壓縮時間內，可以有較多的轉換次數，所建立的壓力也就相對高許多，因此如何設計及選材熱交換器，將是未來此提升系統效率重要的設計。

5-3-3 不同熱交換器到達設定高壓之比較

圖5-11 (a)為不鏽鋼熱交換器在2400psi所對應的時間，橫軸為熱媒的轉換時間，縱軸為連續釋氫所對應之時間，入口壓力較低的情況下，受到熱媒轉換時間的影響比較明顯，第一級吸放氫氣量就有變化，進而影響了第二級吐出的壓力，30分鐘的情況下壓力增至2400psi所花費的時間仍是最短，710psi在20分鐘轉換時間下所產生的壓力跟40分鐘轉換時間下情況差不多，原因在於當交換時間越短的情況下，高入口壓力的吸氫速率比較快，熱媒轉換時間的影響就不明顯，轉換時間越長低入口壓力及高的入口壓力都已經有能力將氫氣給吸收完畢，故轉換時間越長入口壓力的影響就越小，另外30分鐘三條不同入口壓力在2400psi的差值是最小的，給於不同背壓的轉換效果是差不多的，故可提供較小的吸氫壓力已完成壓縮循環的動作，此時是最好的轉換時間。

圖5-11 (b)導入鋁製熱交換器比較其情形，發現鋁製熱交換器在20分鐘轉換的情況下，使用較短的時間壓縮到較高的壓力，與5-3-2所解釋的情形較為雷同，在這三種不同

轉換時間上，並沒有觀察出最佳化，且改變不同的入口壓力所產生的效果也是成正比的關係，由於更高的入口壓力，使整體效應是否達到較佳的效率，由壓縮比就可明顯看出其問題。

5-3-4 不同熱交換器壓縮比之比較

所謂壓縮比是在連續釋氫90分鐘情況下，所對應出口壓力與入口壓力之比值，由圖5-12為不同轉換時間之壓縮比對應圖，橫軸為熱媒不同的轉換時間，縱軸為連續釋氫90分鐘所對應之壓力比，可觀察出一個明顯現象，在不同的交換器中，越低的入口壓力，所產生的壓縮比越好，所以壓縮的現象也就越明顯，故可尋找出一個最佳的壓力提供範圍，使本系統有較佳的壓縮比，壓縮比大約在4左右，因此可以大膽推斷每一級儲氫合金大約為2倍的壓縮能力，因此多級串接運用時，可遵循此規則(2^n)判斷其壓縮範圍內，會有多少級儲氫合金之配置，另外本系統在不鏽鋼熱交換器中，有一個明顯的極值，此極值位在20~40分鐘之間，極值的產生可預測本系統的最佳轉換時間，而鋁製熱交換器在數據中並沒有所謂的極值出現，沒有極值的現象表示鋁製熱交換會有更縮短的轉換時間，可確定20分鐘以前為最佳轉換時間，故改變熱交換器的效能，轉換時間的極值就越往前進，因此除了儲氫合金之開發及研究外，熱傳的性能也是此系統運轉效率提升的最重要設計，未來會朝向平板狀熱交換器，或者在儲氫槽內埋入熱管來增加其熱傳率並減低其熱容率，這樣才會使系統效能大增，減短壓縮的時間，增加壓縮比，才能取代機械型態之氫氣壓縮機。

第六章、結論

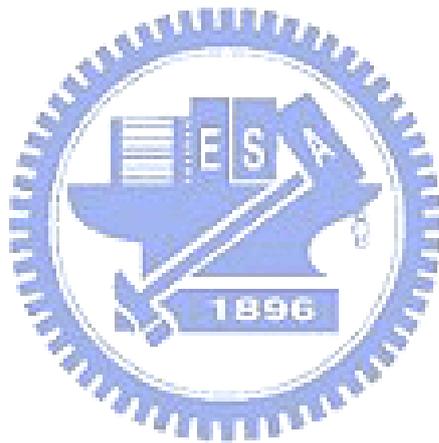
- 在氫氣市場應用需求主要是壓力、流量與純度，產氫製程及利用機械式壓縮機加壓時在純度上影響較大，製程需提高至更大壓力再由各式氣體濾材過濾，而氣體濾材會使得氫氣壓力下降；而熱壓縮儲氫系統在加壓過程中，可過濾部份不純物氣體提高氫氣純度，並可結合產氫設備具有在地生產(On-site)的優勢；目前熱壓縮儲氫示範系統已完成初步系統建構，若經過氫氣純度驗證及加壓產量能至 $1\text{m}^3/\text{hr}$ 以上可具有市場商業價值。
- 本實驗完成雙級非連續釋氫式熱壓縮儲氫系統，並可以長期運轉，入口壓力需大於 35bar 以上，熱媒溫度介於 150 度及 40 度，熱媒每次轉換間隔時間隨熱交換器而改變，可穩定建立 200bar 以上的出口壓力。
- 熱壓縮儲氫系統可以藉由不同儲氫合金的特性多級串聯應用，可提高輸入 / 輸出的壓縮比及增加壓力應用範圍，且不同之熱交換器對於系統影響甚大，由實驗得知，鋁製熱交換器比不鏽鋼熱交換器會有較好的轉換效率，材料的選定較為容易，故未來會朝向幾何外型之改變，扁平狀之設計為較有機會之考量外型，此幾何形狀有較多之熱交換面積，但需考量儲氫合金槽之槽內耐壓能力，相互配合設計之最佳之熱交換器。
- 越高的入口壓力，在較短的熱媒轉換時間上可使得系統效率提高，但會減少系統壓縮比的能力，在較長的熱媒轉換時間上，其入口壓力之影響就較不明顯，故考慮適當之入口壓力及熱媒轉換時間以符合系統應用時的經濟效益。另外，熱媒轉換時間越短，熱交換器之影響越多，整體壓縮之時間也就越快，反之，熱媒轉換時間越長，熱交換器之影響不明顯，整體壓縮之時間也就越慢；且實驗數據得知熱壓縮儲氫系統上應有一最佳的熱媒轉換時間；在本實驗中，以不鏽鋼矩形熱交器 30 分鐘所獲得的系統效率是最好的，若以鋁製圓柱狀熱交換器，在 20、30 和 40 分鐘內，並沒有極值出現，但可以得知轉換時間可以在往前移動，所以可以得知此熱交換器比不鏽鋼的熱交換器有較佳的系統效率。

未來展望

- 由於儲氫合金材料選擇不易，國內外可供應儲氫合金材料種類少，大多應用於低壓儲存之用，且對高壓合金的研究與開發甚少。若操作條件需求在高壓力時，材料的

來源需由國外供應，將增加製作成本，日後可借助國內外材料開發經驗，針對相關材料進行開發與資料庫建立，將有助於熱壓縮儲氫系統降低成本，擴大應用範圍。

- 本實驗兩種儲氫合金多級應用時，在設定壓力上所對應之溫度須相互耦合，但此耦合溫度大於 100 度以上，故無法使用水當熱媒，會有沸騰現象產生，導致熱媒系統需朝向鍋爐設計，因此選用熱媒油當熱媒之流體，未來國內可自行研發針對壓縮機使用之儲氫合金，使設定壓力所對應之溫度可低於 100 度內，本研究可提供相關合金之所需特性，以利相關研究人員開發與設計。



參考文獻

- 【1】 曲新生，陳發林，“氫能技術-第四章”，五南書局，台灣，p55-66, 2006
- 【2】 Carpetis, C. and Peschka, W., “A study of hydrogen storage by use of cryoadsorbents”, Journal of Hydrogen Energy, Vol.5, pp.539-554, 1980
- 【3】 Browning, D.J., Gerrard, M.L., Lakeman, J.B, Mellor, I.M., Mortimer, R.J. and Turpin, M.C., “Studies into the storage of hydrogen in carbon nanofibers: proposal of a possible reaction mechanism”, Nano Lett, Vol.02, pp.201-205, 2002
- 【4】 Satyapal, S., Petrovic, J. and Thomas, G.，甘錫安譯，“加滿氫在上路”，科學人，Vol.63, pp.75-87, 2007
- 【5】 Bogdanovic, B. and Sandrock, G., “Catalyzed Complex Metal Hydrides,” MRS Bulletin Vol.27, pp.712-716, 2002
- 【6】 Jemni, A. and Ben Nasrallah, S., “Study of two-dimensional heat and mass transfer during absorption a metal-hydrogen reactor”, Journal of Hydrogen Energy, Vol.20, pp.43-52, 1995
- 【7】 Willers, E. and Geoll, M., “The two-stage metal hydride heat transformer”, Journal of Hydrogen Energy, Vol.24, pp.269-276, 1999
- 【8】 Muthukumar, P., Prakash Maiya, M. and Srinivasa Murthy, S., “Parametric studies on a metal hydride based single stage hydrogen compressor”, Journal of Hydrogen Energy, Vol.27, pp.1083-1092, 2002
- 【9】 Faouzi, A., Abdelmajid, J. and Ben Nasrallah, S., “Dynamic behavior of metal–hydrogen reactor during hydriding process”, Journal of Hydrogen Energy, Vol.29, pp.635-647, 2003
- 【10】 Aldas, K., Mat, M. and Kaplan, Y., “A three dimensional mathematical model for absorption in a metal hydride bed”, Journal of Hydrogen Energy, Vol.27, pp.1049-1056, 2002
- 【11】 趙令裕，“儲氫合金吸氫過程熱質傳模擬研究”，第十四屆全國計算流體力學學術研討會論文集，南投、溪頭，2007
- 【12】 郭照圳，“具吸熱性質儲氫合金元件的設計與製作在晶片散熱的應用”，國立交通大學電子研究所，碩士論文，2004
- 【13】 趙令裕，林振源，“儲氫合金應用技術-熱壓縮儲氫壓縮機系統簡介”，Journal of

Energy & HVAC Engineering, Vol.52, pp.29-37, 2008

- 【14】 Vuncht, J. H. N. and Kuijpers, F. A., Philips Res Rept.,25:133, 1970
- 【15】 Willis, J. J. G., Philips Res Rept.,39:1, 1984
- 【16】 Jurczyk, M., Smardz, L. and Smardz, K., “Nanocrystalline LaNi₅-type Electrode Materials for Ni-MHx Batteries”, Journal of Solid State Chemistry., Vol.171, pp.30, 2003
- 【17】 廖世傑，“儲氫技術及應用簡介”，工業材料，Vol.190, pp.139，2002
- 【18】 大角泰章，吳永寬，苗艷秋譯，“金屬氫化物的性質與應用”，北京：化學工業出版社，pp.19-40，1990
- 【19】 Sandrock G., “A Panoramic Overview of Hydrogen Storage Alloys From a Gas Reaction Point of View”, Journal of Alloys Compounds., Vol.293-295, p.877-888, 1999
- 【20】 Martin, M., Gommel, C., Borkhart, C. and Fromm, E., “Absorption and Desorption Kinetics of Hydrogen Storage Alloys”, Journal of Alloys Compounds., Vol.238, pp.193, 1996
- 【21】 Andreas Ziitel ,” Materials for hydrogen storage ”, ISSN:1369-7021 Elsevier Ltd 2003
- 【22】 Anani A., Visintin, A., Petrov, K. and Srinivasan, S., “Alloys for Hydrogen Storage in Nickel/Hydrogen and Nickel/Metal Hydride Batteries”, Journal of Power Sources, Vol.47, pp.261-275, 1994
- 【23】 Yamaguchi, M. and Akiba, E., “Electronic and Magnetic Properties of Metals and Ceramics Part II (K.H.J. Buschow, Ed.)”, ISBN:3-527-28264-5 Vol.3B, VCH, New York, pp.333, 1994
- 【24】 Fukai, Y., “The metal-hydrogen System: basic bulk properties, Springer series in Materials Science”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol.21, pp.248, 1993
- 【25】 Wiswall R., “Hydrogen in Metal II (G. Alefeld and J. Völkl, Eds.)”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Vol.29, pp201. 1978
- 【26】 Sandrock G., “A Panoramic Overview of Hydrogen Storage Alloys From a Gas Reaction Point of View”, Journal of Alloys Compounds., Vol.293-295, p.877-888, 1999
- 【27】 Venkatensan, V. T. and Wallace, W. E., “The hyperstoichiometric ZrMn_{1+x}Fe_{1+y}H₂ system II : hysteresis effect”, Journal of the Less Common Metals, Vol.91, pp.239, 1983

- 【28】 Flanagan, T. B. and Oates W. A., “Some aspects of equilibrium and non-equilibrium phenomena in intermetallic compound and alloy hydrides”, Journal of the Less Common Metals, Vol.100, pp.299, 1984
- 【29】 Eisenberg, F. G. and Goodell, P. D., “Cyclic response of reversible hydriding alloys in hydrogen containing carbon monoxide”, Journal of the Less Common Metals, Vol.89, pp.55-62, 1983
- 【30】 林文德，廖世傑，“儲氫系統設計”，工業材料，Vol.190, pp.155, 2002
- 【31】 Sheridan, J. J., Eisenberg, F.G. and Greskovich, E.J., “Hydrogen Separation From Mixed Gas Streams Using Reversible Metal Hydrides”, Journal of the Less Common Metals, Vol.89, pp.447, 1983
- 【32】 Kawamura, M., Ono, S. and Mizuno Y., “Dynamic Characteristics of a Hydride Heat Storage System”, Journal of the Less Common Metals, Vol.89, pp.365, 1983
- 【33】 大角泰章，吳永寬，苗艷秋譯 “金屬氫化物的性質與應用”，北京：化學工業出版社，pp.240，1990
- 【34】 David, H. Costa, D and Golben, M., “Advanced Thermal Hydrogen Compression, Hydrogen, Fuel Cells, and Infrastructure Technologies”, Progress Report 2003
- 【35】 Bogdanovic, B. and Sandrock, G., “Catalyzed Complex Metal Hydrides”, MRS Bulletin, Vol.27, pp.712-716, 2002
- 【36】 王啟川，“熱交換設計-第十九章”，五南書局，台灣，pp.657-698，2007
- 【37】 Muthukumar, P., Prakash Maiya, M. and Srinivasa Murthy, S., “Experiments on a metal hydride based hydrogen compressor”, Journal of Hydrogen Energy, Vol30, pp.879-892, 2005

<u>再生能源開發與利用</u>	<u>能源新利用技術</u>	<u>節約能源技術</u>
<p>1.太陽光電：</p> <p>矽基太陽電池、建材一體成型太陽電池模組(BIPV)、染料敏化太陽電池等。</p> <p>2.太陽熱能：</p> <p>輕型及建材一體型集熱器、多色系太陽能選擇性吸收膜、應用推廣及產業輔導等。</p> <p>3.生質能：</p> <p>固態衍生燃料、生質柴油等。</p> <p>4.風力發電：</p> <p>風力機、離島風力發電、電能儲存系統等。</p> <p>5.海洋能：</p> <p>海洋能數值評估及調查、海洋溫差發電等。</p>	<p>1.氫能源開發及儲存技術：</p> <p>-高效能產氫技術。</p> <p>-高效益氫能儲存技術及建立氫能源站等。</p> <p>2.燃料電池應用技術：</p> <p>質子交換膜燃料電池(PEMFC)、直接甲醇燃料電池(DMFC)、固態氧化物燃料電池(SOFC)、系統整合技術等。</p> <p>3.複合動力潔淨車輛關鍵技術：</p> <p>小型引擎與電動/燃料電池複合動力車輛等。</p> <p>4.多元燃料氣化發電技術：</p> <p>氣化技術、淨煤技術及二氧化碳補獲、儲存技術等。</p> <p>5.天然氣水合物技術：</p> <p>海域調查及成因模擬、提取及運輸儲存、環境評估與控制。</p>	<p>1.高效率冷凍空調系統技術：</p> <p>直流變頻空調機、變頻螺旋式冰水機、天然冷媒設備及系統、離心式冰水機、奈米流體等。</p> <p>2.高效率照明技術：</p> <p>LED照明、白光OLED、高效率電控及燈具等。</p> <p>3.建築節能技術：</p> <p>省能建材、塗料及住商節能監控整合技術等。</p> <p>4.高效率燃燒與熱能利用技術：</p> <p>高溫熱交換器及回收利用技術、燃燒系統光學感測及監控技術、高溫隔熱材料及儲能。</p>

表 1-1 全國能源技術發展現況

2A									
Mg	過渡元素								
	3B	4B	5B	6B	7B	8B			
氫 離 子 結 合 安 定 性	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	
	Y	Zr	Nb					Pd	
	易形成氧化物				不易形成氫化物(Pd 除外)				
	安定性高				氫以 H ⁺ 形成固溶於金屬中結合力弱				
	吸氫量大				吸氫量極少				
	放氫能力弱				容易在金屬中擴散移動				

表 2-1 週期表中各族元素與氫之結合特性【18】

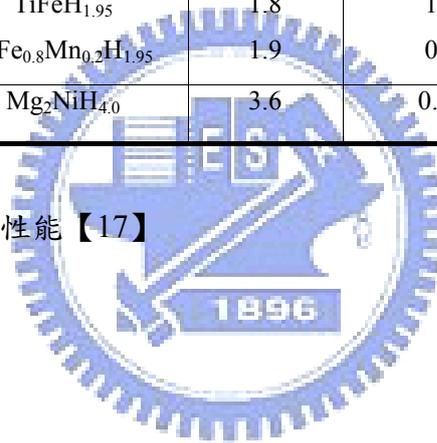
特性	AB_5	AB_2	AB	A_2B
吸氫便易性	+	+	+	0
儲氫量	0	+	+	+
PCI曲線	+	+	+	-
活化	+	0	-	0
不純度	+	0	-	0
循環性	+	0	-	-
價格	0	+	+	+

Attribute : -=劣 ; 0=中等 ; +=優

表 2-2 四種儲氫合金類型之整體比較【19】

類型	合金	氫化物	吸氫量 (wt.%)	放氫壓/溫度 (MPa/°C)	氫化物生成焓 (KJ/mol)
AB ₅	LaNi ₅	LaNi ₅ H ₆	1.4	0.4/50	-30.1
	LaNi _{4.6} Al _{0.4}	LaNi _{4.6} Al _{0.4} H _{5.5}	1.3	0.2/80	-38.1
	MmNi ₅	MmNi ₅ H _{6.3}	1.4	3.4/50	-26.4
	MmNi _{4.5} Mn _{0.5}	MmNi _{4.5} Mn _{0.5} H _{6.6}	1.5	0.4/50	-17.6
	MmNi _{4.5} Al _{0.5}	MmNi _{4.5} Al _{0.5} H _{4.9}	1.2	0.5/50	-29.7
AB ₂	Ti _{1.2} Mn _{1.8}	Ti _{1.2} Mn _{1.8} H _{2.47}	1.8	0.7/20	-28.9
	TiCr _{1.8}	TiCr _{1.8} H _{3.6}	2.4	0.2~5/-78	- - -
	ZrMn ₂	ZrMn ₂ H _{3.46}	1.7	0.1/210	-38.9
	ZrV ₂	ZrV ₂ H _{4.8}	2.0	10 ⁻⁹ /50	-200.8
AB	TiFe	TiFeH _{1.95}	1.8	1.0/50	-23.0
	TiFe _{0.8} Mn _{0.2}	TiFe _{0.8} Mn _{0.2} H _{1.95}	1.9	0.9/80	-31.8
A ₂ B	Mg ₂ Ni	Mg ₂ NiH _{4.0}	3.6	0.1/253	-64.4

表 2-3 四種儲氫合金之基本性能【17】



製造單位	類型	儲氫量 (m ³)	儲氫合金	規格	備註
布魯克海文國家研究室 (美國)	內部 冷熱型	70 257	TiFe 400kg,1.56% TiFe _{0.9} Mn _{0.1} 1700kg,1.36%	ψ300mm ψ660mm	氫壓 3.5MPa 氫壓 3.4MPa
曼內斯曼公司、戴姆勒奔馳公司(德國)	內部隔離、 外部冷熱型	200	Ti _{0.98} Zr _{0.02} V _{0.43} Fe _{0.98} Cr _{0.02} Mn _{0.43} 1000kg,1.78%	ψ1143mm	氫壓 5MPa 溫度 100°C
日本化學技術研究所(日本)	內部 冷熱型	237	MmNi ₅ 系 1200kg,1.78%	ψ350mm ψ500mm	氫壓 5MPa 氫壓 1MPa 溫度 80°C
大阪氫工業研究所 (日本)	多管式，大 氣熱交換型	133	Ti-Mn 系、 TiFeMn 系 672kg,1.78%		氫壓 3.3~3.5MPa 常溫
美國比林格斯公司	車用	141.6	TiFe 715kg,1.78%	總重 400kg	
新日本製鋼研究所	內部冷熱型	67	Ti _{0.95} FeMm _{0.08} 400kg,1.5%	ψ381mm	氫壓 3.0MPa 溫度 85°C
日本岩谷產業公司	大氣 熱交換型	73	MmNiFe 480kg,1.38%	16 根 Al 合金管	氫壓 0.2MPa
德國奔馳公司	車用	53.4 60.1	低溫 TiCrMn 240kg,2% 高溫 Mg ₂ Ni 280kg,1.93%	總重 340kg 箱體 30% 總重 360kg 箱體 22%	

表 2-4 世界各國金屬氫化物儲氫容器性能表【30】

	熱壓縮儲氫系統	機械式氫氣壓縮機
氫氣流量	2000scfh	2000scfh
入口壓力	100psia	100psia
出口壓力	3600psia	3600psia
多段壓縮	5	3
熱水流量	50gpm@90°C	-
熱源需量	240Kbtu/h	-
冷卻水流量	50gpm@30°C	20gpm@90°C
電力需求	500 watts	20,000 watts
年電力消耗	1,000kWh	40,000 kWh

表 3-1 氫氣壓縮機之比較【34】

	熱壓縮式	機械式
體積	小(400L)	大(6000L)
重量	輕(100kg)	重(3600kg)
故障率	無可動件，故障率低	高壓可動件，故障率高
維修成本	低	高
能源使用	任何熱源皆可	大部分為電能
附加價值	同時純存氫氣	無
技術成熟度	開發中	成熟商品

表 3-2 氫氣壓縮機之比較續【34】

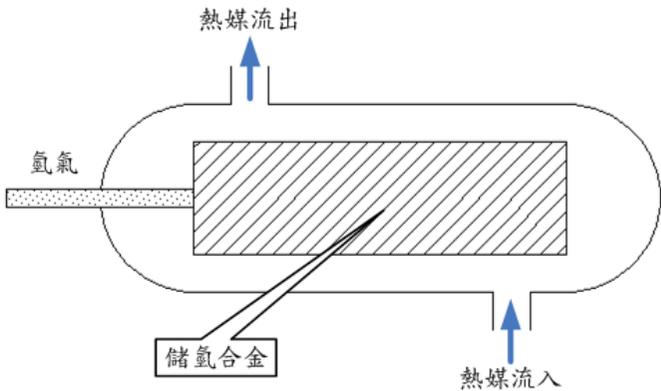
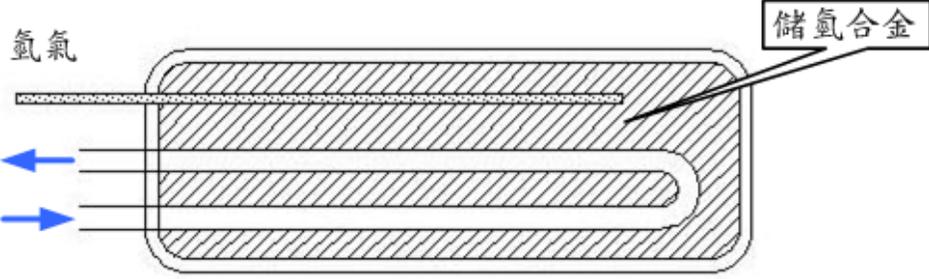
	優點	缺點
<p style="text-align: center;">殼外交換器</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 管徑小，所需管厚較小，可以減少重量與成本 2. 安全性較高 3. 殼水部所承受壓力約 2kg，製作容易 4. 儲氫管路接管較容易耐高壓 5. 未來變更容量與功能較為方便 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 熱阻抗增加 2. 儲氫合金固定於館內部施作較為困難 3. 管內與儲氫合金接觸面積過低 4. 殼側水與儲氫管熱交換面積較小
<p style="text-align: center;">殼內交換器</p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 對於儲氫合金加熱較為均勻 2. 可以提高有效熱傳面積 3. 熱阻抗低 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 水管包埋於高壓容器維修不易 2. 水管須承受達 250bar 壓力 3. 水管與壓力館接合不易施工且易漏氣 4. 外殼為高壓容器，造成重量增加，成本增加

表 3-3 熱交換器之比較

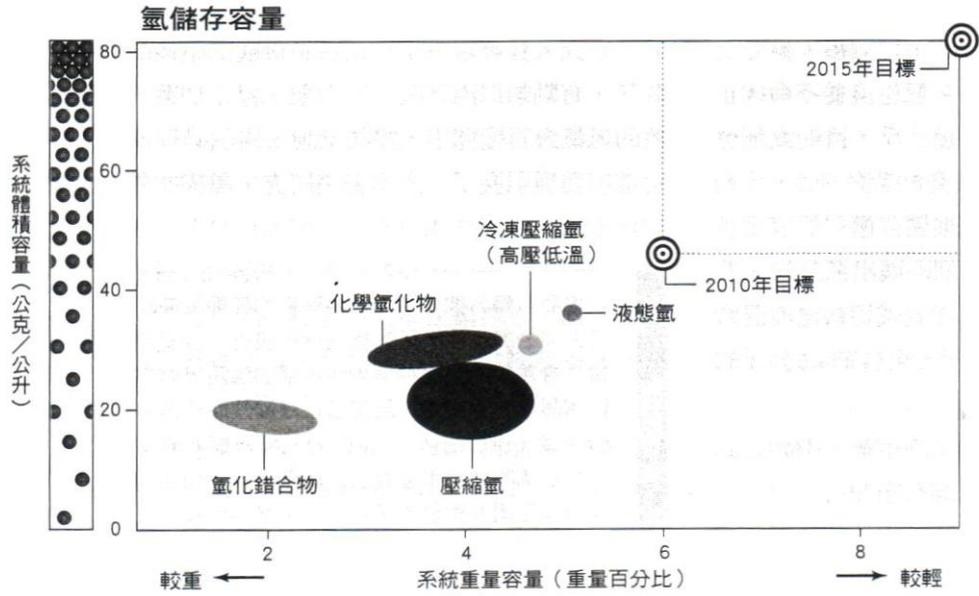


圖 1-1 各種儲氫技術之目標設定【3】

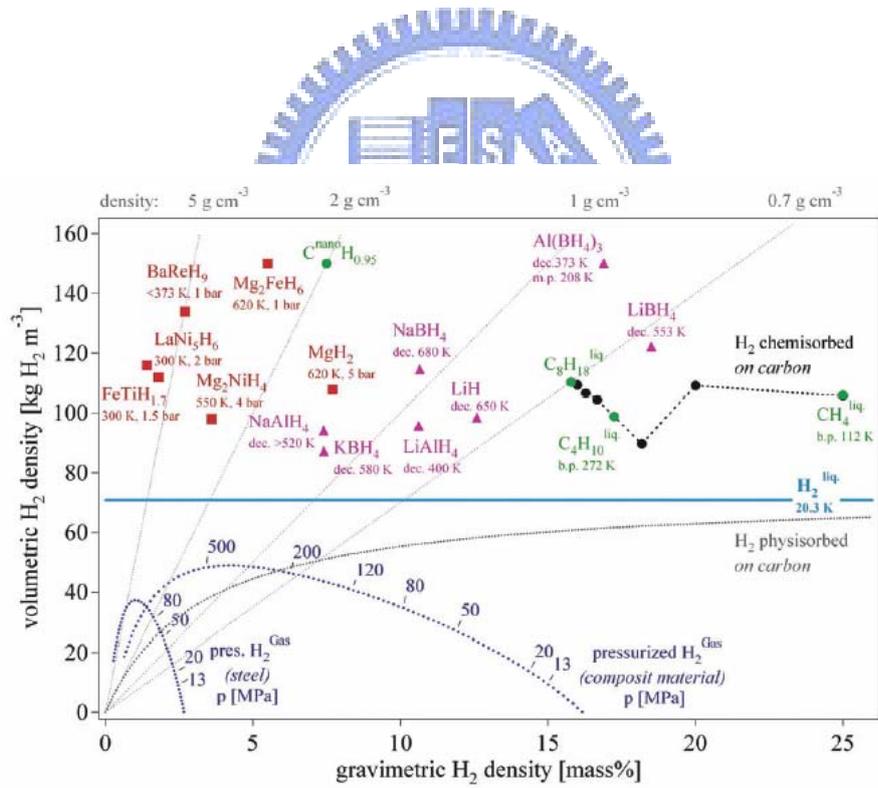


圖 1-2 各種儲氫方式之儲氫重量/體積密度之比較【4】

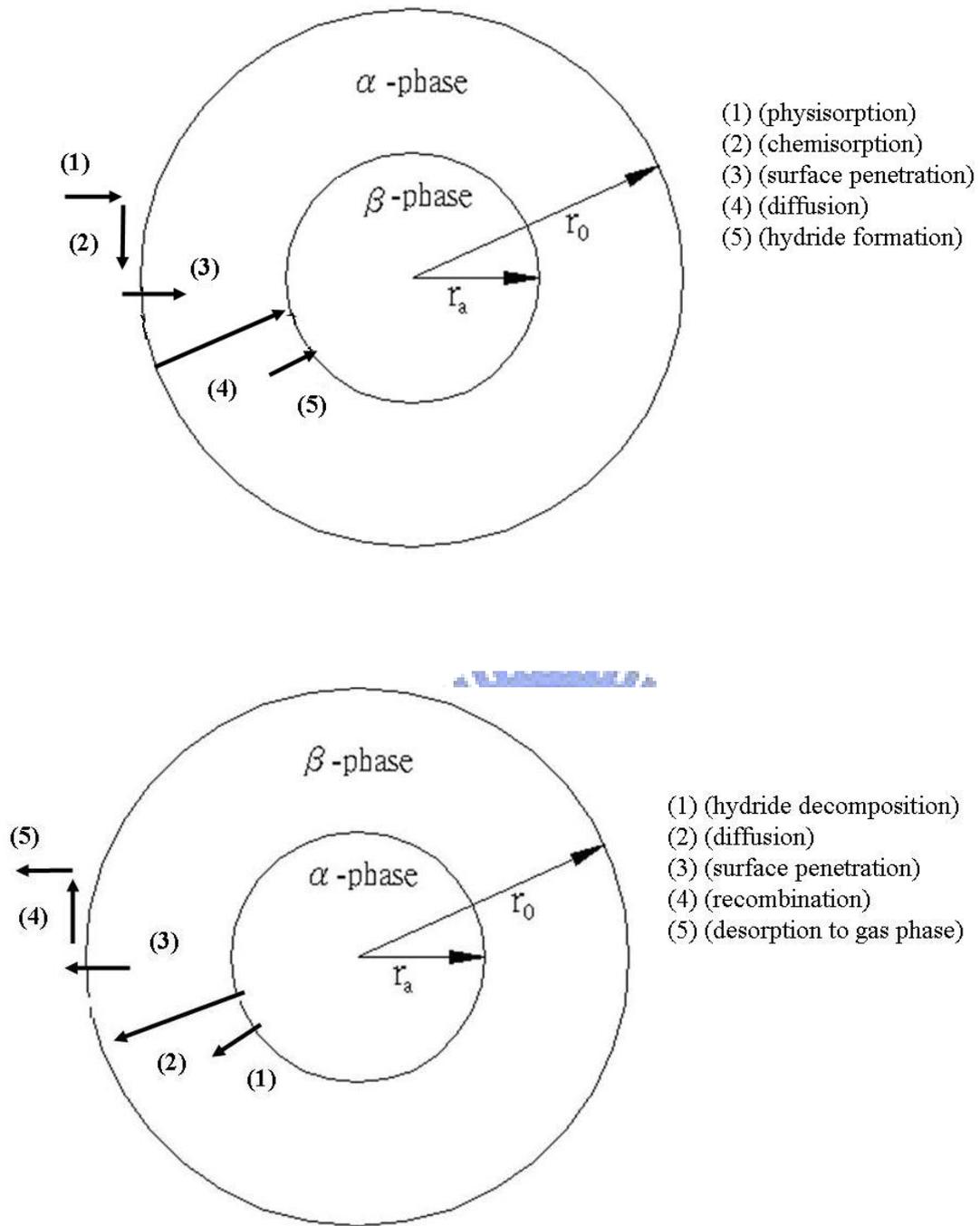


圖 2-1 儲氫合金之吸放氫過程 (a) 吸氫過程 (b) 釋氫過程【20】

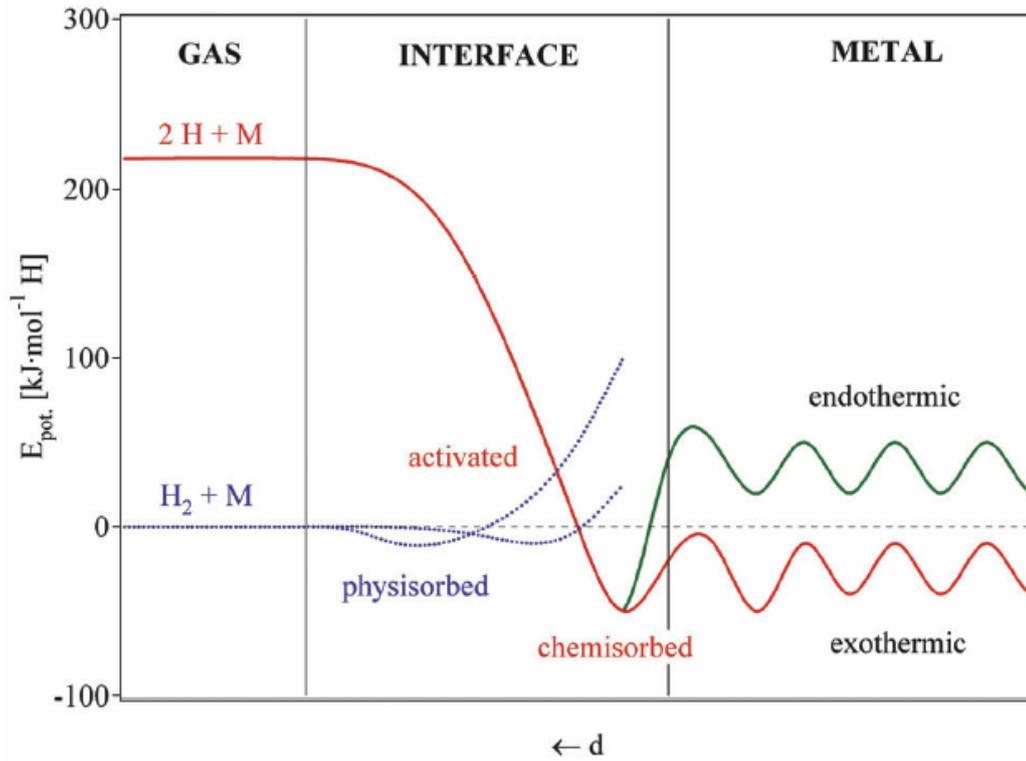


圖 2-2 氫化物吸氫過程以能階形態表示【21】



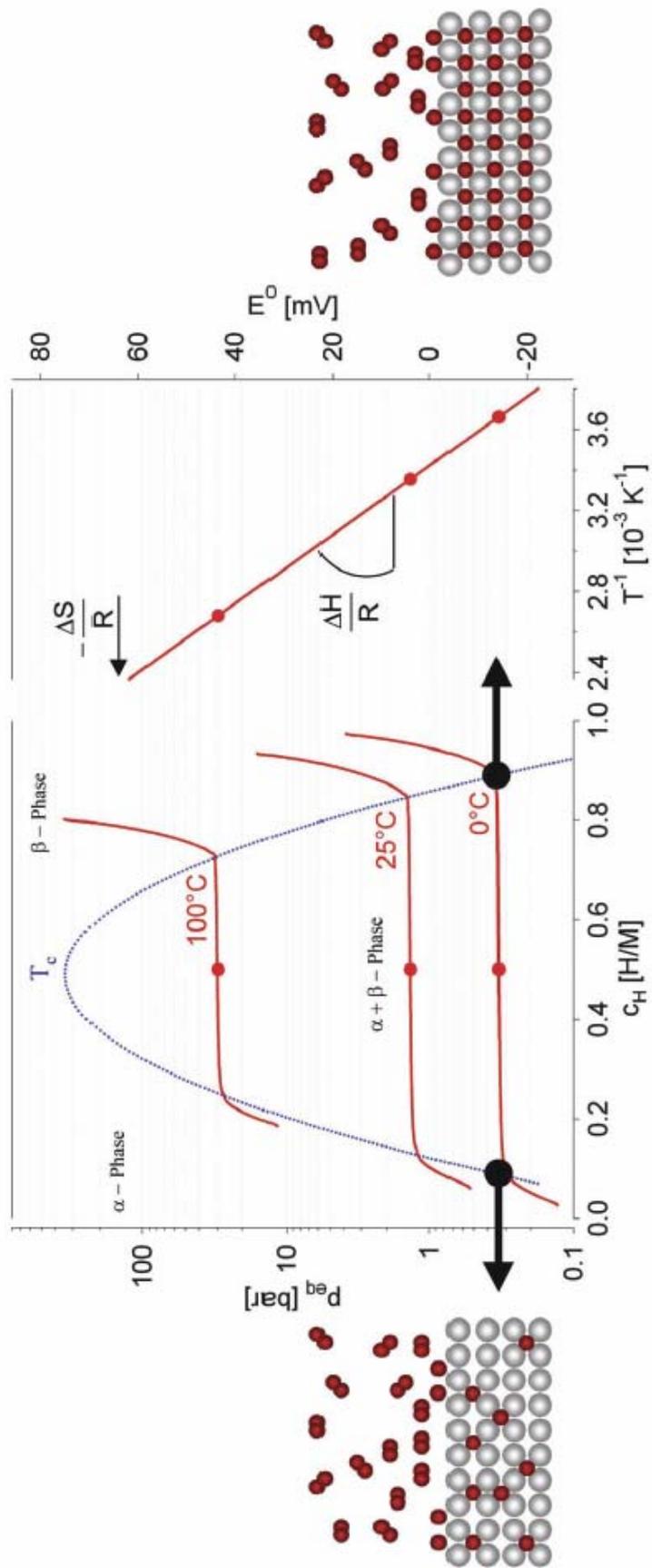


圖 2-3 儲氫合金之 P-C-T 曲線【21】

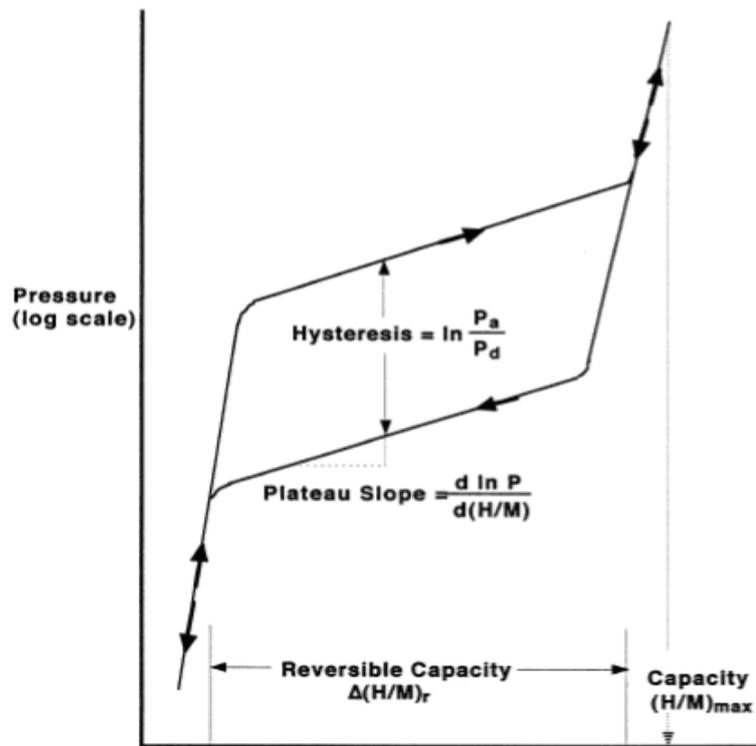


圖 2-4 遲滯損失【26】

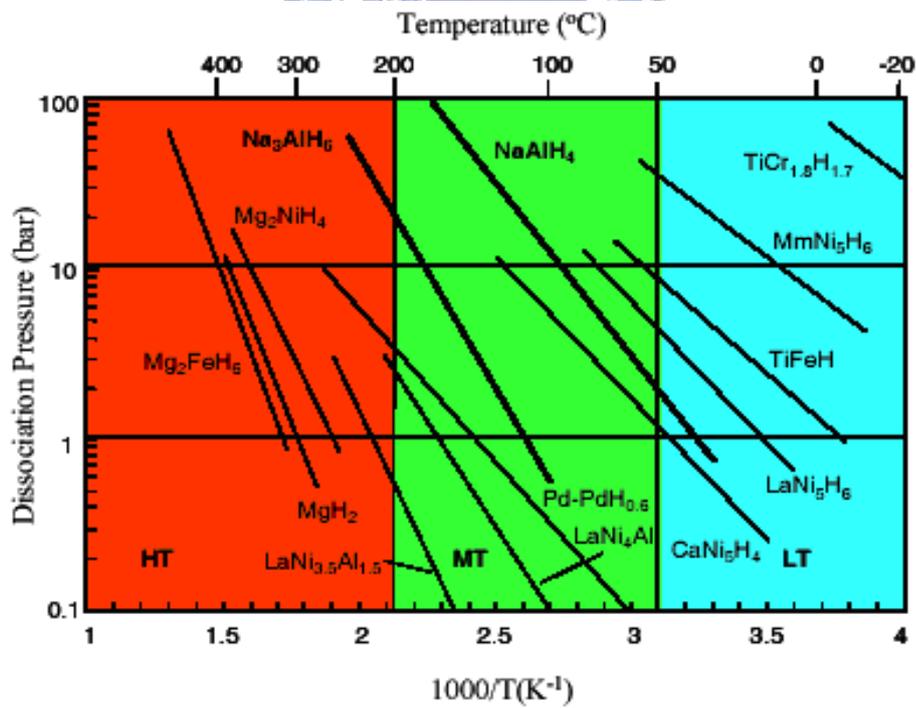


圖 3-1 Van's Hoff 曲線【35】

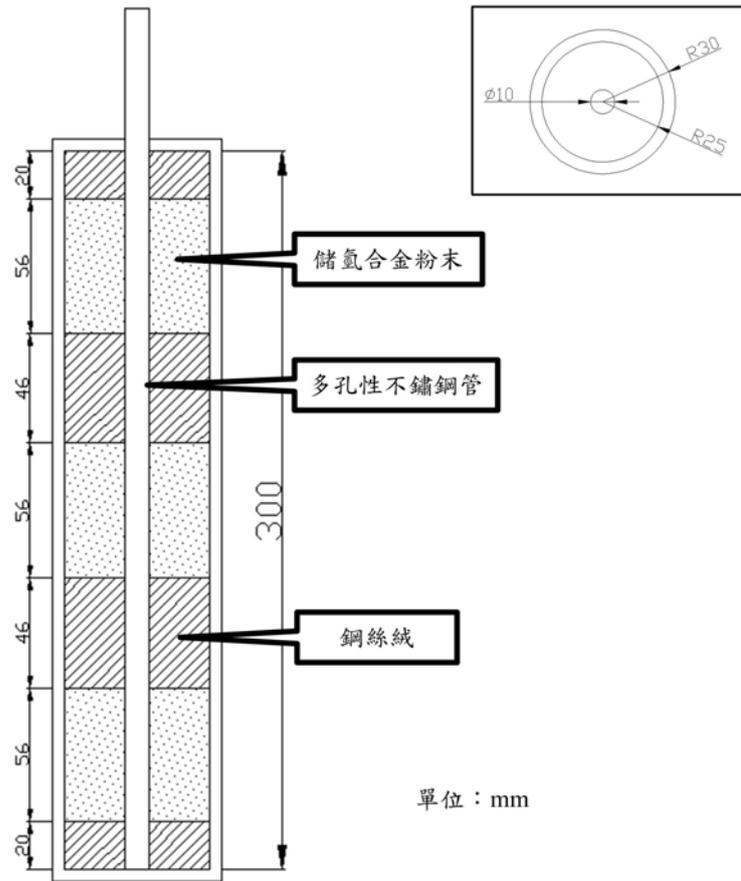


圖 3-2 罐體設計圖

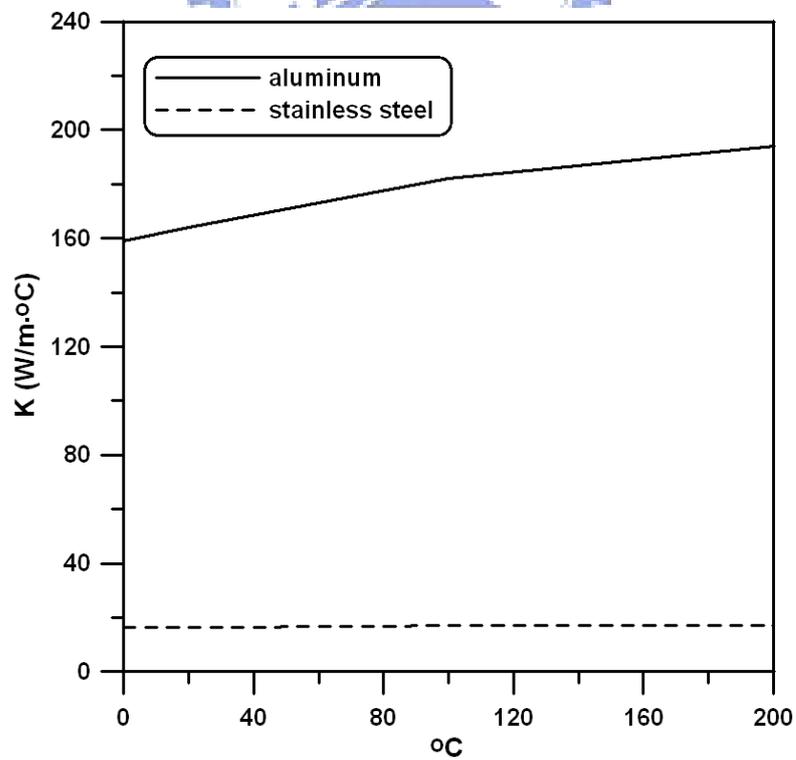


圖 3-3 鋁及不鏽鋼之不同溫度所對應之熱傳導係數

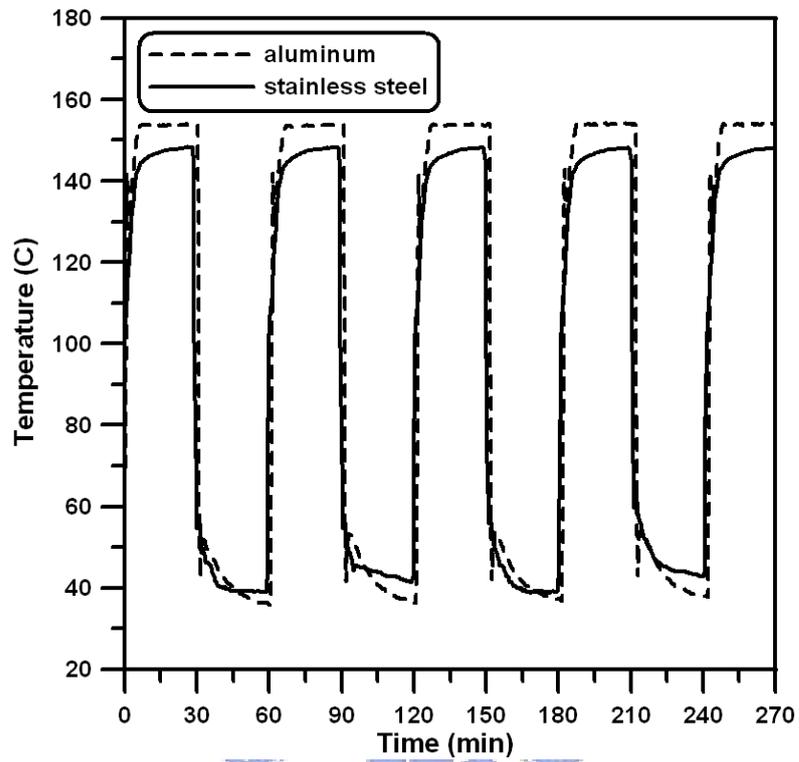


圖 3-4 鋁及不鏽鋼之熱交換器性能

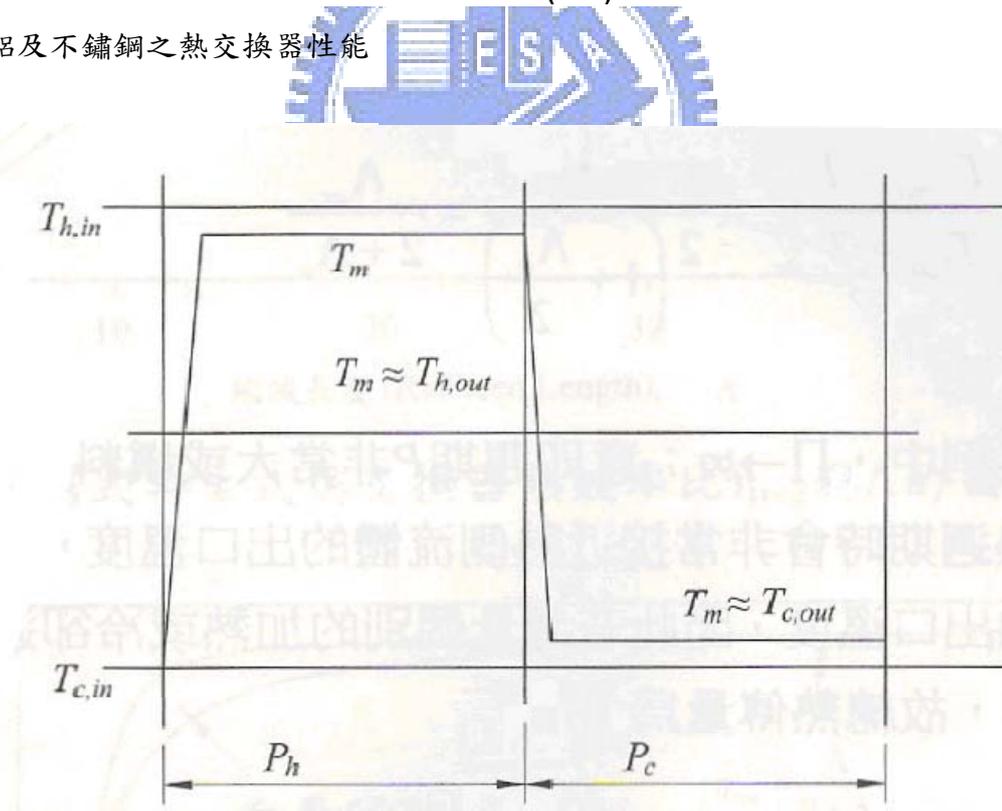


圖 3-5 再生式熱交換器推導之示意圖

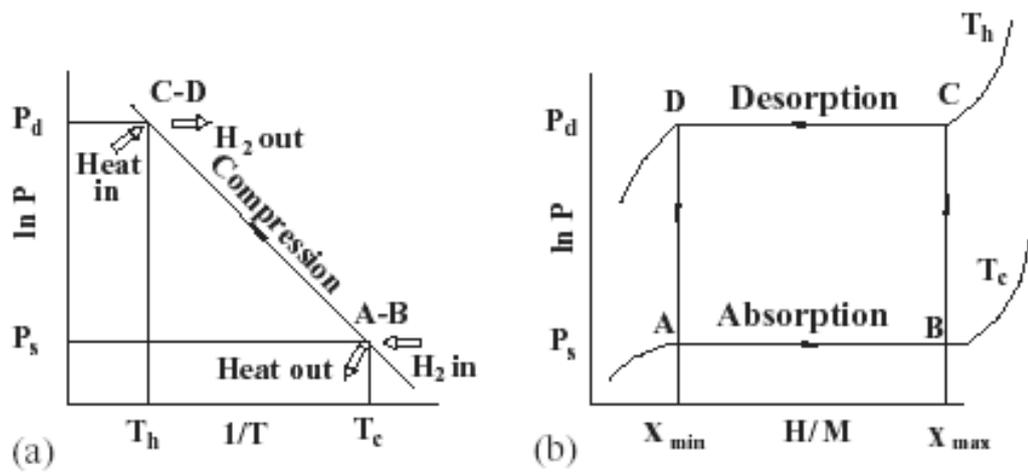


圖 3-6 第一級熱壓縮儲氫系統操作理論【36】

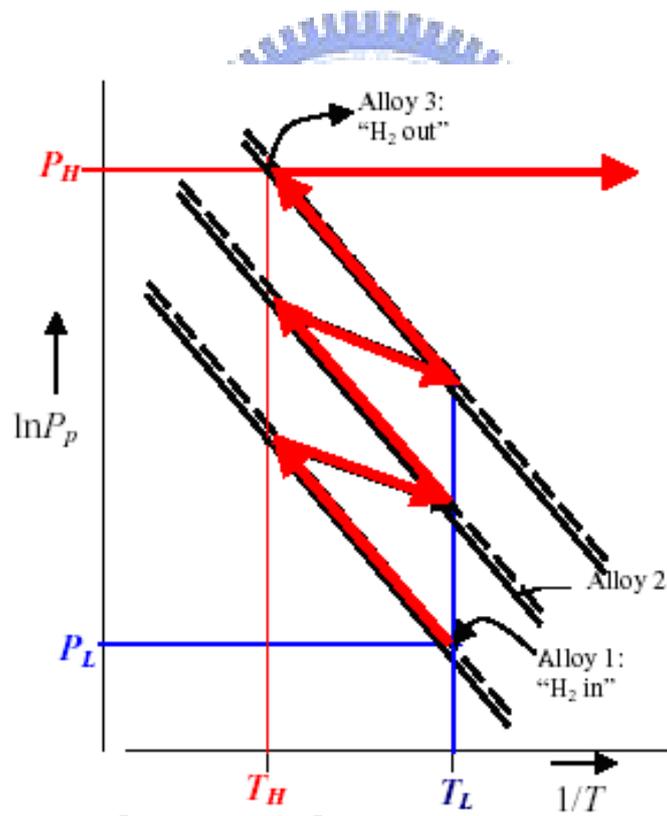


圖 3-7 多級熱壓縮儲氫系統操作理論

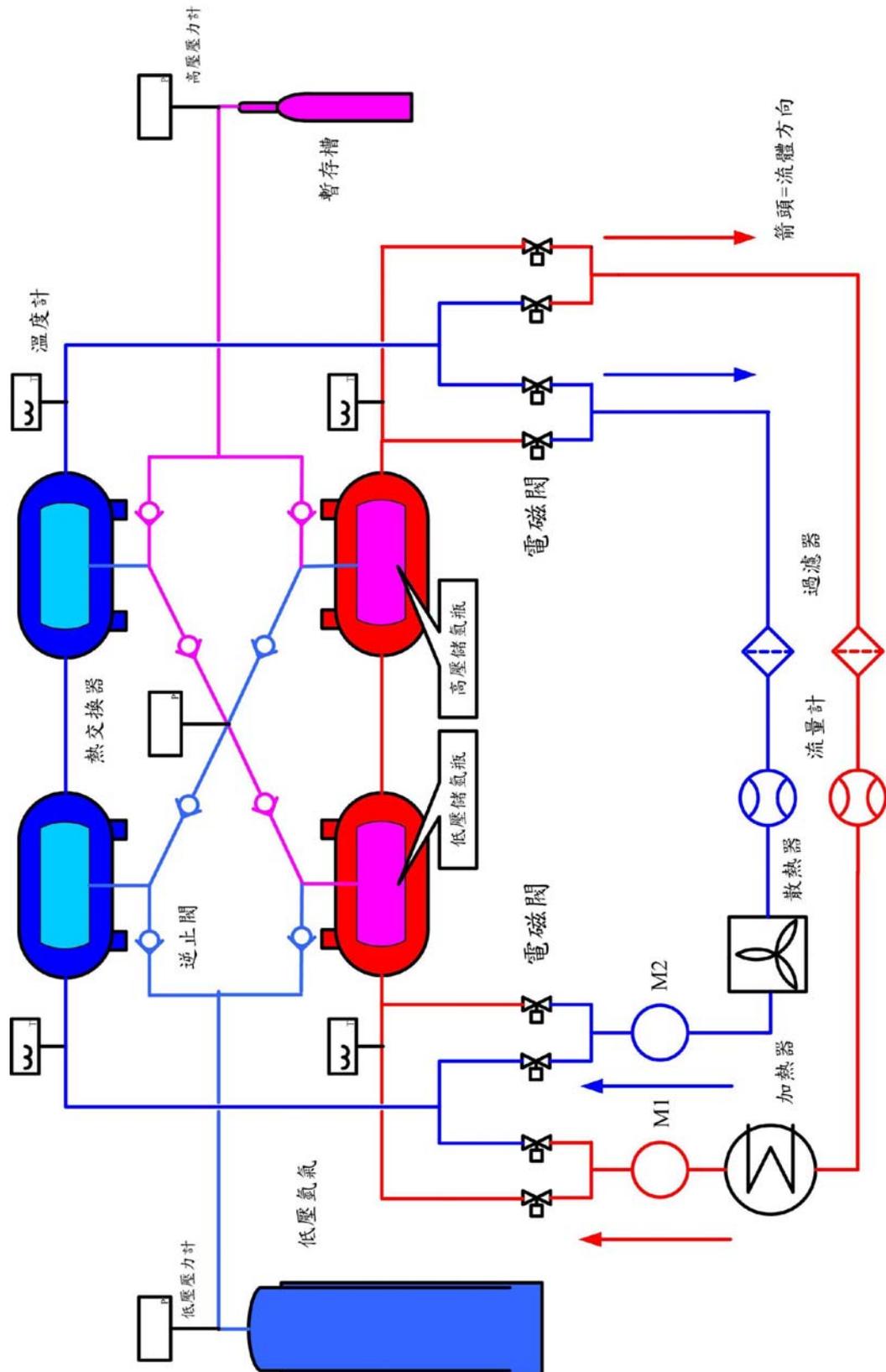


圖 3-9 連續雙級壓縮示意圖

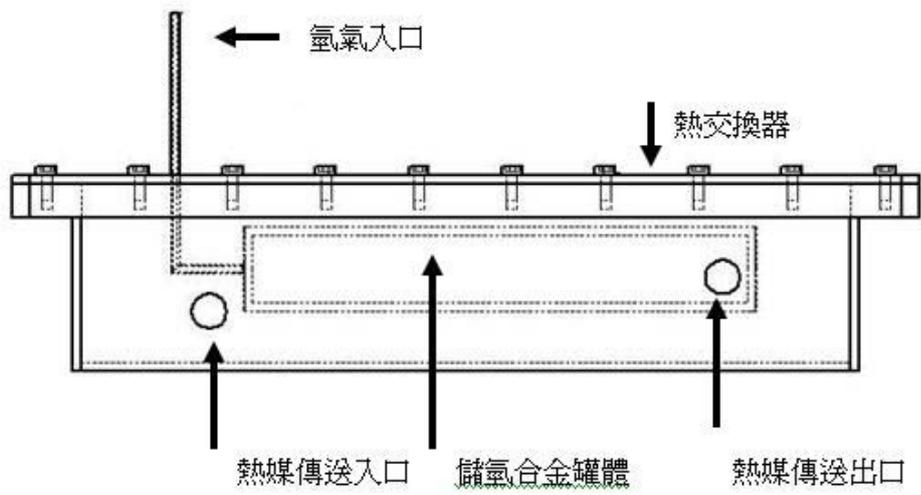


圖 4-1 矩形熱交換器及儲氫合金罐體放置示意圖

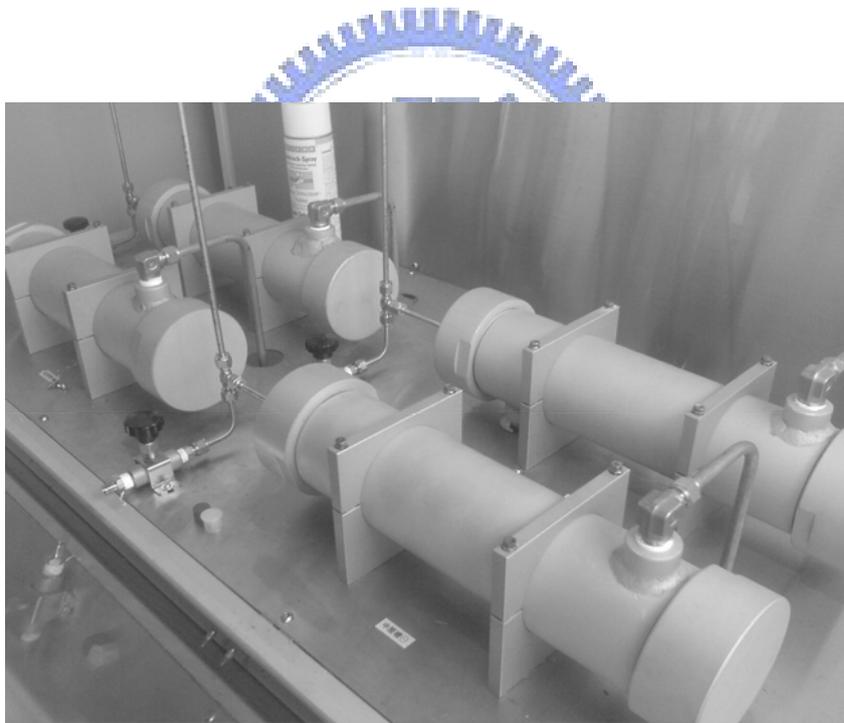


圖 4-2 圓柱狀製熱交換器及儲氫合金罐體放置示意圖

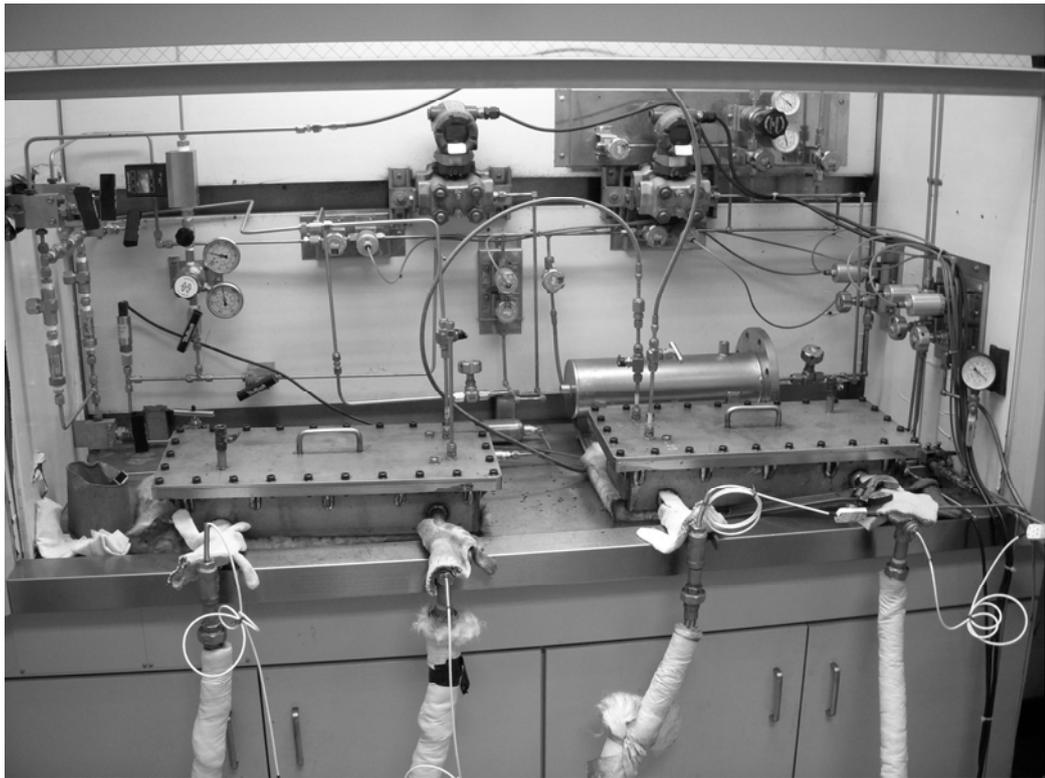


圖 4-3 實驗設備實圖

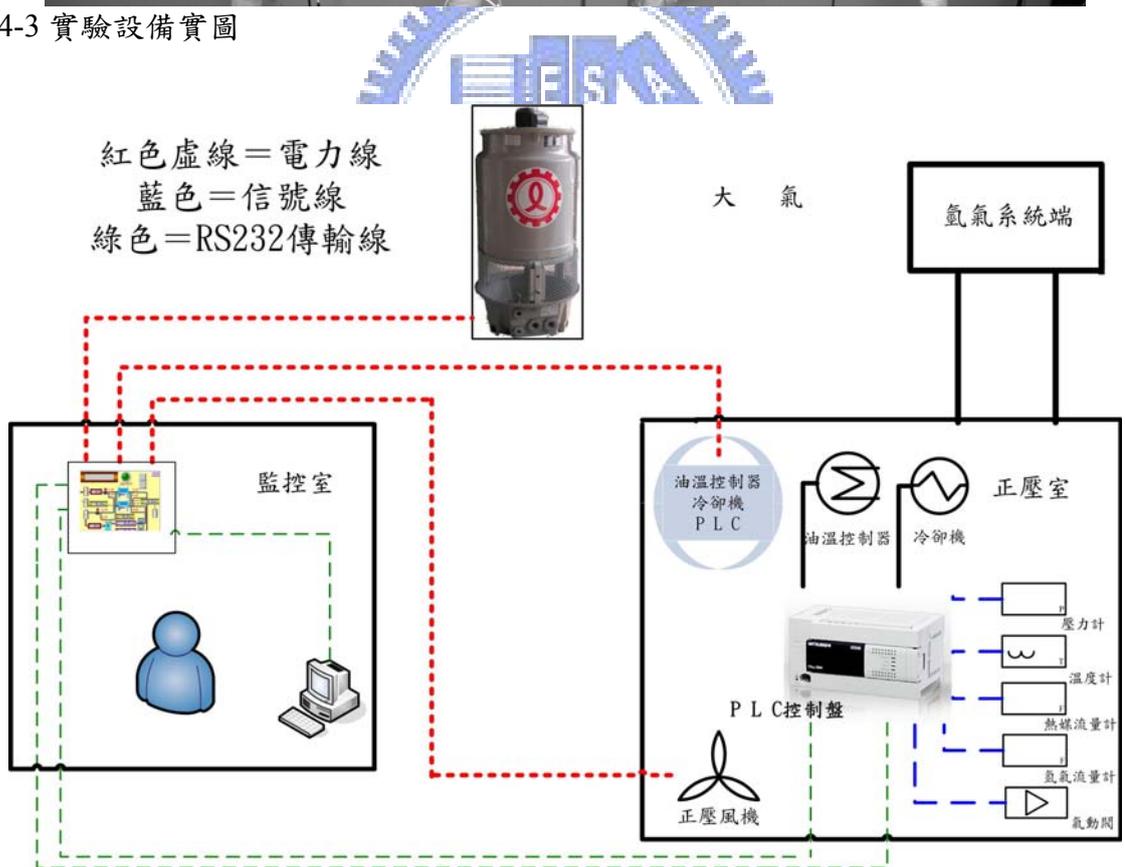


圖 4-4 南分院實驗室系統監控

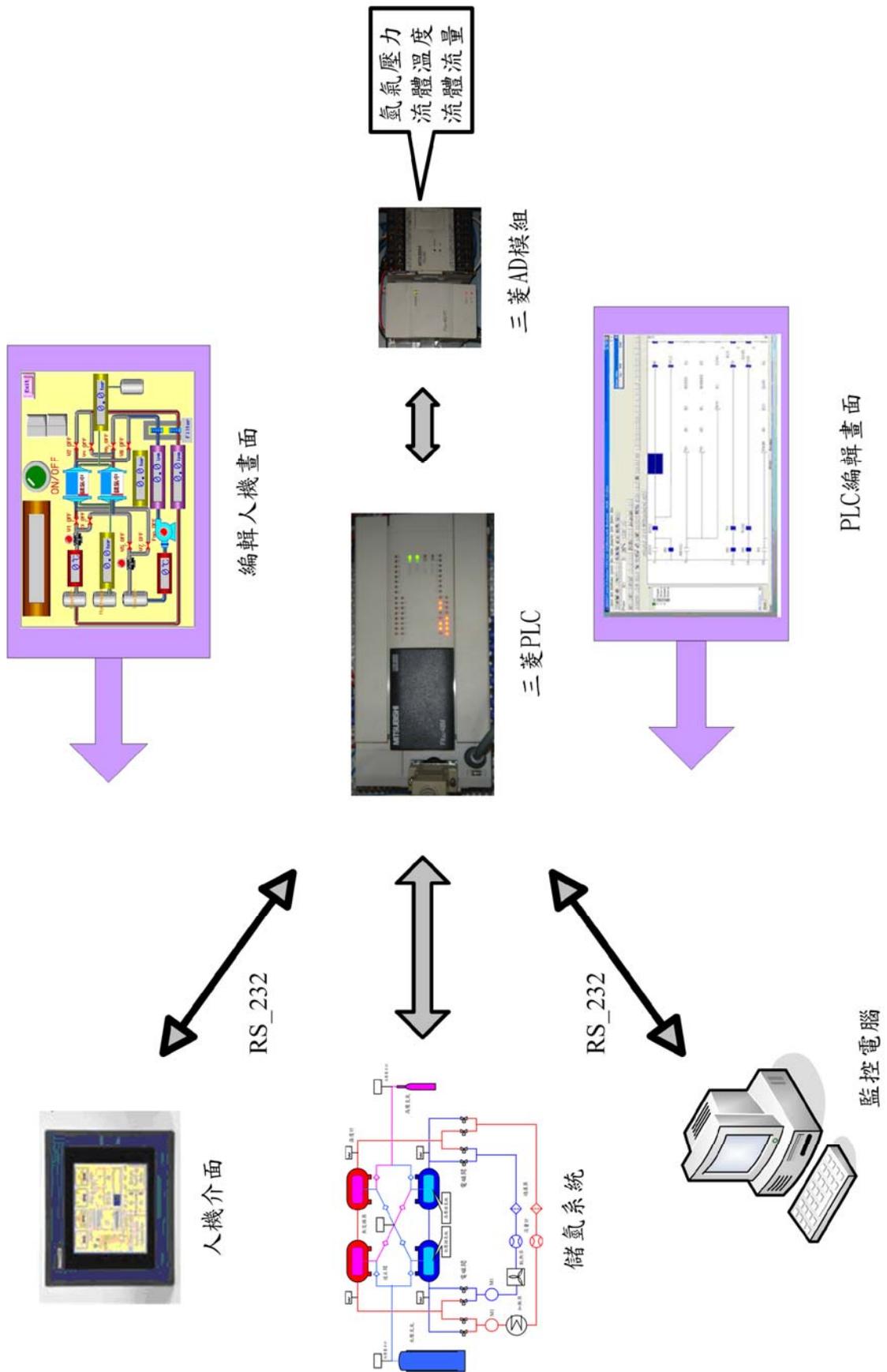


圖 4-5 儲氫控制系統架構圖

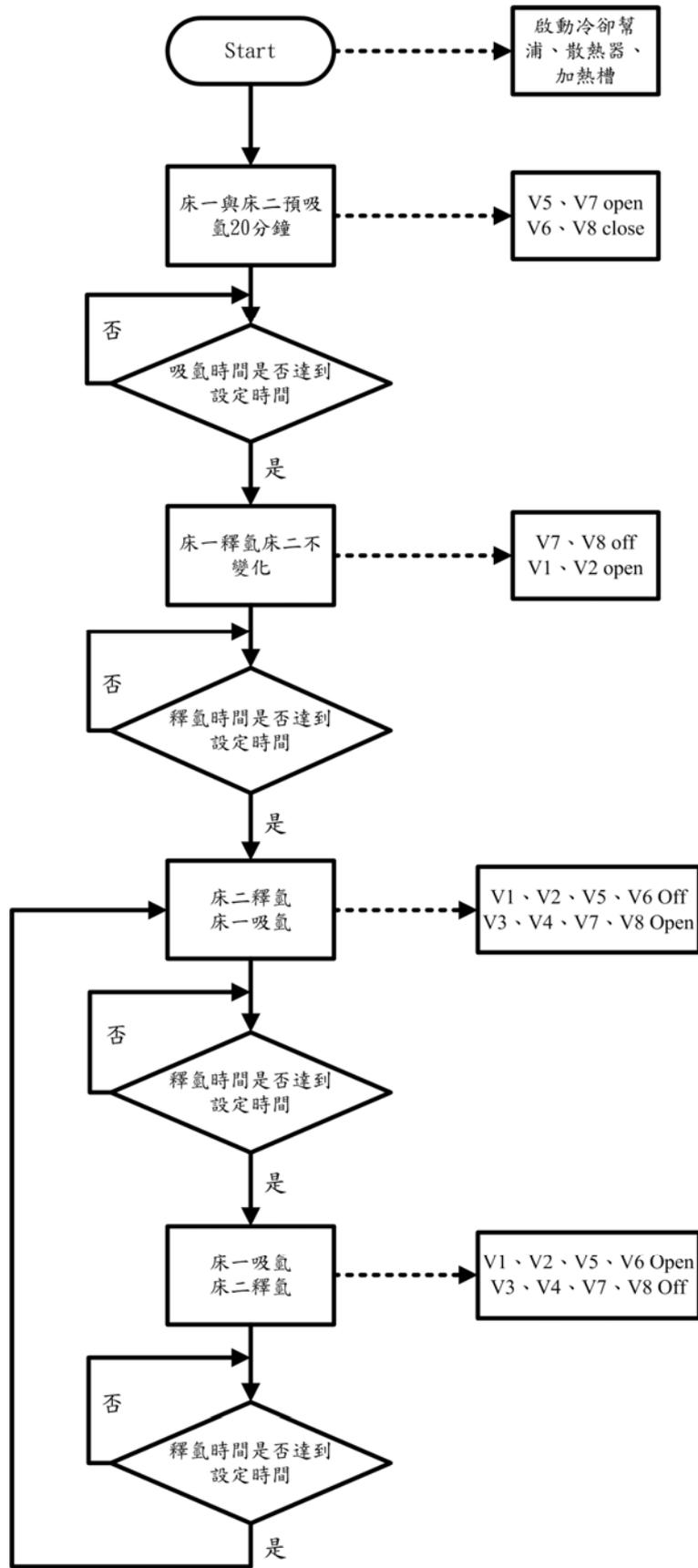


圖 4-6 系統動作流程圖

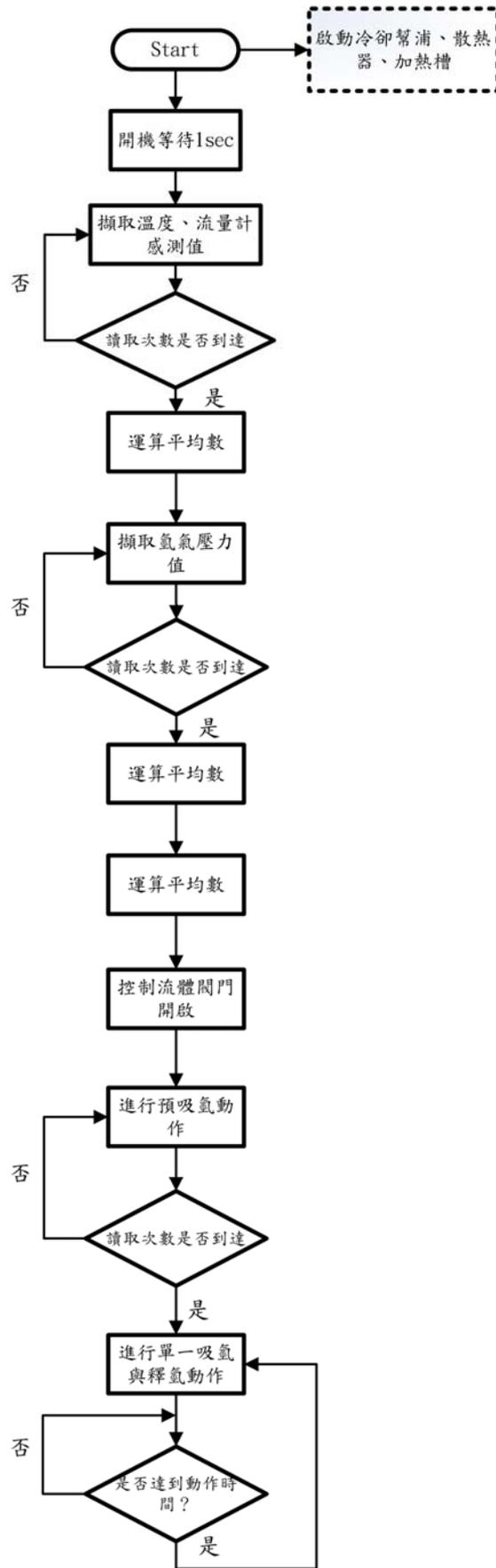


圖 4-7 PLC 控制流程圖

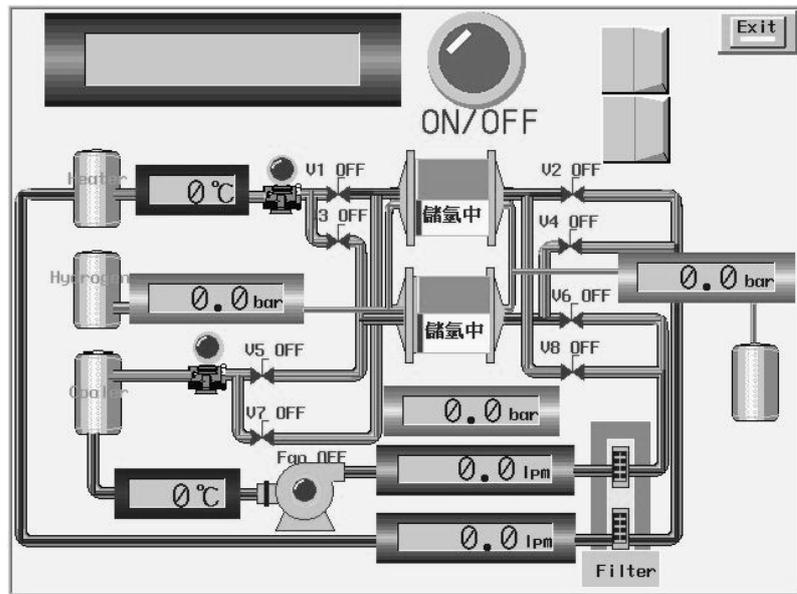


圖 4-8 人機介面規劃畫面

廠商	桀陞機械有限公司
型號	JSO-1020ED
工作溫度	35~200度
傳送媒介	熱煤油
輸入電源	220V



圖 4-9 油溫控制器

廠商	MITSUBISHI
型號	FX3U-48M
輸入電源	220V

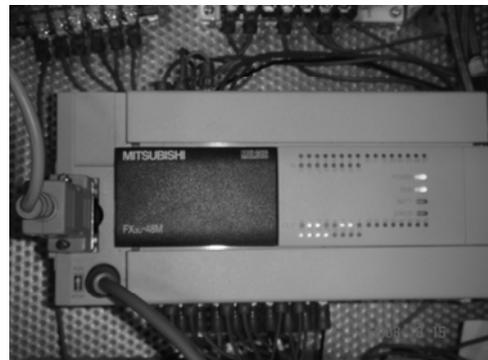


圖 4-10 PLC 控制器



圖 4-11 氫氣鋼瓶及降壓調節閥



圖 4-12 Yokogawa 壓力計



圖 4-13 RTD 溫度計

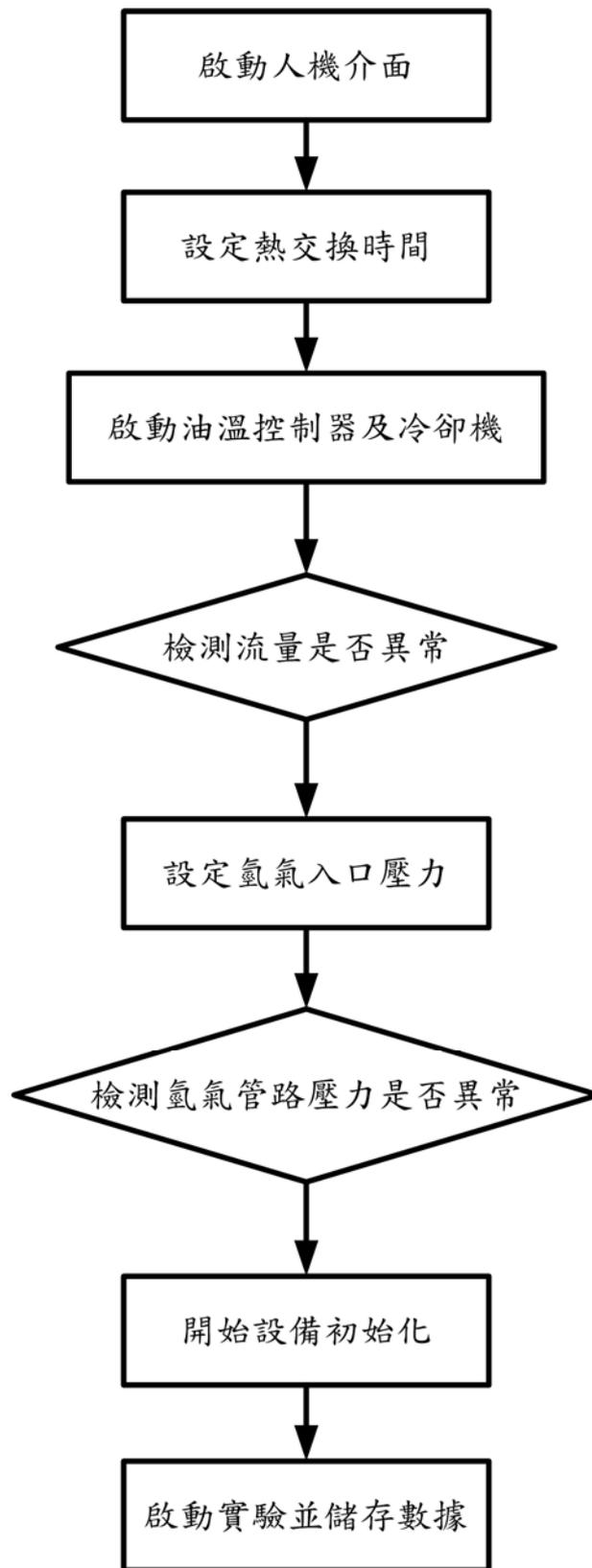


圖 4-14 實驗流程圖

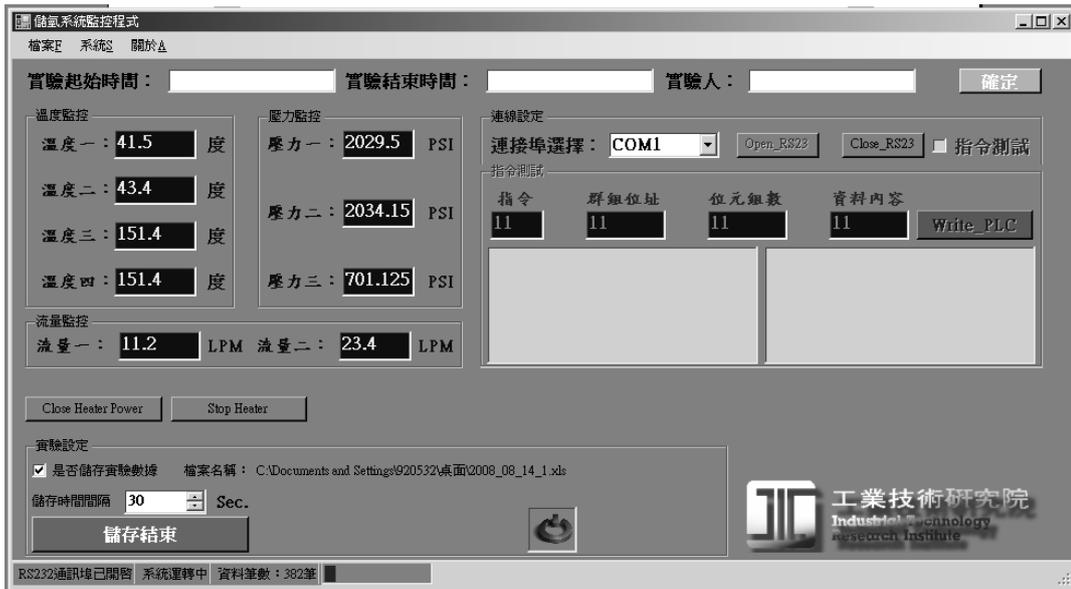


圖 4-15 監控程式畫面

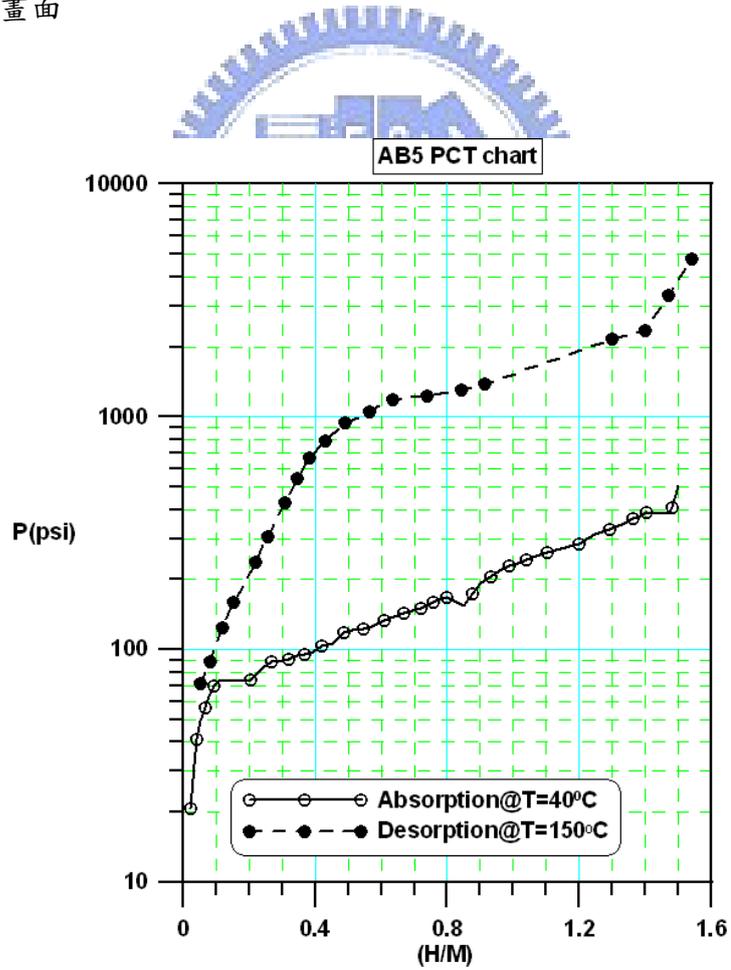


圖 5-1 低壓儲氫合金之特性曲線

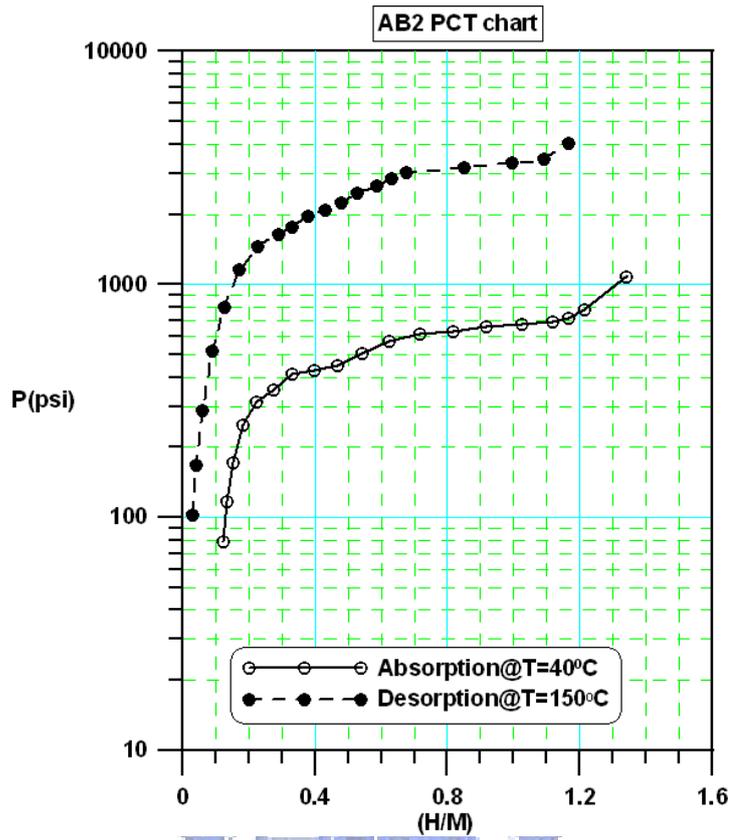


圖 5-2 高壓儲氫合金之特性曲線

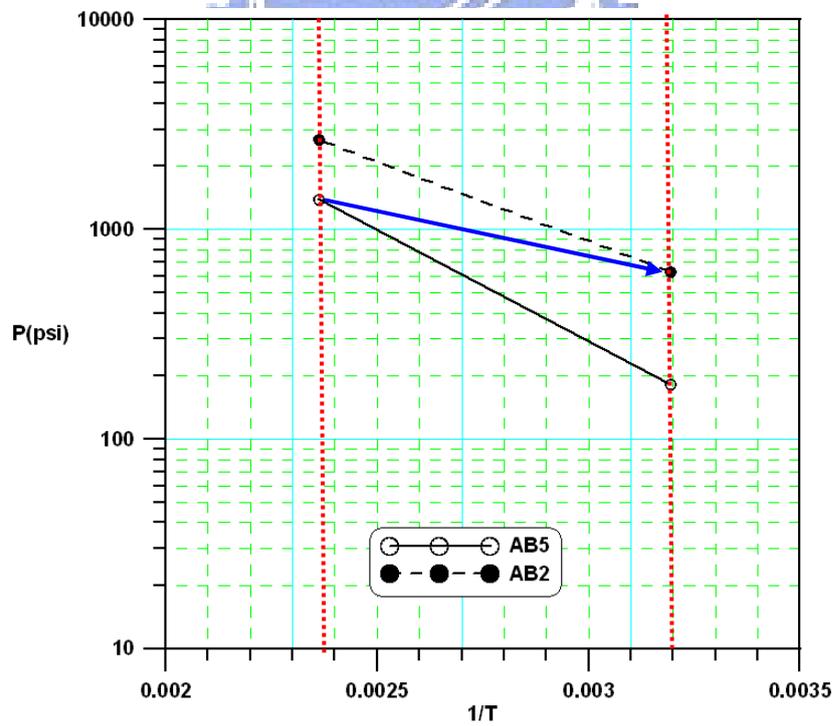
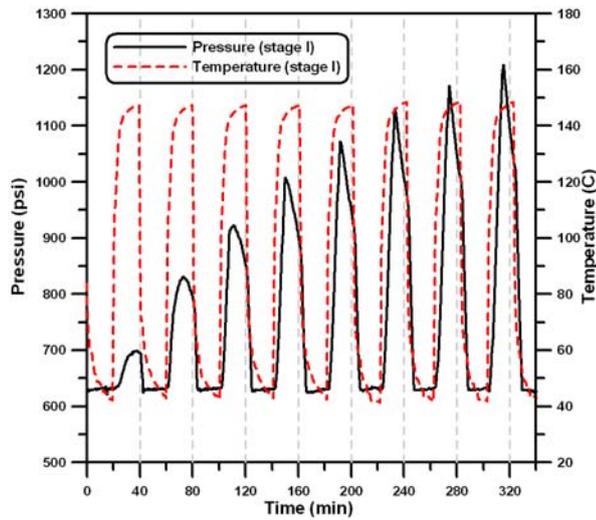
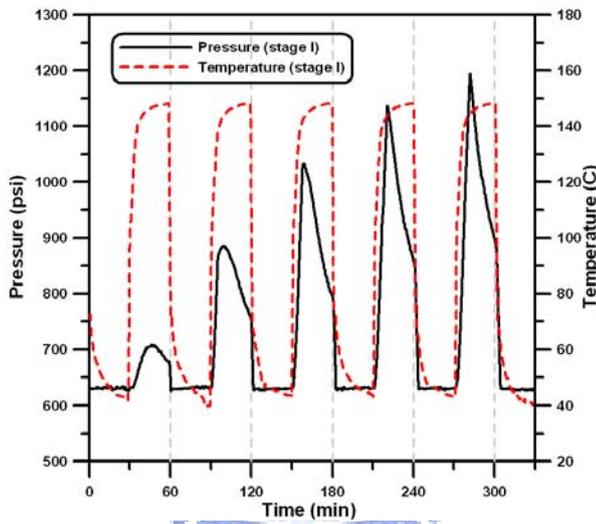


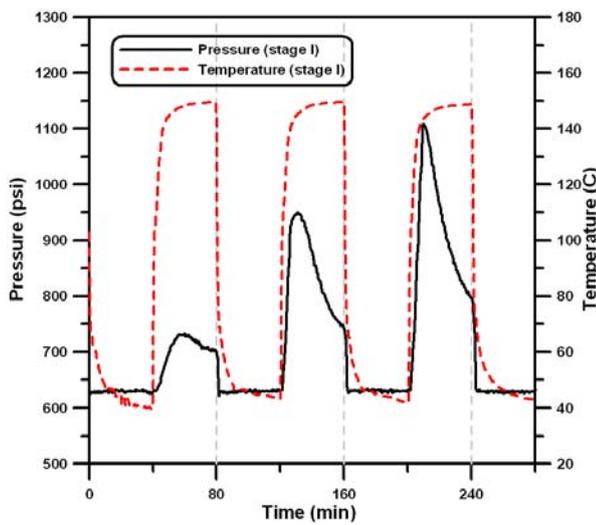
圖 5-3 雙級壓縮 Van's Hoff 圖



(a) 冷熱媒轉換時間 20 分鐘

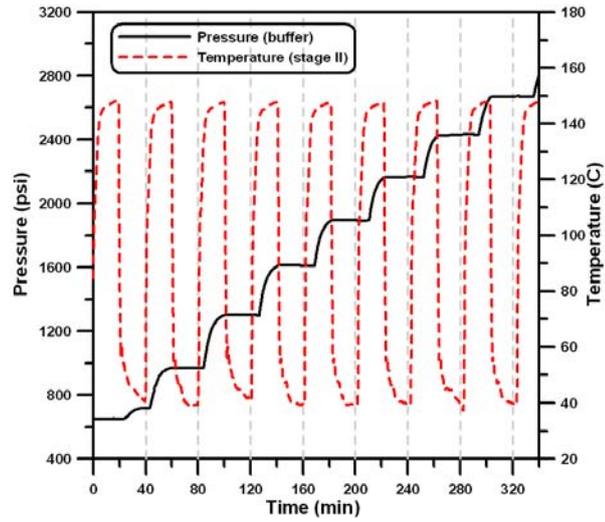


(b) 冷熱媒轉換時間 30 分鐘

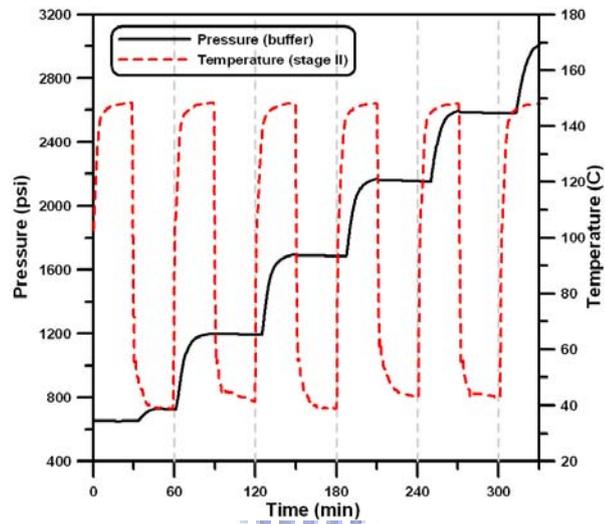


(c) 冷熱媒轉換時間 40 分鐘

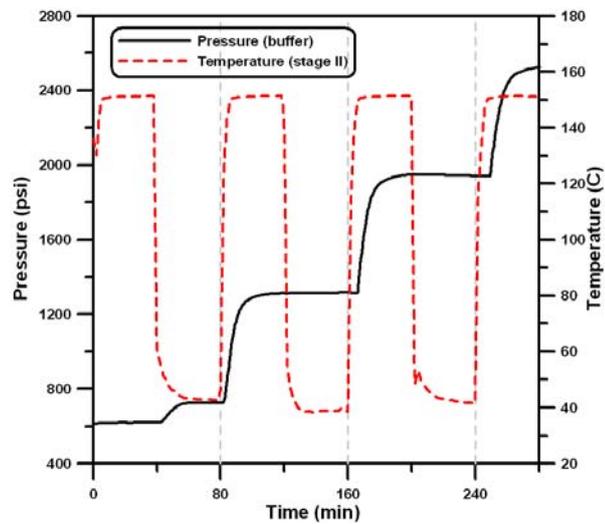
圖 5-4 第一級儲氫合金槽內壓力與轉換溫度轉換關係



(a) 冷熱媒轉換時間 20 分鐘

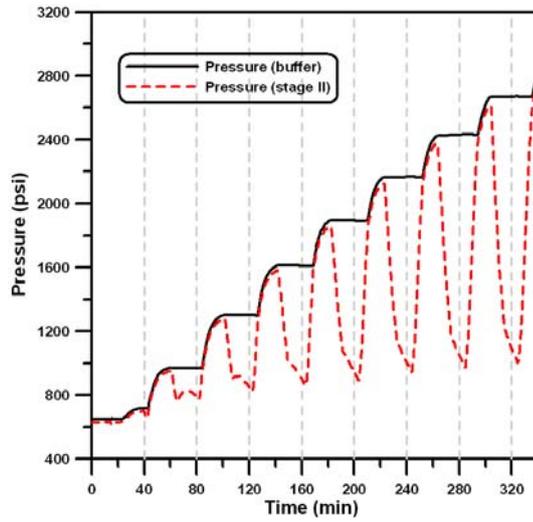


(b) 冷熱媒轉換時間 30 分鐘

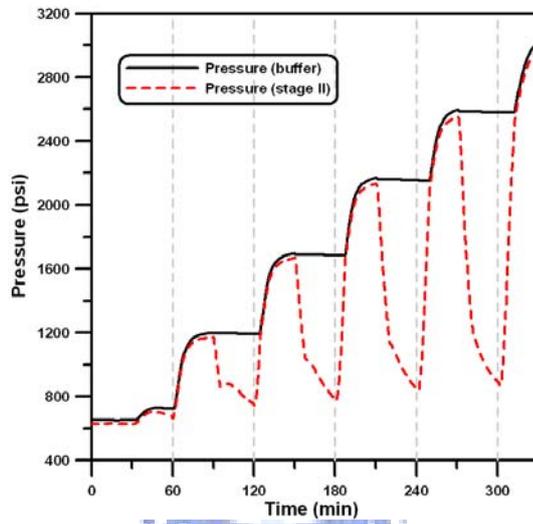


(c) 冷熱媒轉換時間 40 分鐘

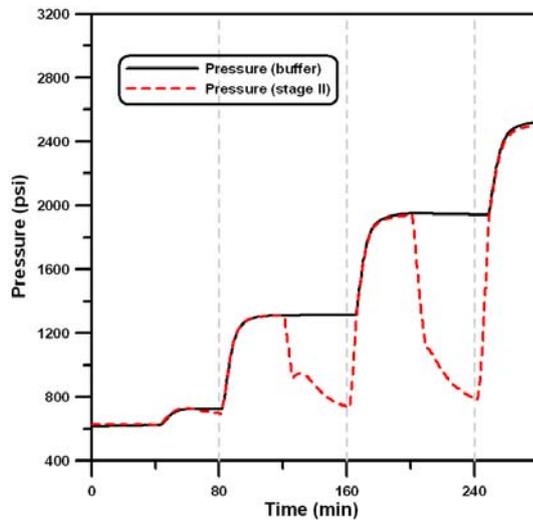
圖 5-5 暫存槽內壓力與轉換溫度轉換關係



(a) 冷熱媒轉換時間 20 分鐘

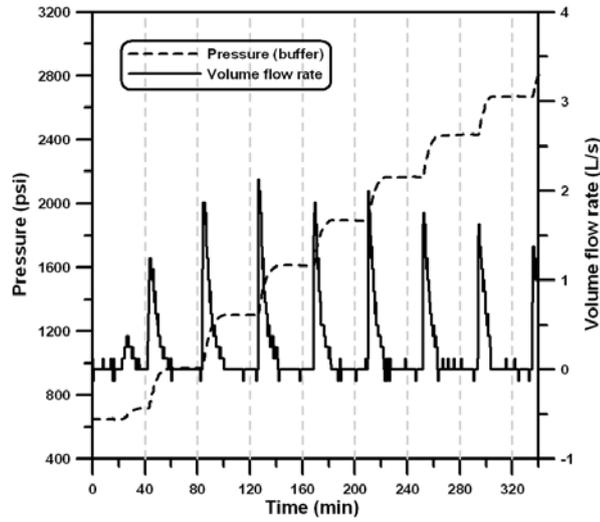


(b) 冷熱媒轉換時間 30 分鐘

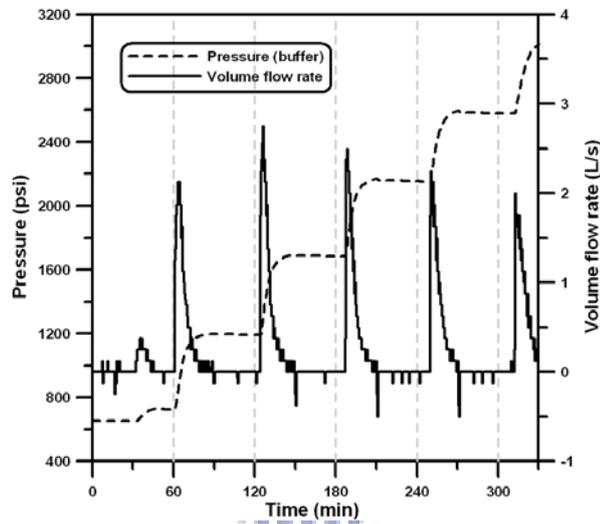


(c) 冷熱媒轉換時間 40 分鐘

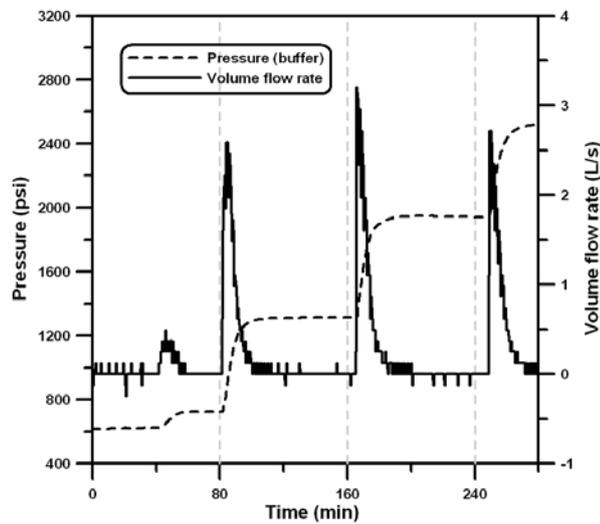
圖 5-6 第二級儲氫合金槽內壓力與暫存槽內壓力關係



(a) 冷熱媒轉換時間 20 分鐘

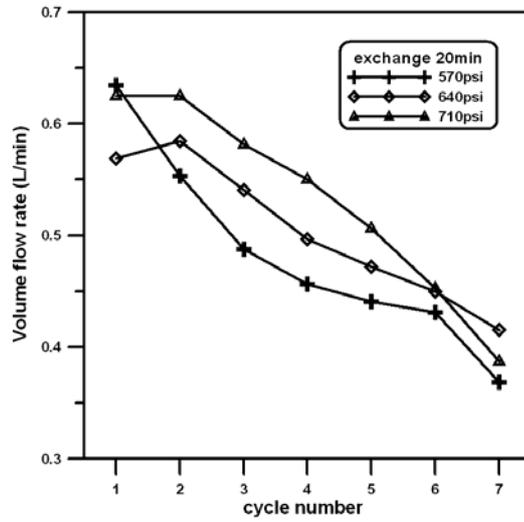


(b) 冷熱媒轉換時間 30 分鐘

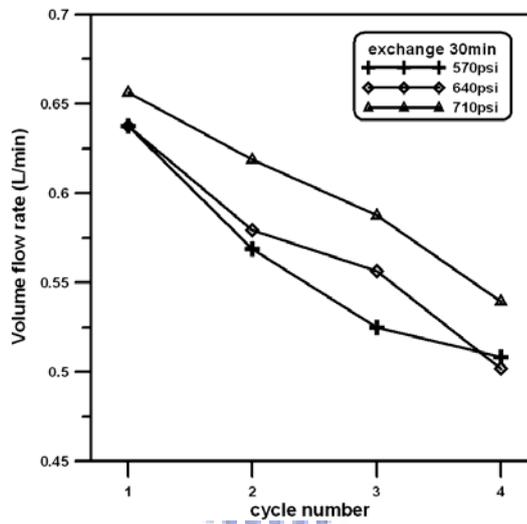


(c) 冷熱媒轉換時間 40 分鐘

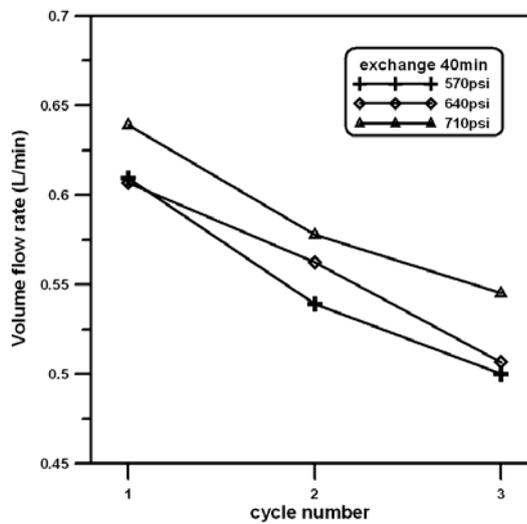
圖 5-7 暫存槽內壓力與所轉換之瞬時流量對應圖



(a) 冷熱媒轉換時間 20 分鐘

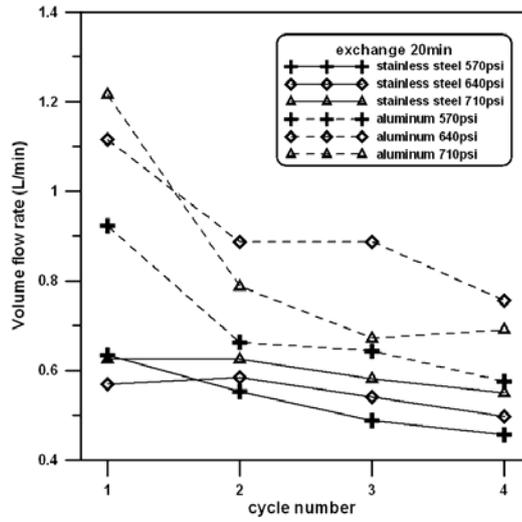


(b) 冷熱媒轉換時間 30 分鐘

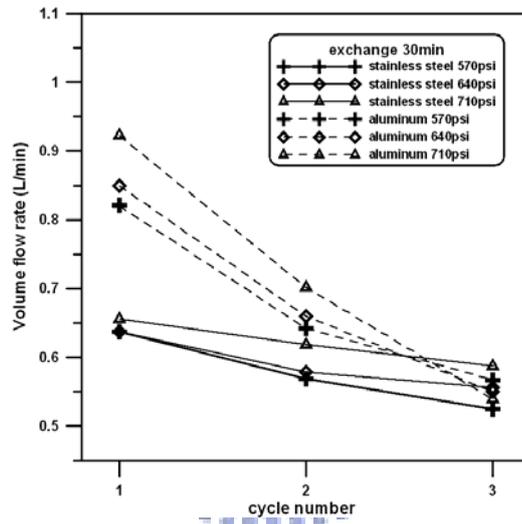


(c) 冷熱媒轉換時間 40 分鐘

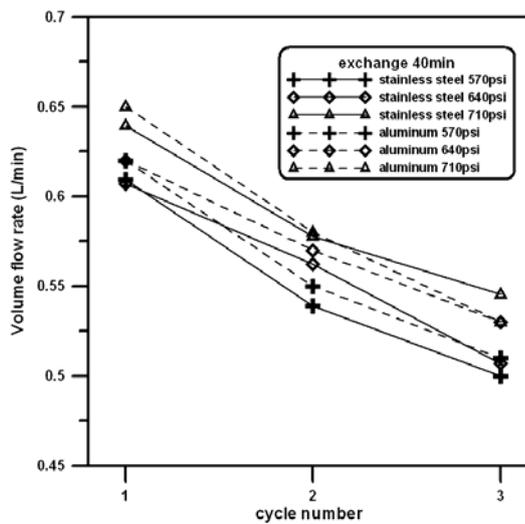
圖 5-8 暫存槽內平均體積流率對於循環次數對應圖



(a) 冷熱媒轉換時間 20 分鐘

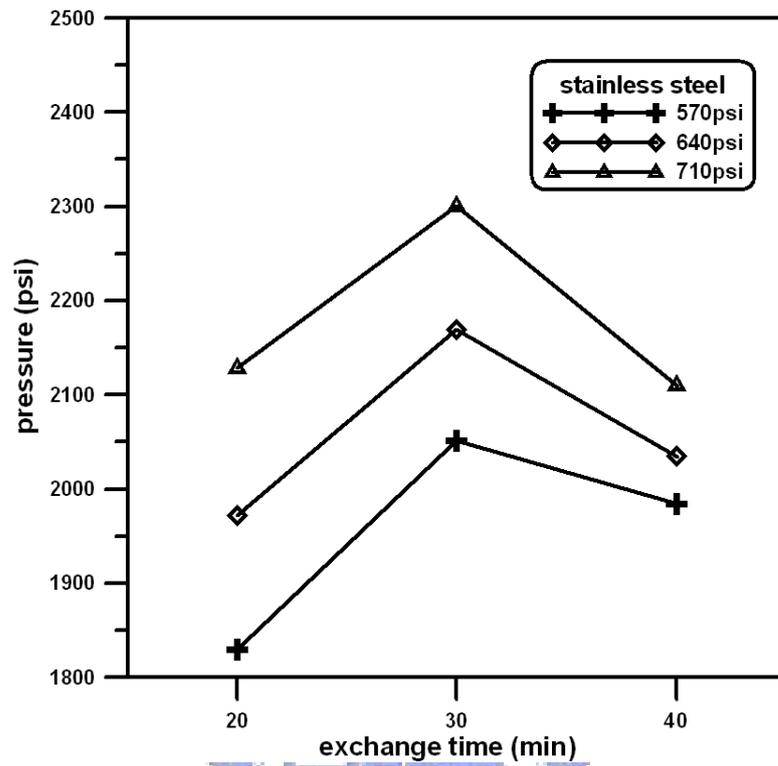


(b) 冷熱媒轉換時間 30 分鐘

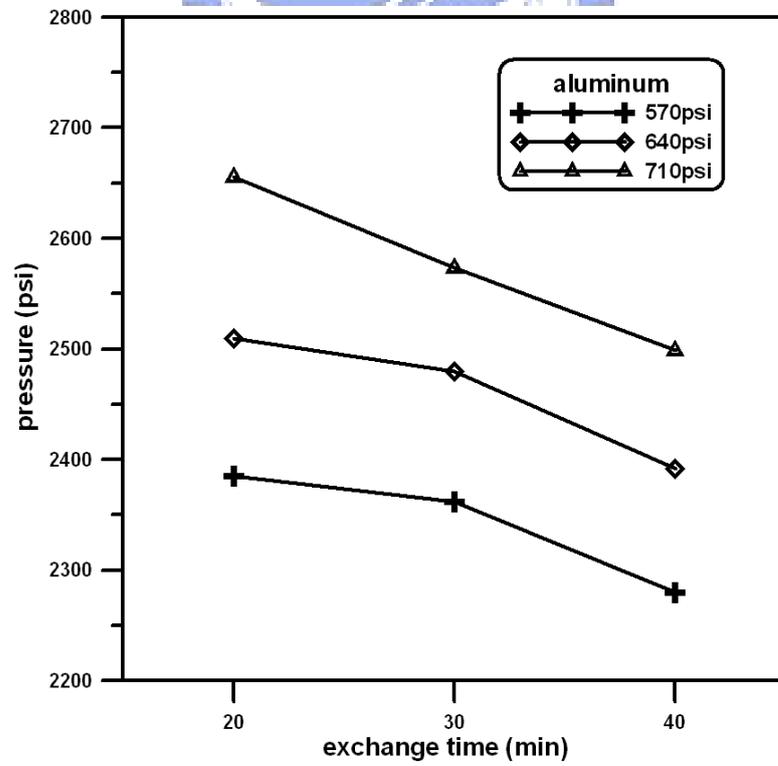


(c) 冷熱媒轉換時間 40 分鐘

圖 5-9 導入鋁製熱交換器暫存槽內平均體積流率對於循環次數之比較

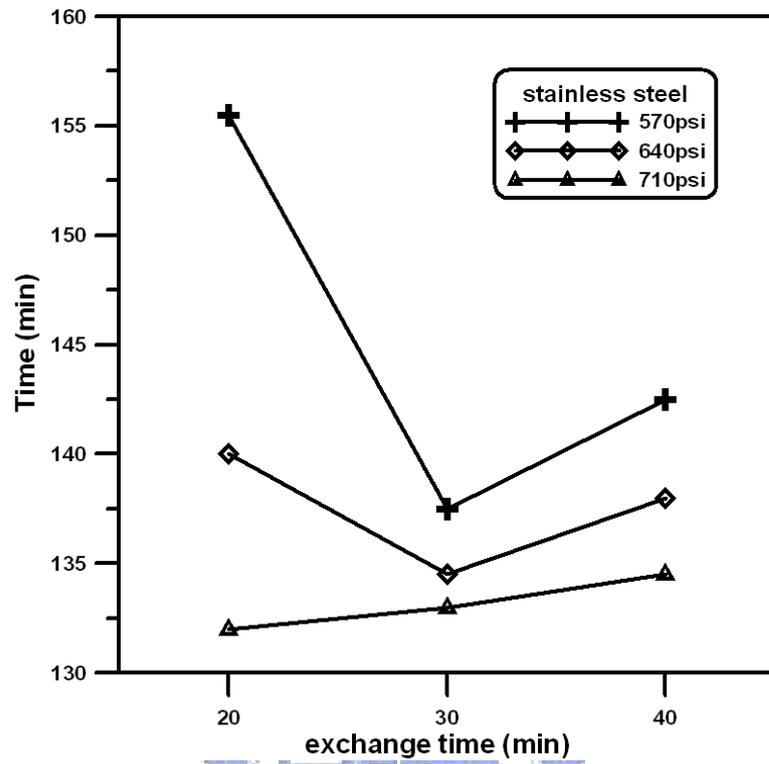


(a) 不鏽鋼熱交換器

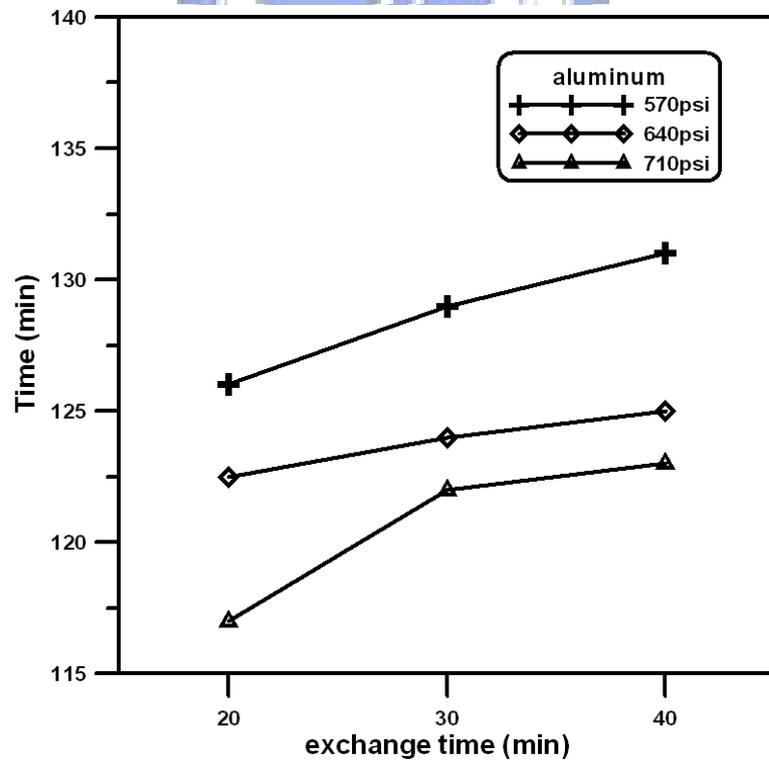


(b) 鋁製熱交換器

圖 5-10 90 分鐘所對應之壓力點

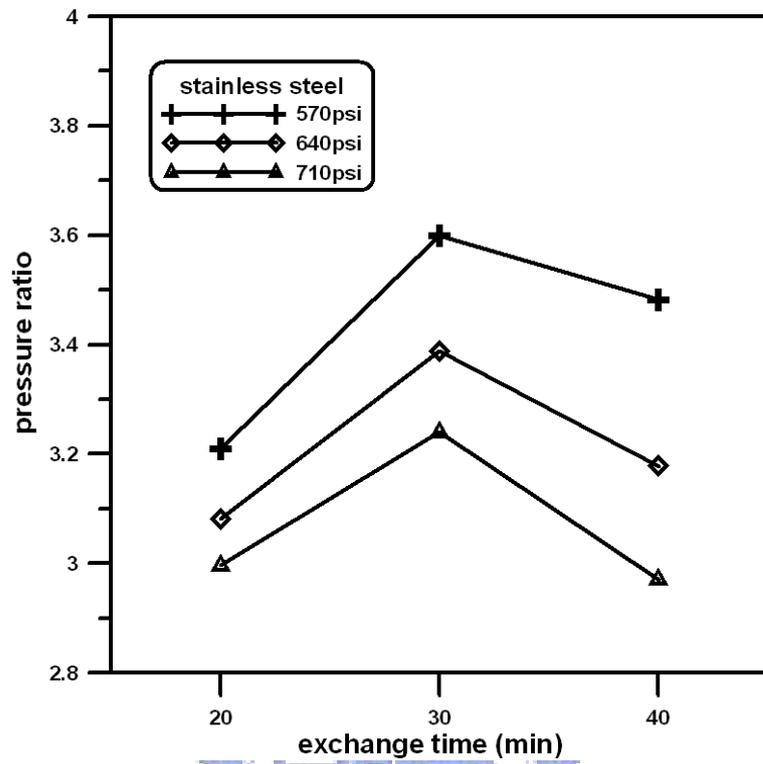


(a) 不鏽鋼熱交換器

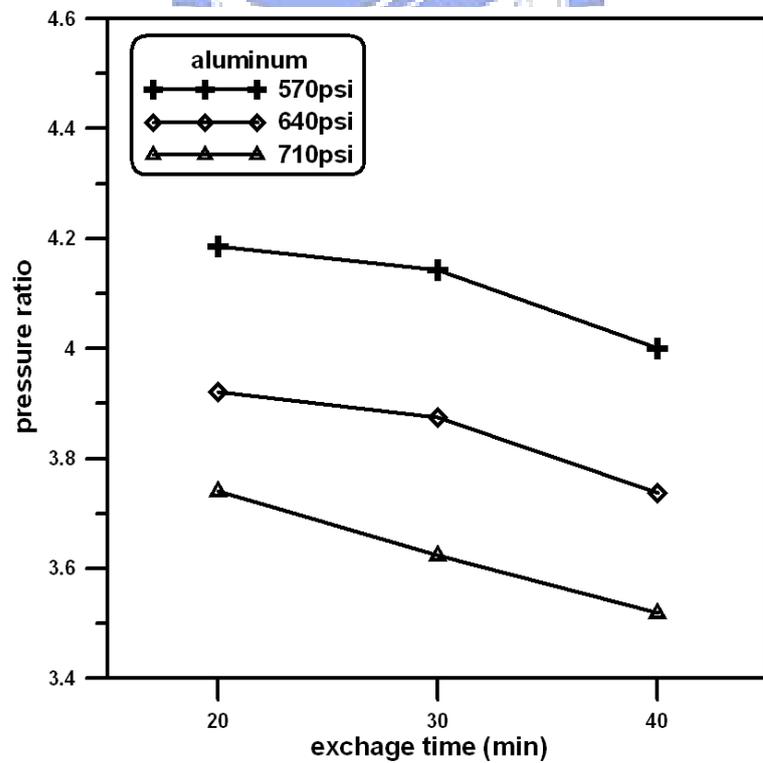


(b) 鋁製熱交換器

圖 5-11 壓力 2400psi 對應時間



(a) 不鏽鋼熱交換器



(b) 鋁製熱交換器

圖 5-12 90 分鐘所對應之壓縮比