

國 立 交 通 大 學

機 械 工 程 學 系

碩 士 論 文

電場/電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於  
環氧樹脂基材之研究及其在  
燃料電池雙極板之應用



Electric/Electromagnetic fields include alignment  
of nickel-coated carbon fiber in epoxy resin  
substrate and Applied to fuel cell bipolar plates

研 究 生：許富明

指 導 教 授：陳 仁 浩 教 授

中 華 民 國 九 十 九 年 六 月

電場/電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於環氧樹脂基材  
之研究及其在燃料電池雙極板之應用

Electric/Electromagnetic fields include alignment of  
nickel-coated carbon fiber in epoxy resin substrate and  
Applied to fuel cell bipolar plates

研究 生：許富明

Student : Fu-Ming Hsu

指導 教授：陳仁浩

Advisor : Ren-Haw Chen

國 立 交 通 大 學

機 械 工 程 學 系



Submitted to Department of Mechanical Engineering

College of Engineering

National Chiao Tung University

in partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Science

in

Mechanical Engineering

June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九年六月

# 電場/電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於環氧樹脂基材之研究 及其在燃料電池雙極板之應用

研究生：許富明

指導教授：陳仁浩 教授

國立交通大學機械工程學系碩士班

## 摘要

材料混摻纖維能改善原基底材料物理性質之不足，藉由成形過程中控制纖維配向以少量纖維達成其成品的異方向性性能需求。本研究利用具高導電性鍍鎳碳纖維與優異物理性質的環氧樹脂，成形具有異方向物理性質之矩形薄板。研究中設計製作了一個電場與電磁場產生裝置，在澆注成形之固化過程中進行電場與電磁場處理，以探討在不同外場處理下，對成形品鍍鎳碳纖維配向之影響。第一部分實驗主要是探討使用電場與電磁場處理對其纖維配向之影響，實驗過程中使用光學顯微鏡(OM)進行其纖維配向觀察，並以穿透導電性量測裝置作為其纖維配向佐證實驗。電場實驗結果顯示，使用電場誘發其纖維配向於環氧樹脂材料，在不產生電荷轉移與聚集的情況下，其纖維是不會滿足電泳特性完成聚集與配向，因此使用電場誘發其纖維配向於環氧樹脂控制處理，對於真實高導電性能需求產品之量產是較不適宜的。電磁場實驗結果顯示，在提供其系統磁通量密度(0.069Tesla)、試片厚度2mm、纖維含量0.5wt%、長度1mm與該樹脂黏度下，其纖維幾乎是完全垂直磁場方向整齊排列。在與沒有配向處理試片相比較，可量測到其試片穿透導電性(200MΩ以下)數目，由原本的18.75%提升至84.37%。在使用實驗參數為纖維含量0.4、0.6、0.8wt%、長度2mm下，其試片可量測到穿透導電性隨著其纖維含量提升而遞減，由100%、75%至72.9%，導電範圍由25、125遞增至250Ω。因此如果能適當的提升其系統磁通量密度，對於使用電磁場誘發纖維配向，在製造與開發具有異方

向性性能需求產品上的可行性是很高的。

由於尚未有對使用電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向控制於環氧樹脂，並將其應用在燃料電池雙極板製作之研究報告，第二部分實驗，主要是探討其纖維配向於環氧樹脂矩形薄板穿透方向，在燃料電池雙極板應用之可行性，並藉由銑床加工其複合材料與石墨板蛇形流場，再以單一電池發電性能進行比較。研究結果得知，其複合材料在美國能源局(DOE)對於燃料電池雙極板，熱性質，氣體滲透率與耐腐蝕性的要求都是通過標準的。在使用纖維含量 0.4wt%、長度 2mm 與磁通量密度(0.069Tesla)下，成形( $63 \times 54 \times 2$  mm)雙極板與石墨雙極板單一電池發電性能比較結果得知，其複合材料雙極板最高發電功率密度只有石墨板的 1%， $2.1\text{mW}$ 。主要是其複合材料雙極板的穿透阻抗遠大於石墨板所造成。由於本研究所始使用的複合材料其平面導電性是超過  $200\text{M}\Omega$ ，會讓此複合材料雙極板構成發電主要還是其雙極板穿透導電性所提供的導電通路。因此使用導電纖維配向於燃料電池雙極板穿透方向，對於燃料電池雙極板之應用具有一定的可行性。



# Electric/Electromagnetic fields include alignment of nickel-coated carbon fiber in epoxy resin substrate and Applied to fuel cell bipolar plates

Student : Fu-Ming Hsu

Advisor : Dr. Ren-Haw Chen

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

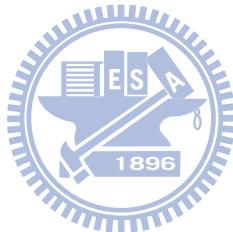
Physical properties are tunable by mixing fibers into the base material. Product anisotropy is achieved by controlling fiber alignment during the formation process. The researchers in this study manufactured a rectangular plate with anisotropic physical properties. The plate contained nickel-coated carbon fiber of high electrical conductivity and epoxy resin with a supreme physical property. An electrical and electromagnetic field generator was designed and fabricated to modulate electric and electromagnetic fields during solidification in the casting process. This study investigated fiber alignment of nickel-coated carbon products under the influence of different force fields. In the first section of experiments, the effects of electric and electromagnetic fields on fiber alignment were examined. This study utilized Optical microscopy (OM) to observe alignment of fibers, and penetrative conductivity measurement devices for fiber alignment verification were used. The researchers treated epoxy resin with an electric field to induce fiber alignment. Electric field experiments revealed that, the fibers did not satisfy electrophoresis properties and failed to aggregate and

The FBI Laboratory logo, which consists of a circular emblem. Inside the circle is a stylized representation of a scale of justice and a sword, with the letters "FBI" visible above them. The entire logo is rendered in blue and white.

align when no electrical transition and aggregation occurred. The procedure of using the electric field to induce fiber alignment in epoxy resin is not applicable for mass production of virtual products with high electrical conductivity. The results of electromagnetic field experiments demonstrated that nearly all fibers aligned perpendicular to the magnetic field under certain conditions: such as, system magnetic flux density 0.069 Tesla, specimen thickness 2 mm, fiber content 0.5 wt percentage, length 1 mm, and certain resin viscosity. Compared to specimens that did not undergo aligning treatment, the penetrative conductivity (under  $200M\Omega$ ) increased from 18.75% to 84.37%. The study used the experimental conditions fiber density 0.4, 0.6, and 0.8wtpercentage, length 2mm. The penetrative conductivity decreased while the fiber content increased. Fiber content ranged from 100%, 75%, and 72.9%with changed conductivity from 25, 125, and 250  $\Omega$ . The method of inducing fiber alignment with electromagnetic fields is applicable to the manufacture and development of products requiring anisotropic properties under certain levels of enhancement of system magnetic flux density.

Research reports on fiber alignment control of nickel-coated carbon and its application in manufacturing fuel cell bipolar plates are nonexistent. The second phase of the experiment focused on whether the procedure of fiber alignment along the penetration direction of the epoxy resin rectangular plate is applicable to fuel cell bipolar plates. The researchers milled the composite and graphite plates to create serpentine flow fields. These two materials were compared for single cell power generation performance. Results showed that the composite of interest qualified under the Department of Energy (DOE) requirements for thermal properties, gas permeability, and corrosion resistance for fuel cell bipolar plates. The maximum power density of the composite bipolar plate was 1% (2.1mW) of

the graphite counterpart under the conditions of fiber content 0.4 wt%, length 2 mm, magnetic flux density 0.069 Tesla, and plate dimensions of 63×54×2 mm. The maximum power density results were due to the greater penetrative resistance of the composite bipolar plate. The researchers utilized composite material with a planar conductivity of greater than  $200\text{M}\Omega$ ; therefore, the electricity generated was mainly due to the conductive current provided by the penetrative conductivity of the bipolar plate. The study concludes that the procedure of conductive fiber alignment along with penetrative direction of fuel cell bipolar plates may be used in fuel cell applications.



## 誌 謝

轉眼之間，就讀研究所的時光即將邁入尾聲，在這兩年間，接觸到了許多之前尚未曾接觸過的領域與知識。無論在學識的長進、研究的能力以及待人接物，都讓我體驗與學習甚豐，感謝在這段期間對我付出極多指導、陪伴和關懷的師長、實驗室的伙伴們與家人。

首先要感謝指導教授 陳仁浩教授在兩年來對指導的不吝付出，讓我從懵懵懂懂的研究所新生，逐漸地了解做研究的精神，同時在面對研究瓶頸與問題時，能夠給予許多的建議與方向，讓我的視野更遼闊，而這些指導，不僅促使我的研究與論文得以順利完成，更影響了我的人生觀、做事的態度與看事情的角度。此外，感謝成功大學陳朝光教授與臺南大學郭振坤助理教授等師長，於研究期間提供許多研究方向指引與寶貴的意見，節省了許多獨自摸索時間。虎尾科技大學謝淑惠副教授，對於四點探針量測設備提供與試片量測的建議；鼎佳能源股份有限公司，閻明宇經理，在燃料電池性能檢測及組裝上，提供相當多的建議。本校材料所，陳珮君同學，在材料熱性質檢測上的幫忙與協助。在此一併致上衷心的謝意。

並感謝實驗室的全體成員。國銓學長、彥緯與嘉展同學在這兩年來的一起努力，不管在修課上的陪伴、問題的討論與實驗內容的建議，都讓我滿懷感謝。致偉、學政、孟暉與志鴻等學弟們，感謝他們在事物與實驗上的幫忙，讓我更能專注於研究，他們的陪伴，使我的研究生活更為豐富，在此致上由衷的感謝。

家人的支持及付出是我能完成碩士學位的一大助力。因此，我要特別感謝父母含辛茹苦的教養之恩，因為有你們的愛，使我有勇氣面對一切困難與挑戰，你們的堅持與信心，讓我堅信只有努力，才能嘗到甜美的果實。最後要感謝，欣怡同學，在碩班期間和我的陪伴與鼓勵，讓我的生活多采多姿與充滿回憶。

# 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	III
誌謝 .....	VI
目錄 .....	VII
表目錄 .....	X
圖目錄 .....	XI
第一章 序論 .....	1
1.1 研究背景 .....	1
1.1.1 複合材料的發展與應用 .....	1
1.1.2 碳纖維及其複合材料的基本介紹 .....	3
碳纖維的發展及其性質 .....	3
表面處理對碳纖維複合材料性質的影響 .....	4
奈米微粒目前所面臨的問題及其分散方法 .....	4
物理分散 .....	4
化學分散 .....	5
1.1.3 環境污染與發癌性 .....	5
碳纖維在生體與環境的關係 .....	5
奈米微粒對生體與環境的影響 .....	6
1.2 研究動機與目的 .....	8
1.3 研究方法 .....	9
第二章 文獻探討與理論分析 .....	10
2.1 奈米碳管在電場與磁場之下誘發配向的發展 .....	10
2.2 燃料電池雙極板材料之探討 .....	12
2.3 電磁場中的物質特性 .....	12
2.3.1 電場中的物質特性 .....	12
2.4 磁場中的物質特性 .....	14
第三章 纖維配向控制實驗與雙極板性能量測 .....	21

3.1 實驗流程 .....	21
3.2 實驗材料 .....	22
3.3 實驗設備與量測儀器 .....	24
3.3.1 電磁場產生設備與電性量測儀器 .....	24
3.3.2 纖維配向佐證設備與儀器 .....	30
3.3.3 複合材料處理流程與穿透導電性量測原理 .....	32
3.3.4 雙極板材料功能性檢測 .....	33
3.3.5 單一電池發電性能量測 .....	38
第四章 電場/電磁場誘發纖維配向效果及其燃料電池雙極板的應用 .....	39
4.1 電磁場之磁通量密度與系統電流的關係 .....	39
4.2 電場對纖維配向的影響 .....	41
4.3 磁場對纖維配向的實驗 .....	49
4.3.1 磁場誘發纖維配向試片觀察結果 .....	49
4.3.2 電磁場誘發纖維配向穿透導電性量測結果 .....	63
4.4 雙極材料功能性檢測結果與討論 .....	68
4.4.1 平面導電性與熱性質分析 .....	68
4.4.2 氣體滲透率與腐蝕分析 .....	70
4.5 單一電池發電性能結果與討論 .....	73
第五章 結論與建議 .....	78
5.1 結論 .....	78
5.1.1 外場誘發纖維配向 .....	78
電場部分 .....	78
磁場部分 .....	79
5.1.2 纖維配向與雙極板導電機制 .....	80
5.1.3 雙極板材料功能性檢測與發電性能量測 .....	81
5.2 建議 .....	82
參考文獻 .....	83
附錄一 電磁場結構設計圖 .....	86
附錄二 電磁場產生裝置電路配線圖 .....	90

附錄三 磁場結構設計圖 .....	92
附錄四 CIE-3130B 多功能高精度電錶詳細規格 .....	96
附錄五 F.W. BELL 5070 高斯計詳細規格.....	98
附錄六 0.1~0.6wt%纖維長度 1mm+環氧樹脂穿透導電性量測結果 .....	100
附錄七 0.4、0.6、0.8wt%纖維長度 2mm+環氧樹脂穿透導電性量測結果 .....	103
附錄八 單一電池雙極板流場與端板設計圖 .....	105



## 表目錄

表 1.1 雙極板材料特性需求規範[12] .....	9
表 2.1 原子極化率，以 $10^{-24} \text{ mm}^3$ 為單位[26] .....	14
表 2.2 不同物質的相對導磁率[27] .....	15
表 3.1(a)環氧樹脂性狀表 .....	22
表 3.1(b)環氧樹脂物理強度表 .....	22
表 3.2(a)電磁場產生裝置製作之材料性質 .....	24
表 3.2(b)電磁場產生裝置製作之電路系統使用材料 .....	24
表 3.3 雙極板穿透導電性量測裝置使用之零件與儀器 .....	31
表 4.1 雙極板氣體滲透率測試參數 .....	72
表 4.2 雙極板流場設計參數與單一電池發電性能執行參數 .....	77

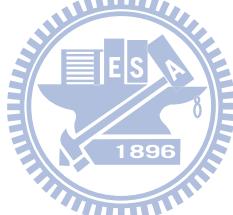


## 圖目錄

圖 2.1 (a) 非極性分子及其 (b) 極化情形[25] .....	13
圖 2.2 (a) 極性分子及其 (b) 極化情形[25] .....	13
圖 2.3 (a) 不加磁場時各原子之磁偶矩作散亂不規則的分佈[25] .....	16
圖 2.3 (b) 加磁場時各原子磁偶矩均順著磁場方向排列[25].....	16
圖 2.4 物質磁化後截面圖[25] .....	16
圖 2.5 磁化物質表面磁化電流之計算[25].....	17
圖 2.6 安培右手定則圖示[28] .....	19
圖 2.7 線圈電流所產生軸磁場的方向[28].....	19
圖 3.1 實驗流程圖 .....	21
圖 3.2(a) 編織型鍍鎳碳纖維 .....	23
圖 3.2(b) 編織型鍍鎳碳纖維 200x 光學顯微鏡，下光源觀測圖。 .....	23
圖 3.3(a) 電磁場產生裝置與電路系統 .....	25
圖 3.3(b) 電磁場產生裝置模具部分與外場作用區域 .....	25
圖 3.4 無外場作用模具組 .....	25
圖 3.5(a) 磁場產生裝置與電路系統 .....	26
圖 3.5(b) 磁場產生裝置模具部分與外場作用區域 .....	26
圖 3.6 直流高壓電源供應器 .....	27
圖 3.7 直流電源供應器 .....	27
圖 3.8 高斯計 .....	28
圖 3.9 精密天平 .....	28
圖 3.10 複合材料混合器 .....	29
圖 3.11 真空烘箱 .....	29
圖 3.12 光學顯微鏡 .....	30
圖 3.13 雙極板穿透導電性量測方法示意圖 .....	30
圖 3.14 雙極板穿透導電性量測材料實體圖 .....	31
圖 3.15 複合材料處理流程圖 .....	32
圖 3.16 雙極板穿透導電性量測流程 .....	32

圖 3.17 四點探針 .....	34
圖 3.18 热重分析儀 .....	34
圖 3.19 氣體滲透率檢測設備 .....	35
圖 3.20 水溶液位移量觀測方法 .....	35
圖 3.21 恆電位儀測試裝置示意圖[30] .....	37
圖 3.22 恆電位儀測試裝置實體圖 .....	37
圖 3.23 極化電位與對數電流密度關係呈直線示意圖[30] .....	38
圖 3.24 燃料電池性能測試機台 .....	38
圖 4.1 電磁場產生裝置系統電流與磁通量密度的關係(忽略邊緣效應).....	39
圖 4.2 磁場產生裝置系統電流與磁通量密度的關係(包含邊緣效應).....	39
圖 4.3 磁通量密度分佈趨勢圖 .....	40
圖 4.4 未經電場處理實驗結果 .....	42
圖 4.5 電場強度 100V/mm 誘發纖維配向處理實驗結果(未含絕緣層).....	45
圖 4.6 電場強度 100V/mm 誘發纖維配向處理實驗結果(含絕緣層).....	47
圖 4.7 電場強度 500V/mm 誘發纖維配向處理實驗結果(含絕緣層).....	48
圖 4.8 未經磁場處理不同纖維含量試片圖 .....	52
圖 4.9 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、含邊緣效應).....	54
圖 4.10 磁場誘發纖維配向處理試片圖(含冷卻系統、含邊緣效應).....	56
圖 4.11 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應).....	57
圖 4.12 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應).....	59
圖 4.13 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應).....	60
圖 4.14 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應).....	62
圖 4.15 穿透導電性量測試片實體圖(未經磁場處理、纖維長度 1mm).....	64
圖 4.16 穿透導電性量測試片實體圖(經磁場處理、纖維長度 1mm).....	64
圖 4.17 不同纖維含量穿透導電性可量測之試片數目分佈圖 .....	65
圖 4.18 0.5wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果 .....	65
圖 4.19 穿透導電性量測試片實體圖(經磁場處理、纖維長度 2mm).....	66
圖 4.20 0.4wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果 .....	66
圖 4.21 0.6wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果 .....	67

圖 4.22 0.8wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果 .....	67
圖 4.23 纖維配向後平面導電性量測結果.....	69
圖 4.24 纖維 0.4wt%+環氧樹脂熱重分析曲線 .....	69
圖 4.25 0.8wt%+環氧樹脂氣體滲透量 .....	71
圖 4.26 0.5wt%+環氧樹脂 恒電位儀量測之極化曲線 .....	72
圖 4.27 石墨材料雙極板發電性能量測結果極化曲線圖.....	74
圖 4.28 石墨材料雙極板發電性能量測結果 I-P 曲線圖.....	74
圖 4.29 複合材料雙極板發電性能量測結果極化曲線圖.....	75
圖 4.30 複合材料雙極板發電性能量測結果 I-P 曲線圖.....	75
圖 4.31 纖維含量 0.4wt%加工後雙極板之實體圖 .....	76
圖 4.32 石墨材料加工後雙極板之實體圖 .....	76
圖 4.33 單一電池組裝完成實體圖 .....	76
圖 4.34 單一電池整體接觸阻抗和固定螺絲扭力值之關係.....	77



# 第一章 序論

## 1.1 研究背景

### 1.1.1 複合材料的發展與應用

在複合材料中，最早發展與應用的是玻璃纖維樹脂基複合材料。20世紀40年代，美國首先用玻璃纖維和不飽和聚酯樹脂複合，以手糊技術製造軍用雷達和飛機油箱，為玻璃纖維複合材料在軍事工業中的應用開闢了道路。此後，隨著玻璃纖維、樹脂基體以及複合材料成形技術的發展，玻璃纖維複合材料不僅在航太工業，而且在各種民生工業中獲得廣泛的應用，近年來也成為民生工業更新換代的基礎材料。

但在進入60年代以後，人們注意到玻璃鋼的質量比較大，模量比較低，滿足不了航太產業等新產品對於材料的高比模量和高比強度的要求，因此在60~70年代相繼開發了質輕的碳纖維及其高比模量和高比強度的碳纖維複合材料。繼碳纖維之後，又開發出芳香族聚醯胺纖維(芳綸)等高性能纖維。

雖然複合材料最早應用於航太工業，且其發展也一直受到航太工業需求所驅動，但航太工業應用的複合材料量只佔其總產量的一小部份。複合材料用量較大的產業為交通運輸、建築、防腐蝕設備、電子與能源產業等。各式複合材料應用範圍：

**航太工業:**航太結構零組件採用複合材料的主要原因是減輕重量，提升其性能與經濟效益。碳纖維航太結構零組件應用技術已近成熟，目前大小型航空載具，都以複合材料為主要材料，例如空中巴士的波音B787在機身和主翼的結構性部件中有50%重量是碳纖維強化高分子(CFRP)。近年來日本三菱重工業對於飛機結構性部件，開發出了不使用加熱爐即可快速硬化的碳纖維強化高分子，且力爭於2015年前後使用於小型民航機[1]。

**交通運輸產品:**節能減碳是目前全球努力的方向，由於複合材料能大幅減輕汽車結構重量降低燃料消耗。以碳纖維材料製作汽車零組件，可減輕結構重量，不需作防腐蝕處理，因此可進一步降低成本，提高生產效率。

船舶產業：漁船、拖船、遊艇、賽艇和掃雷艇用複合材料已有較長的歷史。

由於複合材料質輕，能承受很大的外壓，對於複合材料潛水艇的開發，也正在蓬勃發展當中。

電子產品：隨著電子、電信和科學技術的發展，電子封裝材料必須滿足導熱、絕緣的要求，同時又需具備機械、耐化學腐蝕與符合環保的要求。金屬材料具有高的導電率，但不絕緣且化學耐腐蝕性能差[2]，高分子材料絕緣性能與耐化學腐蝕性都很好，但導熱性質差。但如果能夠運用碳纖維其優良的導熱與耐腐蝕性性質，混合高分子製造成形，也許將有機會改善現在電子產品所面臨的散熱與製造成本的問題，且可以有效的降低其產品的重量。

建築業：建築業複合材料除了作為各種輕型結構房屋、冷卻水塔和儲水槽等。近年來朝向混凝土增強和橋樑等方面的應用發展。由於複合材料可以提高建築物結構的抗震性和抗磁性，因此使用複合材料混凝土增強筋代替鋼筋製造新型混凝土，具有誘人的前景。

能源產業:近年來綠色能源蓬勃發展，再生能源的開發與應用將是全球發展的趨勢。風力發電機擷取風能轉換為電能，理論效率可超過 57%，風機的關鍵乃在風力葉片外形的設計，並配合堅固耐用的塔架，因此以複合材料最適合。透過碳纖維複合材料的應用，可降低葉片的啟動風速，提升發電效率。另外，目前燃料電池面臨普及化、輕薄微小化的問題，而燃料電池雙極板所佔其系統的體積與重量也是最為龐大，最重要的是需具備高導電性與機械強度。由於碳纖維具有良好的導電性與導熱性，近年來碳/碳高分子複合材料質子交換膜燃料電池(PEMFC)也有蓬勃發展的趨勢，降低其製造成本與耐腐蝕性材料的選用，也是目前所必需面對與克服的問題[3]。

## 1.1.2 碳纖維及其複合材料的基本介紹

### 碳纖維的發展及其性質

碳纖維已成為民生工業必備材料之一。一般把碳纖維的原點置於愛迪生的白熱電燈碳絲，但若以纖形碳為原點，應是英國人約瑟夫·史旺。史旺在 1860 年把細長紐帶狀紙片碳紙化，取代燈絲。1878~1879 年間，把棉紗浸入硫酸(parchment 處理)後碳化，遺憾的是未達實用化。在 1879 年愛迪生為了尋找一種耐高溫且可通電之燈絲，利用竹子纖維燒成碳纖維模樣做為燈絲之用，但所製的碳纖維太脆，毫無強度可言，雖可當通電發光用，但離真正實用化尚有一段距離。在鎢絲被開發成功之後，以鎢絲作為燈絲用途並將碳纖維取而代之。

50 年代東西兩大集團之首—美國、蘇俄為了太空競賽，需要一種質輕且機械強度高的材料，碳纖維因運而生且成功地被製成補強材料。在 1959 年 Union Carbide 公司以嫘縈纖維成功地燒成具高強度的碳纖維。隨後大阪研究所進藤教授利用聚丙烯晴(polyacrylonitrile,PAN)燒成碳纖維，1965 年日本大谷杉郎發明瀝青系碳纖維。此後碳纖維發展即以嫘縈、聚丙烯晴及瀝青等為發展碳纖維的三大母材。由於碳纖維在母材、製程與碳化條件的不同，其機械強度及其物化性也有很大的不同。目前全世界碳纖維約 85%來自聚丙烯晴系，而 15%來自於瀝青系及嫘縈系，高強度母材主要來自聚丙烯晴系，高模數碳纖維則以瀝青系為主。

金屬在各方向切出標準測試試片時，測定其抗拉強度，任一試片測定值都差不多，是等方向性材料，對於材料的使用也不必介意其方向性。但對於纖維強化高分子而言，等異方向性的問題可能就是其必須面對與改善的問題。由於碳纖維具有優異的機械、導電與耐腐蝕性，若把工程塑膠視為加工性良好而具有耐腐蝕的輕金屬代用品，具有導電性碳纖維將是最具資格的填充劑。由於短纖維強化高分子軟化溫度比金屬低且流動性好，容易成形。遠比金屬鑄造品可得形狀複雜且精巧，一次可射出成形多個零件，可見短纖維強化高分子將漸取代金屬。碳纖維比起玻璃纖維強化高分子，彈性率約 2 倍，潛變、疲勞優良，又具導電性，所以碳纖維強化高分子將更接近金屬。

短纖維強化高分子最大的優點，就是能夠利用最經濟的射出成形完成產品的製作。但其最大的缺點就是無法控制其纖維的配向，但如果能夠根據產品的需求，在製程中控制纖維的配向，將有效的降低其製造成本與性能的提升。

### 表面處理對碳纖維複合材料性質的影響

複合材料是由兩種或兩種以上的材料組合而成，所以必存在著不同材料共有的接觸與界面問題。但由於材料的多樣性及介面的複雜化，至今尚無一個普遍性的理論可以說明複合材料之間的界面行為，對於複合材料而言，材料之間的相互浸潤是首要的條件，其次界面之間的黏結強度[4]。

碳纖維在高溫處理下，所組成的石墨結晶，沿著纖維軸向有相當好的軸向排列。石墨在結晶方向有相當高的導電性，且因化合物的介入有明顯的增強其導電性，導致近年來有關碳纖維電、磁性與插入化合物等研究掀起了一股熱潮[5]。

近年來碳纖維強化高分子廣泛的運用，特別是在環氧樹脂複合材料上，由於增加碳纖維表面的極性與活性，有助於與基底材料的化學鍵與氫鍵的連接，改善材料之間的黏結性[6][7]。氧化法，一般使用不同的電漿，對非極性碳纖維表面注入氧化物改質，增加碳纖維表面的極性與親水性。濕式化學法，將碳纖維浸入磷酸或煮沸的硝酸等物質，使碳纖維表面形成有助於黏結的極性基[8]。

### 奈米微粒目前所面臨的問題及其分散方法

奈米微粒具有優異的比表面積與特殊的奈米效應，導致近年來奈米複合材料蓬勃發展，人們也對奈米複合材料的發展與應用方面的研究投入大量的金錢和精神。由於奈米微粒優異的比表面積，在粒子表面之間的化學鍵與氫鍵作用，易導致粒子之間的相互吸附而發生團聚。使奈米分散技術成為近年來發展起來的新興邊緣學科也是奈米複合材料目前最需解決的問題。目前，奈米粒子的分散方法可分為物理分散和化學分散[9]。

#### 物理分散

物理分散的方法主要有機械分散法、超聲波分散法和高能處理法。

**機械分散法：**主要是藉由外界剪切力和撞擊力等機械能，使奈米微粒在介

質中充分分散。在施加機械能的過程中，引起體系內物質的物理、化學性質變化和一系列的化學反應來達到分散目的。由於是靠機械能強制的分散，團聚微粒儘管在強制剪切力下分散，但微粒間的吸引力依然存在，所以在分散後可能還會有迅速團聚的現象。

**超聲波分散法**：超聲波分散是將要處理的微粒懸浮體直接置於超聲場中，用適當的頻率和功率的超聲波加以處理，其作用機制可能與空化作用有關。超聲波對於化合物的合成、聚合物的降解與微粒粒子的分散具有很好的作用。但在處理的過程中，隨著處理時間的增長，微粒間的摩擦增加，溫度提升微粒間碰撞機率增加，反而會加劇團聚，因此處理的時間將是一個重要的考量。

**高能處理法**：高能處理法是透過高能粒子的作用，使奈米微粒增加活性與其他物質發生化學反應或附著，對奈米微粒表面改質而達到容易分散的效果。

## 化學分散

化學分散是利用表面化學方法，加入表面處理劑達到分散為目的。利用奈米微粒表面與處理劑之間的化學反應或化學吸附，改變奈米微粒的表面結構、狀態與電荷分布，使其表面改質。透過產生雙電層靜電穩定作用和空間位阻穩定作用達到分散效果。

奈米微粒在介質中的分散與團聚是動態平衡過程。儘管物理方法可實現較好的奈米微粒分散，但一旦外界作用力停止，粒子間由於分子間力作用，又會相互聚集。而採用化學分散，通過改變微粒表面性質，使微粒與液相介質、微粒與微粒間相互作用發生改變，增強微粒間的排斥力，將產生持久抑制絮凝團聚的作用。因此，在實際的過程中，應將物理分散和化學分散相結合，用物理手段解團聚，用化學方法保持分散穩定，以達到較好的分散效果。

### 1.1.3 環境污染與發癌性

#### 碳纖維在生體與環境的關係

碳纖維與生體的關係可由兩方面檢討，其一是用維生體用的人工臟器，另一是碳纖維的粉塵有無發癌性[10]。

人工臟器用碳不只是碳纖維，始自 1968 年以來的人工心臟瓣，研究直接用碳纖維為人工韌帶，碳易順應生體，證實為無害的材料。美日兩國在過去研究碳纖維粉塵的發癌性，石棉直徑  $5\mu\text{m}$  以下時經呼吸進入肺的量增多。碳纖維直徑約  $10\mu\text{m}$ ，幾乎不被吸收。刻意把聚丙烯腈系 HPCF(高性能碳纖維)細粉碎用注射器反覆注入老鼠的氣管或肺，與石棉比較，結果石棉有惡性腫瘍，碳纖維則全無。將瀝青系的 GPCF(泛用型碳纖維)細粉碎，從老鼠的腹腔內、經口、靜脈、皮下似途徑投與，觀察一個月內有無移行到肺內，進行各種病理組織學的檢索，並無有意的影響。

環境汙染的另一問題是碳纖維複合材料的廢棄物處置法，一般認為碳纖維易燃，其實很難燃，特別是碳纖維樹脂複合材料，樹脂容易燃燒，殘留碳纖維，因此，飛機意外墜毀或疏忽而在廢棄物處理場燃燒爐燃燒大量複合材料時，會有短纖維四散空中，這些碳纖維在生物學上不造成大問題，卻可能在其他方面發生問題，造成電器系統設施的絕緣不良。相對於碳纖維難燃的金屬、水泥的複合材料、碳纖維複合材料其絕緣性能是較為安心的。

### 奈米微粒對生體與環境的影響

近年來，奈米材料研究成為當今科學研究的一個熱點。當各國都看到奈米背後龐大的商機，進而投入研發搶佔這塊市場的大餅之際，「奈米對環境的傷害」的問題卻漸漸浮上檯面。隨著各知名雜誌對奈米的負面報導，人工奈米的罩門隱然浮現。自從 1991 年美國正式將奈米技術列入國家 22 項關鍵技術和二零零五年戰略技術開始，1997 年美國國防部將奈米技術納入戰略研究領域，1996 至 1998 年間，由美國國家科學、基金會主導，在美、法、德、比利時、荷蘭、瑞典、瑞士、英國、俄羅斯、日本和中國、台灣等地進行了三年的奈米技術發展情況調查研究[11]。

### 各國看準奈米商機

根據研究調查結果，美國總統科學顧問委員會認為：奈米技術是自二戰以來美國將要經歷的第一場不具備絕對領先優勢的具有重要經濟意義的科技革命，2008 年 2 月，白宮正式發布了「國家奈米技術計畫」（National Nanotechnology Initiative），提出了美國政府發展奈米科技的戰略目標和

具體戰略部署。

在上世紀末年代，電子器件的微型化發展，給全世界帶來了超乎想像的變化。微型機械，其尺度之微小，不僅遠超微電子器件，更是遠遠超出我們人類肉眼所能觀察到的任何事物大小。最近，日本政府負責制定科技政策的綜合科學技術協會召開「推進重點領域戰略專家調查會」，確定奈米技術發展的重點領域更偏重於應用，應用奈米技術製程的資訊通訊元件、對體內病灶進行診斷和治療的微小系統。如果奈米科技這樣發展下去，各式各樣的超級微型的機械設備、電子設備將會充斥著社會的每一個角落，到時候它們將會無拘無束的穿梭於我們人類的宏觀世界。

### 奈米污染 未解的黑盒子

目前，包括日本政府在內，許多國家的政府和企業界都擔心在奈米技術領域會重蹈前些年在生命科學、生物技術、資訊技術等高科技領域的覆轍，因為不夠重視而喪失最初的技術優勢，輸給了美國。因此，各國今後都會持續增加對奈米的各種資源投入。

如果奈米技術真的這樣發展下去，恐怕人類的生存狀態將發生一個空前的大變化，人類現存的許多意識、觀念也必然會隨著顛覆。事實上，近代科學所帶來的現代科技，一直都沒有進入另外的空間，雖然經常會認識到一些另外空間粒子的特性，但事實上一直都沒能掌控與利用。分不清楚到底是另外空間的物質在起作用，還是空間的物質在起作用。

人體各種功能細胞尺寸大都在微米級，比奈米微粒的尺寸大得多，奈米尺度顆粒或奈米纖維很容易進入細胞。已經證實直徑一百奈米的顆粒能夠在六十秒內成功穿透肺部防線，並在一小時之內出現在肝臟和其他內臟器官裏。奈米顆粒、奈米大小的塵埃就像看不見的子彈，能夠輕易的穿透人體防線進入血液，直達各個內臟器官和組織。

2007 年，英國政府委託英國皇家學會和英國皇家工程學院組成調查小組，調查奈米技術的安全性。2004 年 7 月 29 日美國的《科學時刻》及 2004 年 8 月 4 日《自然雜誌》分別介紹了該研究小組的報告，對奈米污染發出預警。報告指出，「游離的奈米顆粒與奈米管可能穿透細胞，產生毒性」；對於環境來說，「奈米科技可能是把雙刃劍」。2009 年 3 月份，《科學美國人》

雜誌（Scientific American）報導：美國科學家研究發現，化妝品的奈米物質不僅對人體有害，對生態也有嚴重的破壞作用。所以為了開發奈米技術滿足人們對於微小化產品的渴望與需求，將會破費大筆的資金與大量的人員去研究和預防「奈米污染」，這也是無法避免的。

## 1.2 研究動機與目的

由於碳纖維具有高比強度、高比模量、耐高溫、耐腐蝕、耐疲勞、導電、導熱和熱膨脹係數小等一系列優異性能，所以近年來世界各國都把碳纖維作為發展航空、軍事尖端技術不可少的材料，也視為民生工業更新換代的基礎材料。不論在力學、導電與導熱等方面的應用，碳纖維強化高分子都扮演著舉足輕重的角色。雖然目前長纖維強化高分子產品其性能較優於短纖維強化高分子，但如果根據產品的需求與加工性的考量，短纖維強化高分子是更適用於製造壁薄和形狀複雜的產品。

奈米複合材料其優異的奈米效應，在近年來各界對於奈米複合材料有蓬勃發展的趨勢，雖然奈米碳管分散於高分子材料與配向的控制一直都有在發展，但都是屬於化學分散的處理，對於物理分散的處理目前還是一大挑戰，且不易量產。對於使用外場誘發奈米碳管配向於高分子材料的發展也有一段時間了，但都還是處於實驗階段。對於實際產品在成形的過程中，還會受到很多外在因素如壓力、溫度與剪切力等因素的影響，還是會造成奈米碳管迅速團聚或晶粒成長，喪失奈米效應。對其產品的性能不但沒有提升，反而有浪費成本的可能性。對於加工與製造端而言其環境的污染與生體的危害將需更加謹慎的考量。

由於碳纖維複合材料應用廣泛，近年來在各行各業都有蓬勃發展的趨勢。在能源產業中，質子交換膜燃料電池複合材料雙極板的發展中，也面臨了製造成本、性能需求的問題，從過去的文獻得知，如果要達到美國能源部對於質子交換膜燃料電池雙極板在平面導電性（in-plane electrical conductivity）需求，高於  $100 \text{ S cm}^{-1}$  [12]，其碳纖維需要很高的含量，才能達到其導電性的要求，主要是碳纖維配向的問題，影響其導電性能。

然而，至今尚未發現有任何文獻對碳纖維配向控制強化高分子進行探討，本研究將嘗試採用鍍鎳碳纖維、環氧樹脂複合材料，澆注成形質子交

換膜燃料電池雙極板，並且在成形的過程中，使用電場、電磁場等外場力誘發鍍鎳碳纖維配向，希望能有效的提升質子交換膜燃料電池雙極板的穿透導電性，並達到使用少量的鍍鎳碳纖維就能得到質子交換膜燃料電池雙極板的穿透導電性能需求，以有效地降低雙極板的製造成本。

### 1.3 研究方法

本研究將採用鍍鎳碳纖維、環氧樹脂複合材料，在澆注成形過程中使用電場和電磁場等外場力，誘發鍍鎳碳纖維的配向，讓原本混亂排列的鍍鎳碳纖維能夠沿著雙極板的外場方向整齊排列，其目的是要充分利用鍍鎳碳纖維優異的物理性質，並以鍍鎳碳纖維優異的導電性為考量，使其沿著垂直外場方向整齊排列，將有助於燃料電池雙極板穿透導電性有效地升。在成品完成後進行雙極板穿透導電性量測、光學顯微鏡（Optical Microscope）觀測等實驗作為鍍鎳碳纖維的配向分佈情形的佐證。

最後將在根據美國能源局（Department of Energy, DOE）和美國燃料電池公司 plug power 對於現在雙極板的材料特性需求如表 1.1[12]，進行一系列的測試，來判定完成品是否符合目前規範中所要求的樣品規範。並將完

成品與純石墨雙極板進行工作性能測試比較與探討。

表 1.1 雙極板材料特性需求規範[12]

In-plane electrical conductivity ( $Scm^{-1}$ )	> 100 <sup>a</sup>
Thermal conductivity ( $W(mK)^{-1}$ )	> 20 <sup>a</sup>
Gas permeability ( $m^3m^{-2}s^{-1}$ )	< 2 × 10 <sup>-8a</sup>
Flexural strength ( MPa )	> 59 <sup>b</sup>
Tensile strength ( MPa )	> 41 <sup>b</sup>
Corrosion resistance ( pH < 4 ) ( $\mu Am^{-2}$ )	< 16 × 10 <sup>-4a</sup>

<sup>a</sup> DOE targets.

<sup>b</sup> Plug Power targets.

## 第二章 文獻探討與理論分析

### 2.1 奈米碳管在電場與磁場之下誘發配向的發展

奈米碳管複合材料其優異的性質，在材料科學領域已佔有了一席之地。隨著科學的進步，人們對於奈米碳管複合材料的發展與應用也抱著很大的期許與願景。但如何把奈米碳管均勻分散於基底材料與配向的控制，是目前所必須解決的問題[13]，對於其問題的解決也是決定其產品的功能性與製造成本的重要指標。雖然有關奈米碳管配向控制的發展已經有一段時間了，且方法也很多，但如果以產品商品化為目的，外場誘發奈米碳管配向可能是最接近實際產品開發端者。

R. Schueler 等人使用碳黑分散於環氧樹脂，並根據膠體理論進行碳黑分散性的探討，對於碳黑的分散性，主要是由短程作用力凡得瓦爾 (London van der Waals) 吸引和長程作用力庫倫 (coulombic) 排斥力，兩者之間競爭合力所決定。實驗證明了，增加離子濃度 (ionic concentration) 可避免碳黑的團聚現象發生，且效果相對於用剪切力分散處理而言是較好的[14]。T. Prasse 等人使用直流電場，誘發碳黑在環氧樹脂中產生團聚排列作用，結果，碳黑有朝向電場陽極側團聚排列的現象[15]。M.K. Schwarz 等人使用交流電場和直流電場，誘發碳黑團聚排列於環氧樹脂中，在相同的電場強度下進行處理比較，交流電場的誘發團聚排列現象效果相對於直流電場處理的明顯且處理效率較高[16]。

C.A.Martin 等人使用交流電場和直流電場，誘發多層管壁奈米碳管 (multi-wall carbon nanotube,MWNT) 配向於雙酚 A 環氧樹脂中，在相同的電場強度處理比較結果得知，直流電場的多層管壁奈米碳管有聚集於陽極側的現象，滿足了電泳特性。交流電場處理的則平均配向於兩電極之間，滿足了極化的特性。對於直流電場處理的結果進行解釋，多層管壁奈米碳管的性質跟碳黑一樣，在結構表面帶有負電荷，造成在直流電場處理下，會有朝向陽極側電極聚集的現象，在靠近兩電極側出現氣泡的斑點[17]。C. Park 等人使用單層管壁奈米碳管 (single-wall carbon nanotubes,SWNTs) 加入光聚合單體，使用不同的交流電場強度與頻率，進行單層管壁奈米碳管

配向的研究，研究指出當電場太強時會導致焦耳熱的增加，對單層管壁奈米碳管的配向排列產生局部中斷的現象，電場頻率太低將造成配向不易，傾向於直流電場處理下的狀態[18]。

D. Shi 等人將磁性材料，氧化鎳（NiO）和氧化鈷（CoO）塗佈於單層管壁奈米碳管（Single-wall carbon nanotubes,SWNTs），使用磁場誘發配向於聚苯乙烯（polystyrene）材料中，並在磁場 3T（Tesla）強度下，完成了單層奈米碳管的配向[19]。E. Camponeschi 等人使用磁場配向奈米碳管於兩種不同環氧樹脂，經過熱分析和奈米碳管的配向觀察得知，磁場的處理不僅可以增加奈米碳管的配向，而且可以增加其複合材料的玻璃轉換溫度（ $T_g$ ），對於為何影響玻璃轉換溫度進行機制的推測，在不同磁強度磁場作用下，聚合物分子鏈將從糾纏（entangled）態，被拉伸至配向態，在聚集成摺疊鏈態。適當的磁場強度將有助於聚合物分子鏈的配向和形成結晶區，提升該複合材料的玻璃轉換溫度。在高強度磁場處理下，將可能使聚合物分子鏈斷裂，鏈平均長度下降，玻璃轉換溫度下降。聚集態的摺疊鏈將可能有產生局部應力的情況發生，造成玻璃轉換溫度下降[20]。B. W. Steinert 等人使用磁場誘發單層管壁奈米碳管，配向於聚酯膠（polyethylene terephthalate,PET）中，並對於使用磁場做配向控制的優點進一步說明，由於奈米碳管的凡得瓦力會造成奈米碳管彼此之間產生吸引，使用磁場產生的塞曼能量（Zeeman energy levels）將會和凡得瓦力相平衡，促進奈米碳管的分離，減少團聚現象[21]。

由以上關於碳黑、奈米碳管的分散與配向控制的相關文獻分析結果得知，不管是使用電場或磁場誘發配向控制。首先必須解決的是分散與基底材料的黏度的問題，如何增加奈米碳管的自由電子與導磁性，對於電場與磁場控制配向而言也是一個重要的考量。對於電場與磁場誘發奈米碳管配向，其所延生出來的問題與效應也是目前所必須解決的，才能跟真實產品量產需求拉近距離。

## 2.2 燃料電池雙極板材料之探討

E. A. Cho 等人發現在質子交換膜燃料電池雙極板的穿透導電率 (through-plane electrical conductivity) 量測，其重要性高於平面導電率 (in-plane electrical conductivity)，且在高電流作用時，將會明顯的影響質子交換膜燃料電池的作用性能[22]。D. P. Davis 等人，使用了 316 (18%Cr, 12%Ni)、310 (25%Cr, 20%Ni) 與 904L (20%Cr, 25Ni) 等三種不同不鏽鋼材料，製造 SPFC (solid polymer fuel cells) 雙極板，在經過 3000 小時的性能測試後，只有 904L 不鏽鋼材料的性能最接近純石墨雙極板材料，其餘的不鏽鋼雙極板材料，其表面層都出現了金屬氧化膜，增加了接觸電阻，降低了燃料電池的作用性能。在材料成分分析結果得知，增加鉻和鎳的含量將有效地提升質子交換膜燃料電池雙極板在陰極側偏酸性環境的抗腐蝕性[23]。L. Du 等人使用環氧樹脂石墨粉複合材料，製造質子交換膜燃料電池雙極板，並將其複合材料放入 pH 值 1 和 2 之間的硫酸溶劑長時間煮沸，經過實驗證實該複合材料是穩定的，並沒有受到腐蝕的現象[24]。

根據以上的文獻得知，本研究對於製作質子交換膜燃料電池雙極板材料的選用，是適用於偏酸性環境且不易造成腐蝕性和出現金屬氧化膜的問題。

## 2.3 電磁場中的物質特性

### 2.3.1 電場中的物質特性

#### 直流電場介質之極化

自然界中的物質，由於原子與分子結合方式的不同，以至於有些物質中，電荷（通常是負電荷，即電子）可以在自由的在物質中游動，此類物質稱為導體 (conductor)，導體可以自由游動的電荷稱為自由電荷 (free charge)。在某些物質中，正、負電荷互相牽制的力量太大，均不能任意移動，此類物質稱為絕緣體或介電質 (dielectric)，介電質中沒有自由電荷（偶爾有的話，其數量也太少），只有束縛電荷 (bound charge)，一正一負成對的被束縛在構成物質之分子中，如圖 2.1 (a) 非極性分子或圖 2.2 (a) 極性分子所示。

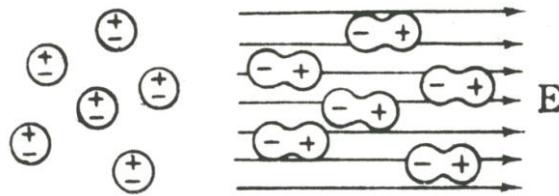


圖 2.1 (a) 非極性分子及其 (b) 極化情形[25]

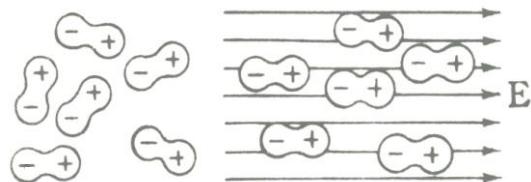


圖 2.2 (a) 極性分子及其 (b) 極化情形[25]

圖 2.1 (a) 所示，稱為非極性分子 (nonpolar molecule)，其正、負電荷之間的距離等於零。一般而言，形狀、構造具有對稱性的分子，如  $H_2$ 、 $N_2$ 、 $O_2$  等，均屬此類。圖 2.2 (a) 所示，稱為極性分子 (polar molecular)，其正、負電荷間的距離並不等於零，而構成一個電偶極。一般構造不對稱的分子，如  $N_2O$ 、 $H_2O$  等，均屬此類。

通常，在無電場的作用，物質中的分子（不論極性或非極性的）均呈散亂狀態分佈，各分子的電性互相低消，使得物質呈中性。但當該物質置於電場中時，許多分子都會受到電場的作用，圖 2-1 (b) 中，非極性分子的正、負電荷即分別都會受到電場的作用，而被沿電場方向拉長，圖 2-2(b) 中，可以看到分子受到靜電力的作用，而轉到與電場平行的方向。其結果，不管是非極性分子，極性分子也好，在電場的作用之下，都變成一群排列整齊的電偶極。物質中的分子電偶極沿著電場方向整齊排列的現象，稱為極化 (polarization)。

在電磁學，通常以  $P$  表示極化 (polarization)，用來表示物質在電場中極化的程度，電場越強，物質中受極化的分子數目越多，極化自然就越大，於是表面上產生的感應電荷就越密。

$$P = \alpha E \quad (2-1)$$

$E$  為電場強度， $\alpha$  為原子極化率 (atomic polarizability)，這常數與原子的性質有關。

由實驗決定的各種原子極化率列於表 2.1，由於氫和鹼金屬如鋁、鋰、鈉、鉀等均是素週期表第一列裡的元素，它們的  $\alpha$  值很大，並且從氫到鉀是依原子數增加的方向穩定地遞增，惰性氣體具有很小的  $\alpha$  值，但是在它們的族內若依氦、氖、氪的次序來看，它們的  $\alpha$  值仍然是有秩序地遞增。由表 2.1 看來，鹼原子易為電場扭曲，而惰性氣體的電子結構則是比較堅硬。在鹼原子的結構裡，有個束縛很鬆的外電子（或稱為價電子），使得它很容易極化。分子的情形也是一樣，當電場加在它上面時，也會產生感應偶極矩。

表 2.1 原子極化率，以  $10^{-24} \text{ mm}^3$  為單位[26]

元素	H	He	Li	Be	C	Ne	Na	A	K
$\alpha$	0.66	0.21	12	9.3	1.5	0.4	27	1.6	34

### 變化電場介質之極化

物質在隨時間變化的極化電場中，會造成極化電場的束縛電荷流動，而此電流是由極化電荷隨時間改變所產生的極化電流。在正弦變化的電場中，其物質的極化場也會隨著電場變化，當外加電場作週期性的變化其方向時，偶極場也隨之跳轉方向，其偶極的倒轉就是電荷的流動。物質的介電常數通常對於交流電場頻率都存在著相依性，在高頻時，分子偶極，再也跟不上外加電場的變化，其物質的介電常數也會隨著頻率的升高而遞減。因此該物質將不受偶極作用，而是隨著電場頻率作改變。

## 2.4 磁場中的物質特性

### 物質中的靜磁場

### 原子之磁性

磁性是由電荷之運動產生的一種物理現象。每一種原子都具有（或潛在的具有）磁性，原因是因為原子裡面的基本粒子都是不停的在運動。物質既然是原子所構成，因此在理論上，各種物質必然具有磁性的本質。

自然界中所有的物質都是由原子構成的，而原子又是由原子核及軌道電子所組成。而一個原子的磁偶矩通常也是由電子的軌道運動、電子的自

旋與原子核自旋組合而成。由於組合方式之不同，以及各原子之間磁偶矩之交互作用方式的不同，故由巨觀性質而言，以不同的相對導磁率分為抗磁性、順磁性與鐵磁性三種。如表 2.2

表 2.2 不同物質的相對導磁率[27]

材料名稱	組別	相對導磁率
鈦	抗磁性物質	0.99983
銀	抗磁性物質	0.99998
鉛	抗磁性物質	0.999983
銅	抗磁性物質	0.999991
水	抗磁性物質	0.999991
真空	非抗磁性物質	1
空氣	順抗磁性物質	1.0000004
鋁	順磁性物質	1.00002
鈀	順磁性物質	1.0008
2-81 坡莫合金粉 (81Ni2Mo)	鐵磁性物質	130
鈷	順磁性物質	250
鎳	順磁性物質	600
錳鋅鐵氣體	順磁性物質	1500
軟鋼 (0.2C)	順磁性物質	2000
鐵 (0.2 雜質)	順磁性物質	5000
矽鋼 (4Si)	順磁性物質	7000
78 坡莫合金 (78Ni)	順磁性物質	100000
純鐵 (0.05 雜質)	順磁性物質	200000
導磁合金 (5Mo 79Ni)	順磁性物質	1000000

## 物質之磁化

當無磁場存在時，一物質中之磁偶極矩方向不一，其磁性相互抵消；而當外加一磁場時，各原子即受到一個轉矩而轉動，於是各原子的磁偶極矩最後都會沿著磁場的方向排列起來，如圖 2.3 所示。

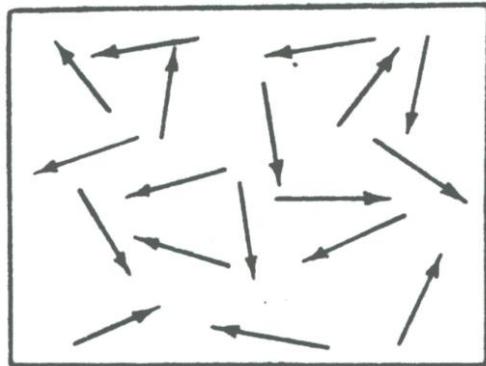


圖 2.3 (a) 不加磁場時各原子之磁偶矩作散亂不規則的分佈[25]

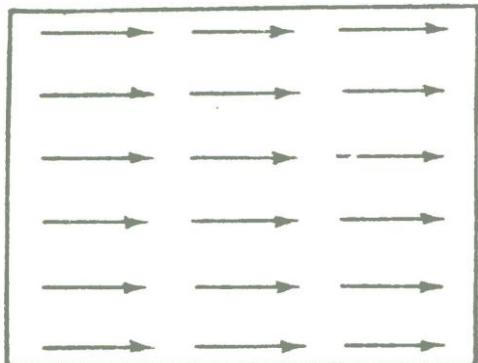


圖 2.3 (b) 加磁場時各原子磁偶矩均順著磁場方向排列[25]

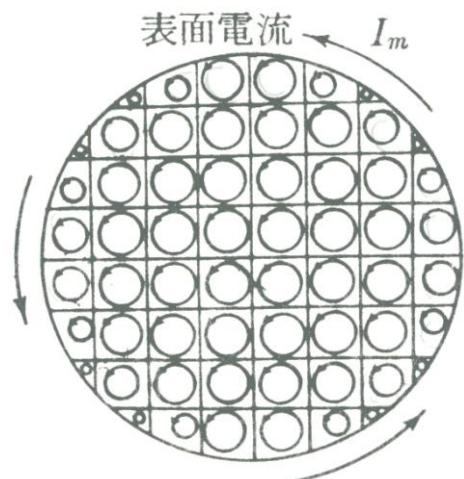


圖 2.4 物質磁化後截面圖[25]

其結果是各原子之軌道電子都不約而同的作同一方向的繞轉，如圖 2.4 所示。在物質之內部，相鄰兩原子之軌道電子環流的方向都是相反的，其產生之磁效應可視為互相抵消，因此物質內部各原子之總磁效應等於零。而在表面上的一層原子其外側並無任何環流與之相抵消，因此在表面上看起來即有一股等效的表面電流，稱為磁化電流（magnetization current） $I_m$ ；此一表面電流是各原子軌道電子之集體行為，屬於束縛電流（bound current）。物質置於磁場中時，各原子之磁偶極矩規則排列的現象，稱為磁化（magnetization）。

一物質磁化程度的大小，在數量上可用磁化量（magnetization） $M$  表示。也就是在單位體積中已經沿磁場方向排列起來的原子之磁偶極矩的總和。設每單位體積中之原子數為  $N$ ，各原子之磁偶矩為  $m$ ，則磁化量  $M$  可寫成式 2.2

$$M = Nm \quad (2.2)$$

磁化量  $M$  與磁化電流有直接的關係，如以一圓柱形物體為例，如圖 2.5 所示。設其長度為  $l$ ，截面積  $S$ ，則此圓柱體中所包含的總原子數為  $N(lS)$ ，其總磁偶矩為式 2.3

$$N(lS)m = (Nm)lS = (Ml)S \quad (2.3)$$

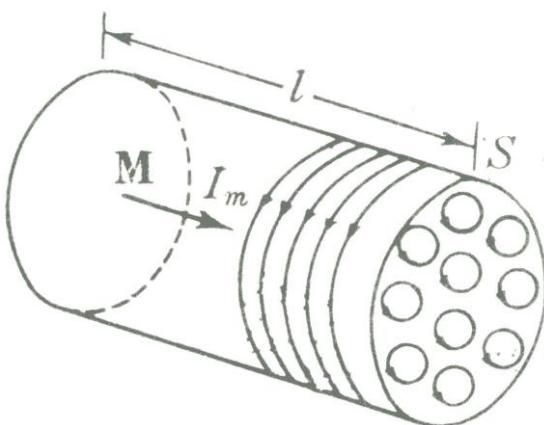


圖 2.5 磁化物質表面磁化電流之計算 [25]

由於磁偶矩等於電流與面積的乘積；若將圖 2.5 之圓柱形物質視為一個大的磁偶極，則 2.3 式中之  $Ml$  即可視為環繞於圓柱形物質表面上之磁化電流  $I_m$ ，即式 2.4

$$I_m = Ml \quad (2.4)$$

然而磁化電流  $I_m$  正式的說法應該是等於磁化量  $M$  在一圍線上的環流量，即式 2.5

$$I_m = \oint M \bullet dL \quad (2.5)$$

2.5 式所示之磁化電流即為表面電流，所以  $I_m/l$  即為磁化電流的面電流密度  $K_m$ ，即 2.6 式

$$K_m = M \quad (2.6)$$

由 2.6 式知，磁化物質表面之磁化面電流密度恆等於該物質之磁化量。由圖 2.5 知道磁化電流  $I_m$  與磁化量  $M$  是互成垂直的，因此向量式應表示為式 2.7



$$K_m = M \times a_n \quad (2.7)$$

其中  $a_n$  為物質表面的單位法線向量。

### 安培定律

馬克斯威爾 (J.C.Maxwell) 綜合了奧斯特 (H.C.Oersted)、安培 (A.M.Ampere)、拜奧 (J.B.Biot) 及薩瓦特 (F.Savart) 等人實驗研究的結論，並引進「位移電流」成為電流成分，而將電流與磁場的關係表為式 2.8 的安培定律。

$$\oint_C H dl = \int_S J \bullet dS + \frac{d}{dt} \int_S D \bullet dS \quad (2.8)$$

2.8 式中左側的積分符號是代表沿封閉曲線  $C$  的積分；2.8 式右側的兩個面積分，積分符號下標的  $S$  代表的是空間裡的某一面， $C$  為該面的邊界； $H$  是  $C$  上的磁場強度向量 (安培/米 ( $A/m$ ))， $dl$  是組成曲線  $C$  的有向線素 (m)； $J$  是  $S$  面上的電流密度 (安培/米<sup>2</sup> ( $A/m^2$ )) 向量， $D$  是  $S$  面上的電通密度

(庫倫/米<sup>2</sup> ( $c/m^2$ )) 向量， $dS$  是組成  $S$  的有向面素 ( $m^2$ )；“·”表向量內積。2.8 式中各向量的參考方向的決定，可先決定電流的方向，再根據右手座標系統及「安培右手定則」來決定包括  $dl$  與  $dS$  等其他相關向量的方向。如圖 2.6 所示。

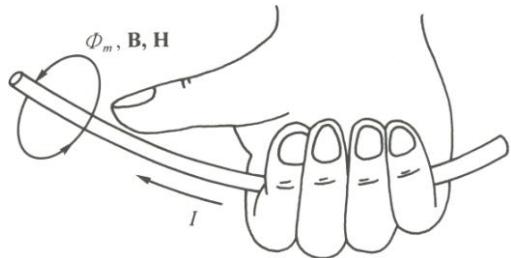


圖 2.6 安培右手定則圖示[28]

所謂安培右手定則是一種用以說明電流與其所產生的磁場方向關係的方法，該方法大致是當以右手輕握載有電流的導體如圖 2.6 所示，並以，大拇指朝向電流方向時，其餘四指為該電流所產生之磁場的方向。將之應用於載流線圈時，因為其匝間的非軸向分量有相互抵消的現象，故通常忽略不計，而其軸向分量如圖 2.7 所示，當以右掌貼線圈表面並以大拇指以外的四指指尖朝向電流方向時，指向與其他四指相互垂直的大拇指的指向就是磁場軸向分量方向。

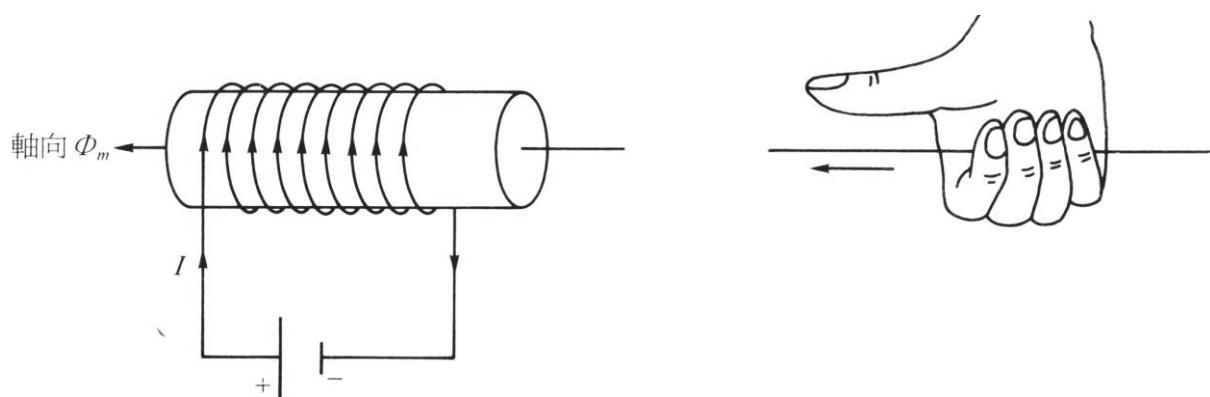


圖 2.7 線圈電流所產生軸磁場的方向[28]

除非是電容量極大或高頻情況下，一般電機內的磁場分析可忽略式 2.8 右側的第二項，因此電流與磁場的關係由式 2-8 在簡化為式 2.9

$$\oint_c H \bullet dl = \int_s J \bullet dS = \sum_{i=1}^N I_i \quad (2.9)$$

2.9 式中的等號右側為封閉曲線  $C$  所圍繞成的  $S$  面範圍內的電流，若共有  $n$  條導線通過，而每條導線各攜帶電流  $I_i$  (安培 (A))，面積分的結果就是這些電流的代數和。

若積分路徑  $C$  上的電磁強度  $H$  是定值，通過  $S$  面的淨電流  $I$ ， $l_c$  為曲線  $C$  上積分路徑的長度，則利用式 (2.9) 式可計算磁場強度為式 2.10

$$H = \frac{I}{l_c} A/m \quad (2.10)$$

式中  $H$  是磁場強度向量  $\mathbf{H}$  的大小。如果載流體是一個載有電流  $i$  的  $N$  匝 (turn) 線圈，則 2.10 式的  $I$  等於  $Ni$ ， $Ni$  常稱為激磁安匝 (安匝 ( $A \cdot turn$ ))，磁場強度計算式，為式 2.11

$$H = \frac{Ni}{l_c} \quad (2.11)$$

通常以磁通密度 (特斯拉 (Tesla, T)) 表示磁場效應的大小，磁通密度的大小以  $B$  表示。若磁場所存在的空間其磁性介質具有均勻性，線性與無方向性，則

$$B = \mu H \quad (2.12)$$

式中  $\mu$  是導磁係數 (亨利/米 ( $H/m$ ))。在電機計算中使用最多的是磁通量 (韋伯 (Wb)) 是通過某一封閉面  $S$  的磁通密度的面積分，其計算式如 2.13

$$\phi = \int_s B \bullet dS \quad (2.13)$$

式中  $B$  是通過  $S$  面的磁通密度向量， $dS$  是  $S$  面上的單位面積向量，“ $\bullet$ ”表向量內積， $\phi$  是磁通量並為一純量。若在一平面上  $S$  的面積為  $A$ ，導磁係數為  $\mu$ ，且磁場強度如 2.11 式所示，則通過  $S$  面的磁通量為 [25] [26] [27] [28]

$$\phi = BA = \frac{\mu NiA}{l_c} \quad (2.14)$$

### 第三章 纖維配向控制實驗與雙極板性能量測

#### 3.1 實驗流程

實驗流程圖如圖 3.1

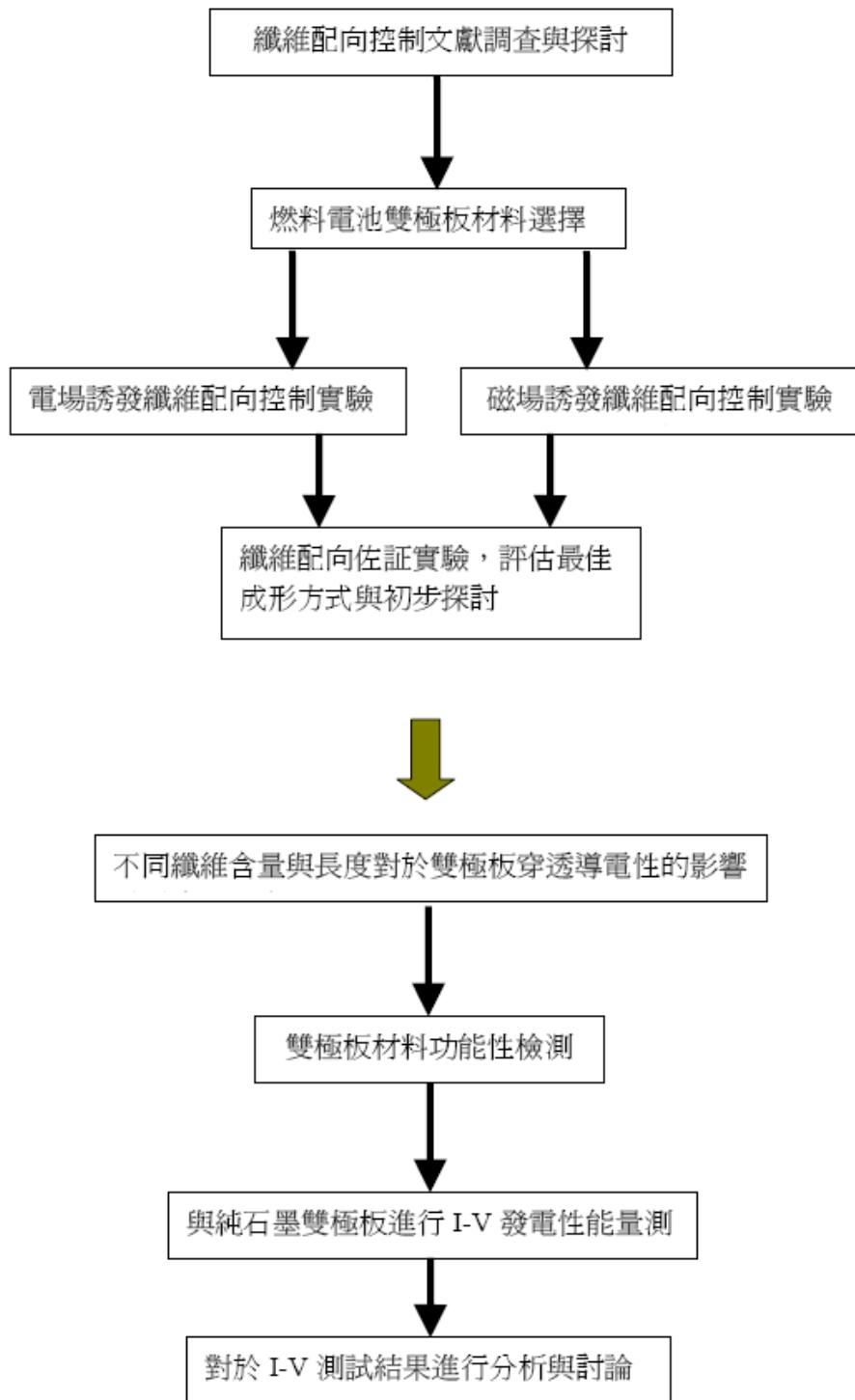


圖 3.1 實驗流程圖

### 3.2 實驗材料

本實驗採用具有耐腐蝕性與高導電性的鍍鎳碳纖維為導電強化材料，並以具耐化學性優良的環氧樹脂為基底材料。

#### 環氧樹脂物性表

環氧樹脂是採用強固企業有限公司 912 系列為基底材料，其物性表如表 3.1(a)與 3.1(b)所示。

表 3.1(a)環氧樹脂性狀表

品名	912A	912B
黏度	850cP	60cP
比重	$1.01 \pm 0.02 \text{ kg/cm}^3 / 20^\circ\text{C}$	$0.97 \pm 0.02 \text{ kg/cm}^3 / 20^\circ\text{C}$
色度	透明色	透明色
重量配合度	100	33
最高發熱溫度(100g, 25°C)	60°C	
可使用時間(100g, 25°C)	180mins	
硬度(SHORE D)	70~80	

表 3.1(b)環氧樹脂物理強度表

912A/912B=3:1	912AB
抗壓強度	$1280 \text{ kg/cm}^2$
抗彎強度	$1300 \text{ kg/cm}^2$
抗拉強度	$600 \text{ kg/cm}^2$

編織型鍍鎳碳纖維由富比利實業有限公司提供，如圖 3.2 所示。



圖 3.2(a) 編織型鍍鎳碳纖維



圖 3.2(b) 編織型鍍鎳碳纖維 200x 光學顯微鏡，下光源觀測圖。

### 3.3 實驗設備與量測儀器

#### 3.3.1 電磁場產生設備與電性量測儀器

本實驗在研究初期是將電場與磁場裝置和合為一，並根據電場強度定義為  $E = \Delta V/d$ ( $E$ ：電場； $\Delta V$ ：電壓差； $d$ ：距離)與磁場的安培右手定則進行電磁場的設計與製作，進行鍍鎳碳纖維配向控制的預備實驗。在經過預備實驗結果的分析與探討後，重新設計一個磁場裝置如圖 3.5(a)和(b)，以避免邊緣效應的存在，設計圖如附錄三。並使用高斯計進行磁場磁通量密度量測。在實驗的過程中使用真空烘箱和混合器等設備進行複合材料的分散處理。

#### 電磁場產生裝置

電磁場產生裝置製作材料性質，如表 3.2(a)和(b)。實體圖如圖 3.3(a)和(b)，電磁場產生裝置的設計圖與電路圖設計，如附錄一與附錄二。無外場作用模具組，如圖 3.4。

表 3.2(a)電磁場產生裝置製作之材料性質

零件名稱	材料種類
模具底板	紙質電木板
黏結劑	快乾型環氧樹脂
導磁鐵芯	SC15 碳鋼
磁場線圈	(電磁場裝置)線徑：0.55mm 長度：27M (磁場裝置)線徑：0.7mm 長度：50M
電場雙極板	紅銅
固定螺絲	M6×40mm 內六角不鏽鋼螺絲

表 3.2(b)電磁場產生裝置製作之電路系統使用材料

零件名稱	材料種類
線材	AWG14
繼電器	10A 24V 240V
可變電阻	200W 20 歐姆

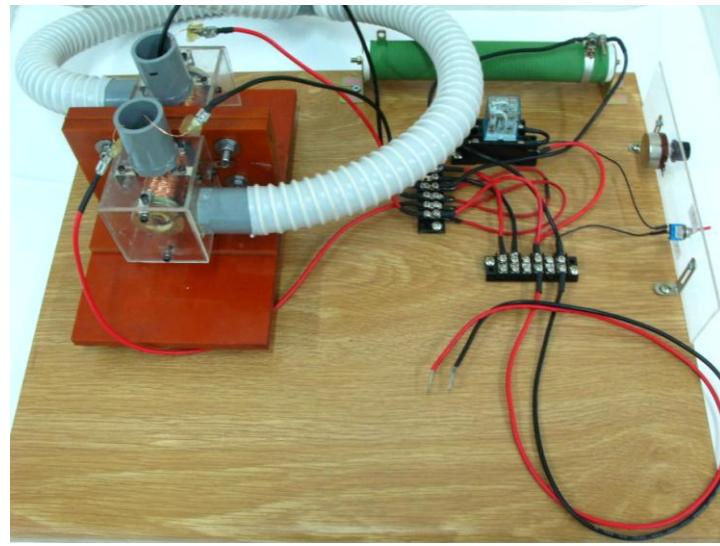


圖 3.3(a)電磁場產生裝置與電路系統

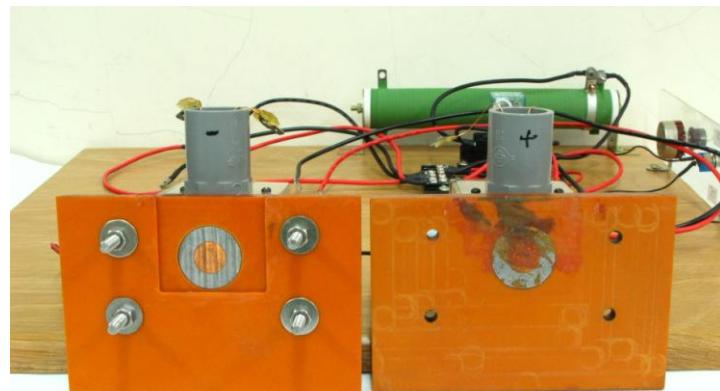


圖 3.3(b)電磁場產生裝置模具部分與外場作用區域



圖 3.4 無外場作用模具組

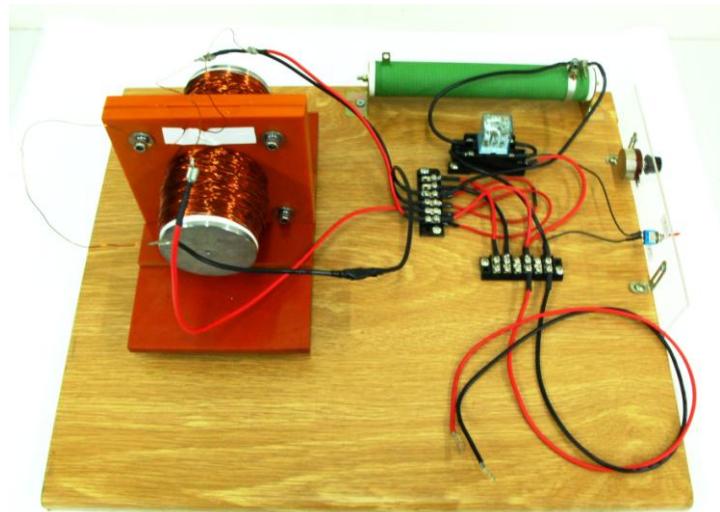


圖 3.5(a)磁場產生裝置與電路系統

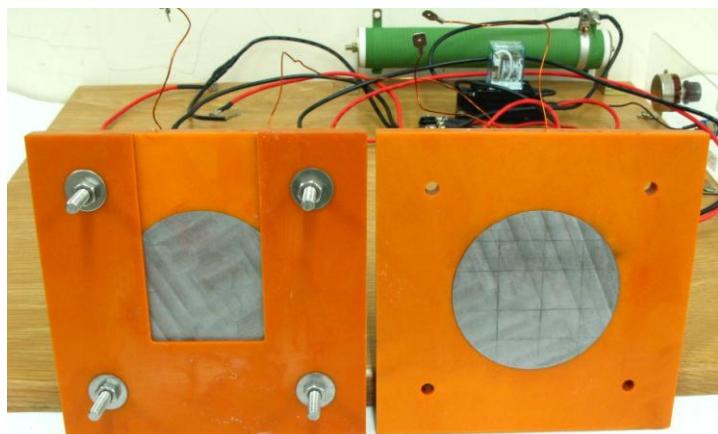


圖 3.5(b)磁場產生裝置模具部分與外場作用區域

### 電源供應器

本實驗直流電場電源供應器，採用擎宏電子製 CDP-1000-00.2HV 電源供應器，精準高壓專用電源供應器，最大輸出電壓 1000 伏特，最大輸出電流 0.01 安培，如圖 3.6。直流磁場電源供應器，採用 CIC PS-1940 數位顯示，輸出電壓 0-30 伏特，最大輸出電流 10 安培，如圖 3.7。



圖 3.6 直流高壓電源供應器



圖 3.7 直流電源供應器

## 高斯計

本實驗對於直流磁場磁通量密度的量測是使用系上複合材料結構實驗室的 F.W. BELL 5070 高斯計進行量測，如圖 3.8。詳細規格如附錄四。



圖 3.8 高斯計

### 精密天平

本實驗所使用的是系上材料物性與成形實驗室的瑞士 Mettlet Toledo 製的精密天平，型號 PB303，其量測範圍為 0.02g-310g，可讀數 0.001g，精密度 0.01g。如圖 3.9。



圖 3.9 精密天平

### 複合材料混合器

本實驗複合材料混合設備採用桌上型鑽孔機改良，馬達轉速 1750RPM，驅動皮帶盤直徑比設為 1：1，如圖 3.10。



圖 3.10 複合材料混合器

### 真空烘箱

本實驗對於複合材料消除氣泡，採用謙銳儀器有限公司的真空烘箱，溫度範圍室溫~200°C，精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，真空錶指針式 0~76 cmHg，如圖 3.11。

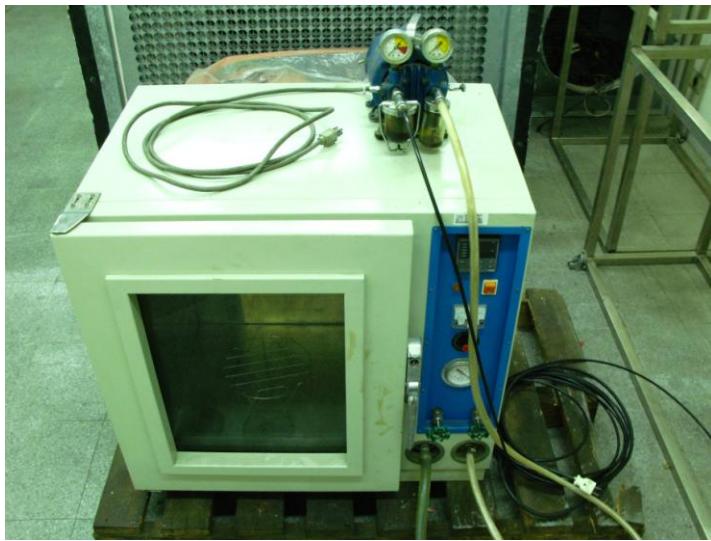


圖 3.11 真空烘箱

### 3.3.2 纖維配向佐證設備與儀器

#### 光學顯微鏡

光學顯微鏡：ZEISS 製，型號為 Axioskop 40，目鏡倍率 10X，物鏡倍率有 5X、10X、20X、50X、100X，並配備偏光鏡、補償板、CCD 影像擷取系統，如圖 3.12。



圖 3.12 光學顯微鏡

#### 穿透導電性量測裝置

雙極板穿透導電性量測方法示意圖如圖 3.13。實體圖如圖 3.14，量測裝置使用材料與儀器如表 3.3。

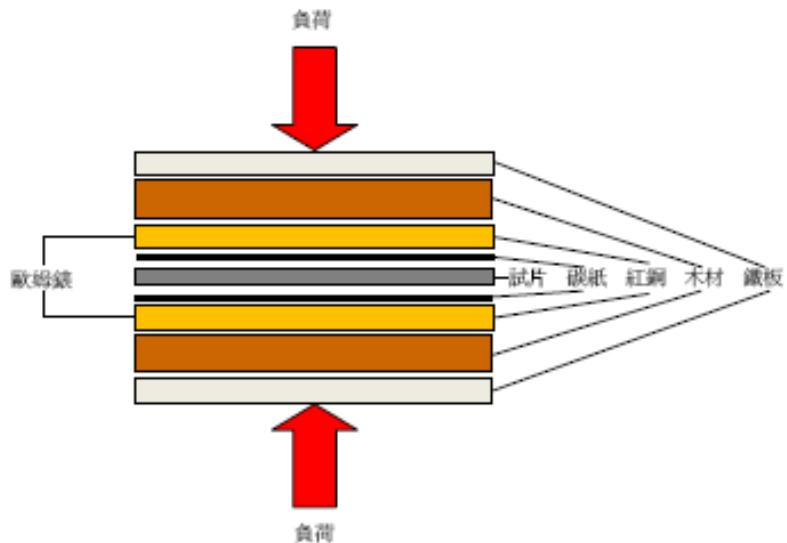


圖 3.13 雙極板穿透導電性量測方法示意圖

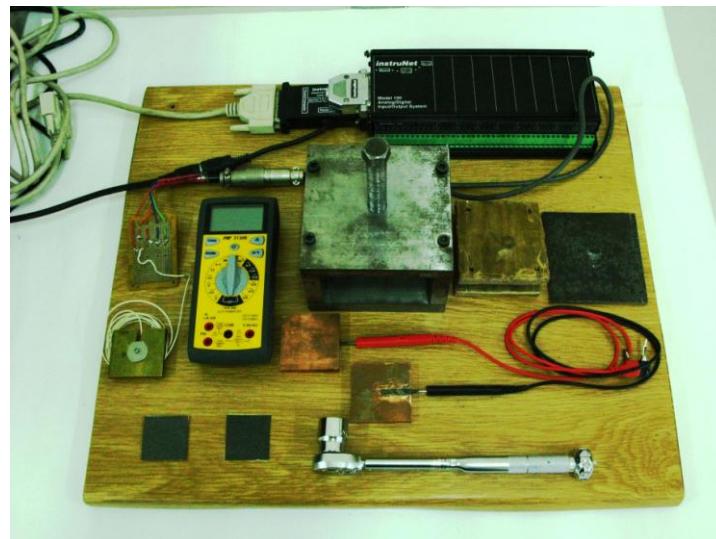


圖 3.14 雙極板穿透導電性量測材料實體圖

表 3.3 雙極板穿透導電性量測裝置使用之零件與儀器

零件與儀器名稱	材料種類與儀器型號
加壓端板	鐵材
絕緣板	木材
導電端板	紅銅
試片接觸媒介	碳紙
多功能高精度電錶	CIE-3130B (詳細規格如附錄四)
扭力扳手	KANON 250 QLK
固定螺絲直徑	M19
壓力感測器	KYOWA LM-10KA
數據擷取盒	InstruNet Model 100

### 3.3.3 複合材料處理流程與穿透導電性量測原理

#### 複合材料處理流程

複合材料處理流程，如圖 3.15。

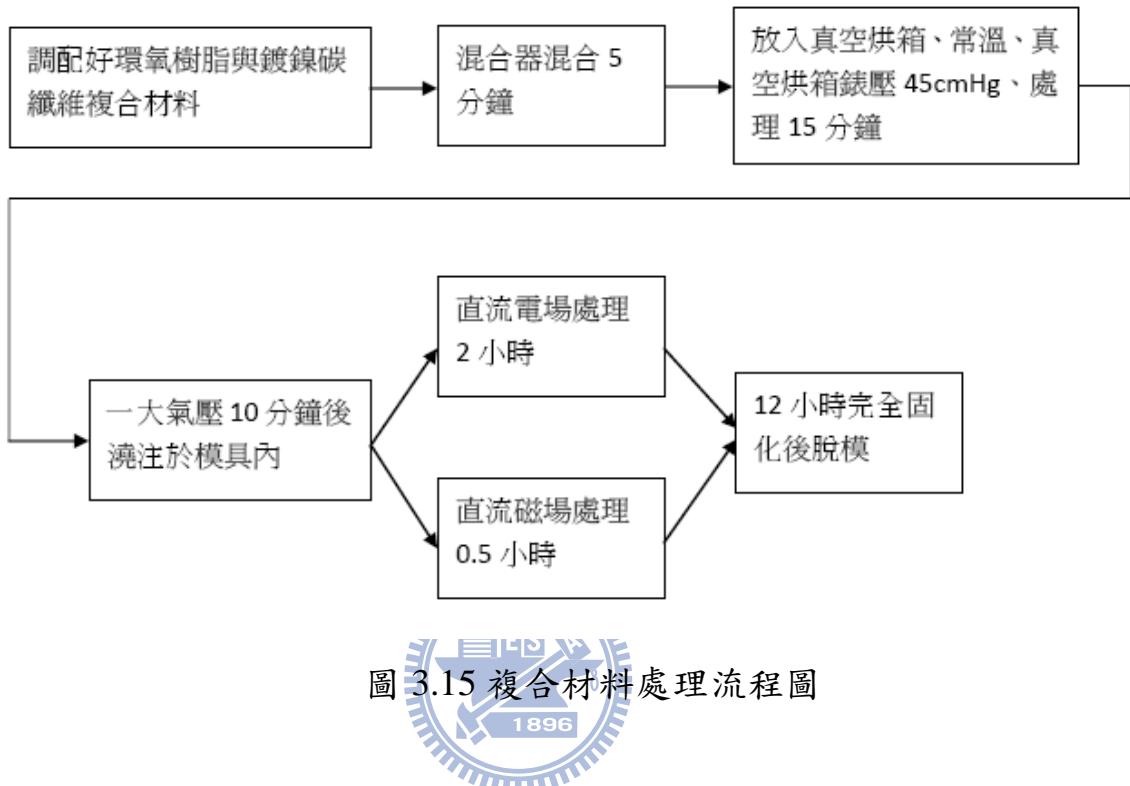


圖 3.15 複合材料處理流程圖

#### 雙極板穿透導電性量測原理

本實驗是根據克希荷夫電壓定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)，將整個量測裝置視為電阻的串聯電路，給予固定負荷減少碳紙與極板之間的接觸電阻，使用高精度電錶進行導電性的量測，量測流程如圖 3.16。對於給定負荷部分，是採用扭力扳手將螺絲固定，根據壓力感測器與數據擷取系統換算得知實際的負荷值。

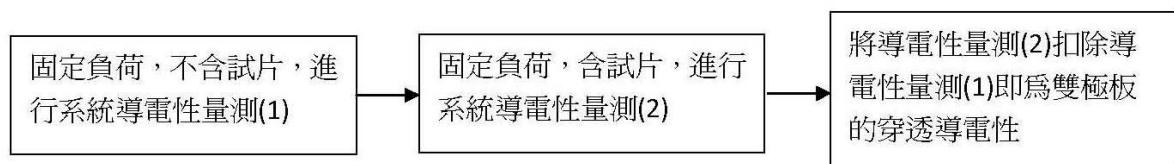


圖 3.16 雙極板穿透導電性量測流程

### 3.3.4 雙極板材料功能性檢測

目前質子交換膜燃料電池雙極板的材料有無孔石墨板、塑膠碳板、表面改性金屬板與複合型雙極板等種類。由於電池工作性能與使用壽命的需求，因此雙極板材料通常也需具備機械強度、導電、導熱、阻氣與抗腐蝕等特性的需求。

#### 平面導電性量測

雙極板主要是收集電流，因此其導電度以及平面導電性有一定的性能需求，美國能源局公佈雙極板平面電導度必須在  $100S \cdot cm^{-1}$  以上。本實驗使用國立虎尾科技大學材料系提供的四點探針做為試片的平面導電度量測，如圖 3.17 所示。以下介紹四點探針量測方法：

四點探針主要是量測試片的面電阻，四個探針中有兩個探針施以固定的電流，另兩個探針則須偵測電壓差，在根據歐姆定律即可測得片電阻。片電阻是從線電阻演變而來，線電阻定義如下：


$$R = \frac{\rho l}{A}$$

其中  $R$ 、 $\rho$ 、 $l$ 、 $A$  分別為電阻、電阻率、長度、單位截面積，當導電寬為  $W$ 、厚度為  $t$ 、長度為  $L$ ，則可改寫為：

$$R = \frac{\rho L}{Wt}$$

若是片為等長寬的矩形試片，則可改寫為：

$$R = \frac{\rho}{t}$$

測試出來的數值為電阻，即可求出電阻率，單位為  $\Omega \cdot cm$ ，電導率為  $S \cdot cm^{-1}$ ，其中西門子  $S$  為  $\Omega^{-1}$ 。



圖 3.17 四點探針

### 熱性質分析

本實驗使用熱重分析儀(Thermogravimetric Analysis, TGA)進行複合材料熱性質分析，其主要功用是在量測材料的熱重量損失變化量與溫度的關係，來判定材料的裂解溫度、熱穩定性、成分比例等特性。本實驗委託本校材料科學與工程學系分析，使用 TA Instruments 製造之機台，型號：TGA Q500。如圖 3.18。



圖 3.18 热重分析儀

## 氣體滲透率測試

由於質子交換膜燃料電池雙極板兩面緊貼著陰極和陽極的氣體擴散層，它具有導氣流和導電流的功能。但雙極板材料如果有氣密性不良或內漏的現象產生將會造成燃料電池作用性能降低與浪費燃料氣體，因此美國能源局公佈對於雙極板所測的氣體滲透率必須小於 $2 \times 10^{-8} m^3 m^{-2} s^{-1}$ 。本實驗使用的氣體滲透率檢測設備，是採用 316L 不鏽鋼管、連接法蘭與壓力錶自行組裝，最高錶壓力為  $5 kg/cm^2$ ，其 O-ring 直徑為 28mm。操作方法是將欲測試的試片夾於兩 O-ring 中間鎖緊後給予額定錶壓力，觀察並記錄玻璃試管的水溶液初始高度，長時間觀察並記錄其水溶液體積變化量，比較前後變化量結果，即可求得氣體滲透率。如圖 3.19、3.20。

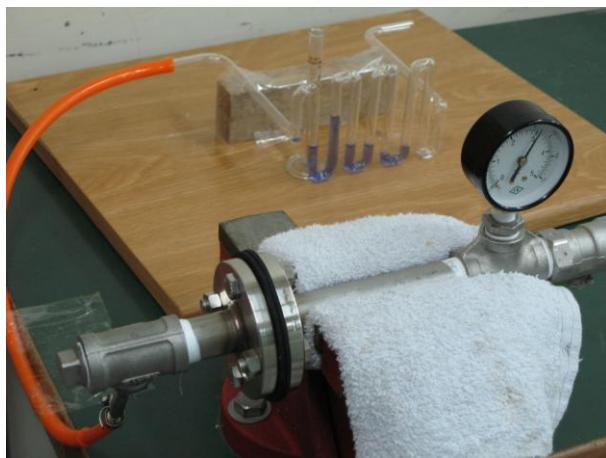


圖 3.19 氣體滲透率檢測設備

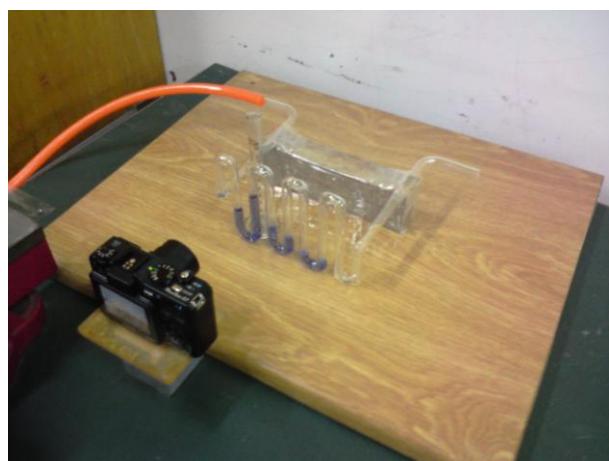


圖 3.20 水溶液位移量觀測方法

## 耐腐蝕性測試

電化學腐蝕，一般是指兩種不同金屬或金屬中足以構成電位差的兩極，將其放在電解質之水溶液中會因電位差的不同，使一方成為陽極，另一方成為陰極，並透過電解質作為離子傳導的媒介而發生陽極和陰極反應。在氧化和還原的反應過程中會構成一個電池效應的現象，此種現象會使得陽極金屬失去一個或多個電子，變成金屬陽離子而產生了氧化反應造成腐蝕。由於質子交換膜燃料電池在長時間運作之下，膜電極會發生微量的降解，釋出陽離子，如  $SO_3^-$ 、 $HSO_3^-$  等使電化學反應所生成的水呈弱酸性，雙極板陰極側則會因氧化膜的增厚而增加接觸阻抗，降低了雙極板的導電性能，雙極板陽極側則會發生輕微的腐蝕而導致電極觸媒活性降低。因此美國能源局公佈對於雙極板的腐蝕電流標準必須小於  $16 \mu A/cm^2$ 。在腐蝕速率的檢測方法中，常見的有恆電位(potentiostatic)、動電位(potentiodynamic)極化法，本實驗以動電位極化法作為材料腐蝕性測試，圖 3.21、圖 3.22 為分析裝置示意圖與實體裝置。在實驗的過程中透過恆電位儀對於輸出電壓、電流值變化的紀錄可得到極化曲線，如圖 3.23 所示。曲線可分為陰極極化曲線與陽極極化曲線，陰極曲線代表電化學實驗過程中的還原反應： $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$ ，陽極曲線是試片的氧化反應： $M \rightarrow M^{+n} + ne^-$ ，陰極極化曲線與陽極極化曲線的交點為試片的腐蝕電位( $E_{corr}$ )和腐蝕電流( $I_{corr}$ )， $E_{corr}$  為試片開始腐蝕的電位， $I_{corr}$  代表腐蝕速率。在腐蝕電流的求法中可分為塔弗外插法(Tafel extrapolation)和線性極化法(linear polarization)。本實驗以弗外插法作為腐蝕電流判定，在腐蝕電位  $\pm 50mv$  附近，有一線性區域稱為塔弗直線，陰、陽極化曲線的塔弗直線區域延伸交點，即為所對應的腐蝕電壓與電流密度[29][30][31]。

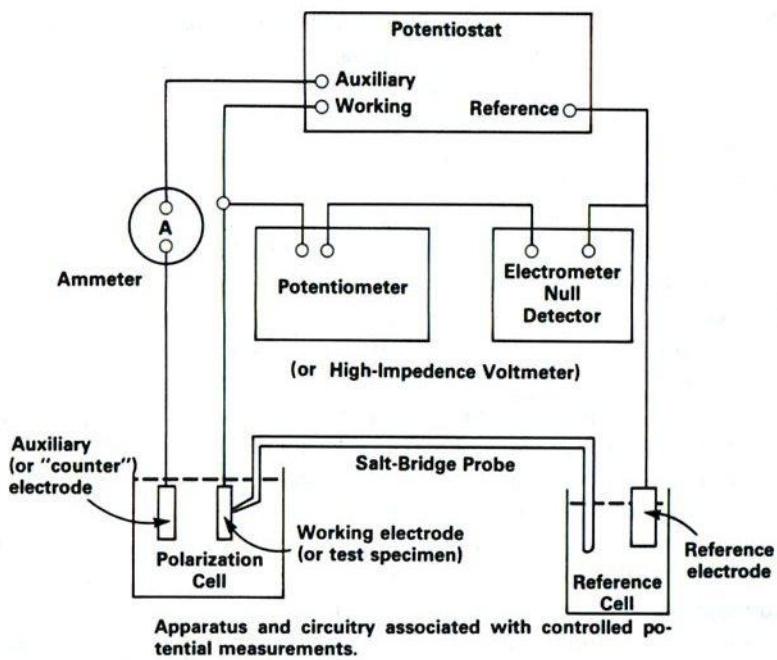


圖 3.21 恒電位儀測試裝置示意圖[30]

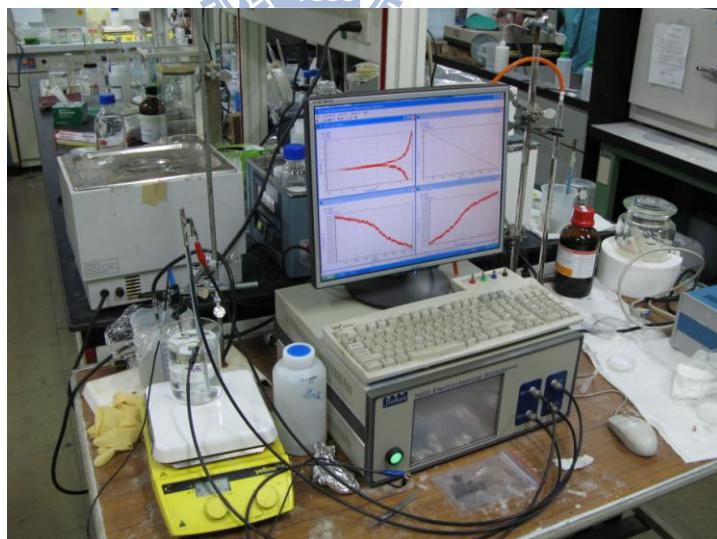


圖 3.22 恒電位儀測試裝置實體圖

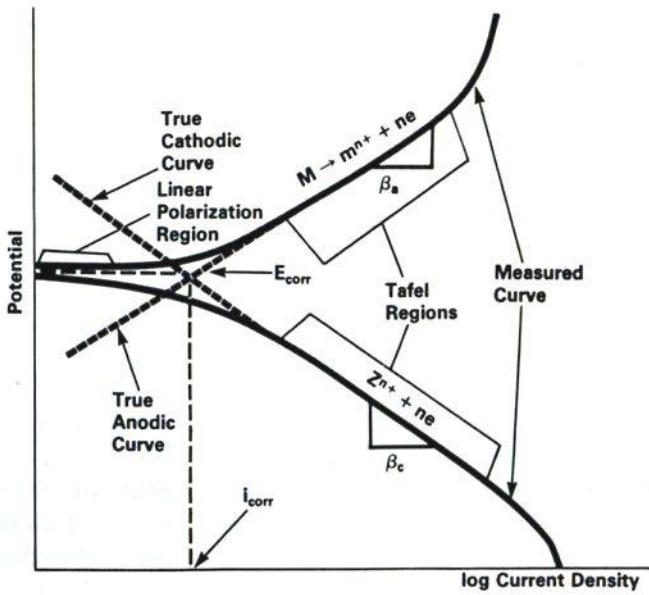


圖 3.23 極化電位與對數電流密度關係呈直線示意圖[30]

### 3.3.5 單一電池發電性能量測

燃料電池在開發完成前的重要步驟就是檢測，檢測的目的就是藉由量測了解燃料電池性能是否符合需求，檢測的結果不僅用以提供產品規格的驗證之依據，同時也可以提供未來產品改進之參考。本實驗使用鼎佳能源股份有限公司提供的 TEC-TS300 燃料電池測試機台進行極化曲線與功率密度測試如圖 3.24，並以石墨雙極板與纖維配向後雙極板進行性發電能比較與探討。



圖 3.24 燃料電池性能測試機台

## 第四章 電場/電磁場誘發纖維配向效果及其燃料電池雙極板的應用

### 4.1 電磁場之磁通量密度與系統電流的關係

本研究在電磁場產生裝置製作完成後，使用高斯計進行磁場磁通量密度量測(高斯計詳細規格如附錄五)，並在忽略磁場的邊緣效應下量測磁場處理區域的最大磁通密度，其系統電流與磁通量密度之關係如圖 4.1。在考慮磁場邊緣效應與鍍鎳碳纖維配向效果下製作磁場產生裝置，其系統電流與磁通量密度之關係如圖 4.2。在提供系統 4 安培電流時其磁通量密度分佈趨勢，磁場作用面直徑 80mm，如圖 4.3。

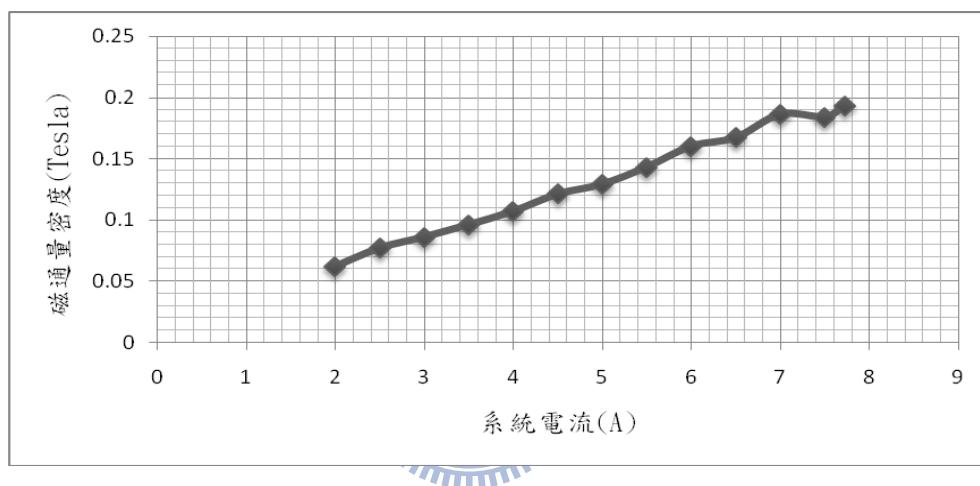


圖 4.1 電磁場產生裝置系統電流與磁通量密度的關係(忽略邊緣效應)

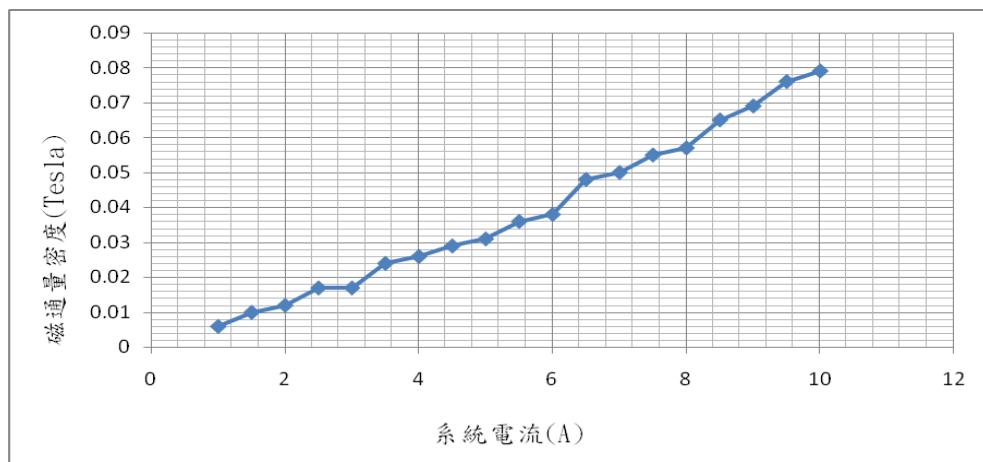


圖 4.2 磁場產生裝置系統電流與磁通量密度的關係(包含邊緣效應)

位置編號	1	2	3	4	5	6	7
磁通量密度 (Tesla)	0.026	0.024	0.024	0.026	0.024	0.012	0.012
	0.024	0.024	0.010	0.010	0.024	0.024	0.012
	0.012	0.024	0.026	0.024	0.024	0.026	

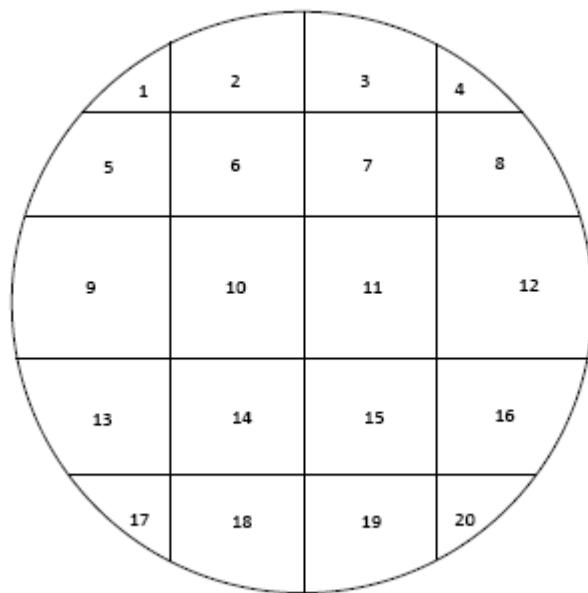


圖 4.3 磁通量密度分佈趨勢圖

## 4.2 電場對纖維配向的影響

本研究在電場誘發實驗，是採用直流電場以誘發鍍鎳碳纖維配向於垂直電場方向為實驗目的，並參考過去相關電場誘發奈米碳管配向文獻的實驗方法進行實驗。在實驗初期是使用不含絕緣層之電場進行纖維誘發配向處理，發現纖維配向效果不如預期且已經產生了電蝕作用；其後加上了絕緣層再進行實驗，雖然電蝕作用已經改善了，但纖維配向效果還是不如預期，於是加強電場強度與縮短纖維長度再進行實驗。

圖 4.4 是未經過電場處理，垂直電場處理側纖維配向觀測圖，可以從圖 4.4 (a) 清楚看出纖維是呈現均勻分散並沒有分散不均與聚集的情況產生。圖 4.5 是經過電場處理未含絕緣層，纖維配向結果觀測圖，從電場處理後試片外貌觀察得知，在電場作用區已經有明顯的電蝕作用與焦碳產生，且氣泡是沿著澆口方向分佈，圖 4.5 (a)。將試片從垂直電場作用側切開觀察，在靠近電場陽極側有明顯的氣泡產生且明顯的比陰極側多，圖 4.5 (b)。再使用光學顯微鏡觀測纖維配向與分佈狀況，沿著電場作用區域陰極側向陽極側觀察，圖 4.5 (c) ~ 4.5 (h)。從其圖觀察得知纖維有往電場陽極側聚集的情況產生，但纖維卻沒有配向現象產生。雖然在靠近電場電極兩側都有明顯的氣泡產生，但明顯的陽極側比陰極多很多，在其處理下因為電流的流通造成高導電性纖維產生大量的焦耳熱，使纖維產生焦碳而聚集且被自己產生的氣泡團團圍住，圖 4.5 (g)、4.5 (h)。

在解決電蝕作用下進行含有絕緣層的試片處理，圖 4.6。從圖 4.6 (a) ~ 4.6 (e) 觀察得知，雖然電場電蝕作用已經消除，但在靠近電場陽極側或陰極側都沒有纖維聚集或配向的情況產生，初步判斷可能是電場強度不足。於是在加強電場強度與縮短纖維長度下進行實驗，其實驗結果如圖 4.7。從圖 4.7 (a)、4.7 (b) 觀察得知，在靠近電場陽極側或陰極側都沒有纖維聚集或配向的情況產生。

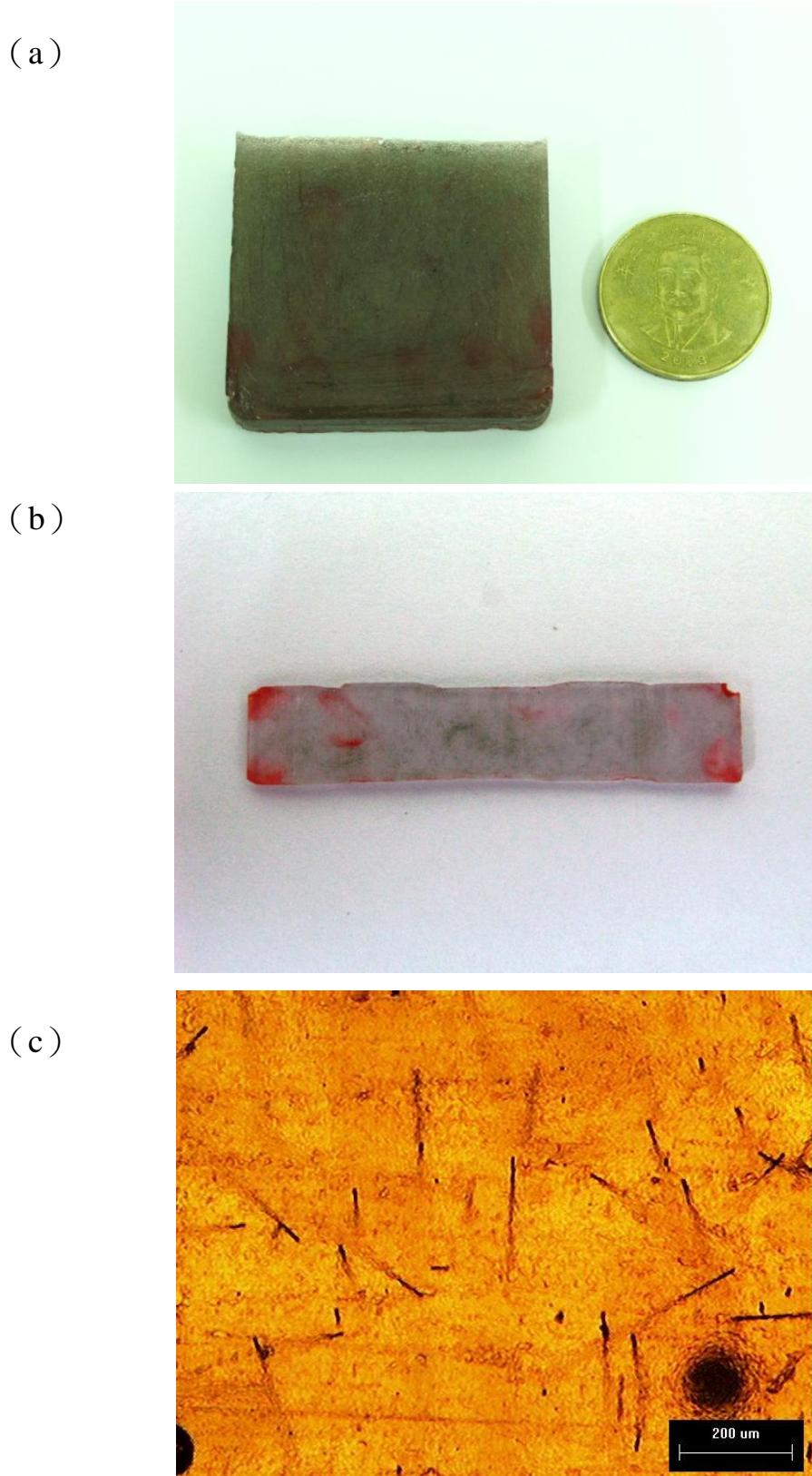


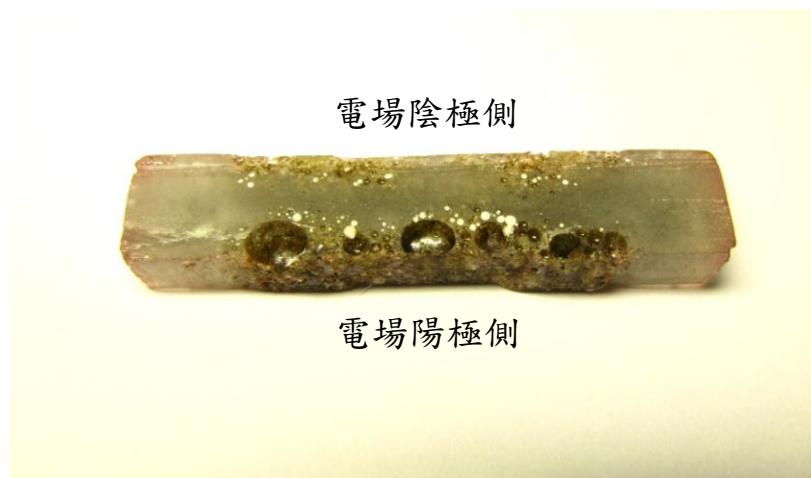
圖 4.4 未經電場處理實驗結果

鍍鎳碳纖維 0.2wt% + 環氧樹脂，纖維長度 3mm，直徑  $10\text{ }\mu\text{m}$ ，試片尺寸( $40\text{mm} \times 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ )，圖 (c): 50x 下光源觀測圖。

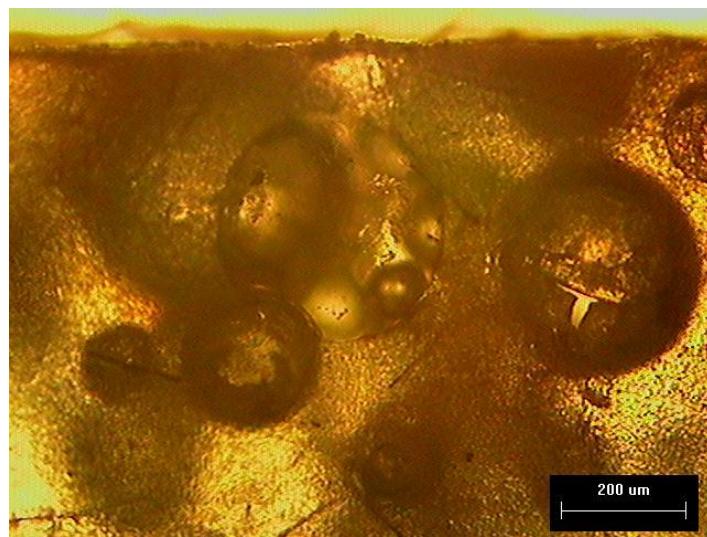
(a)



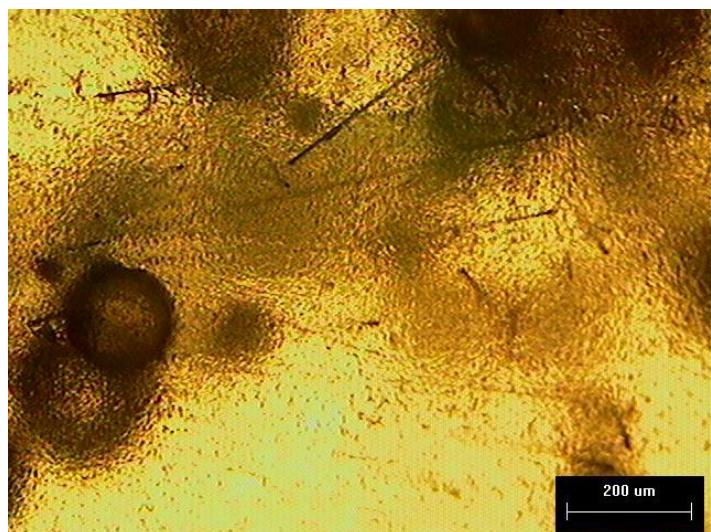
(b)



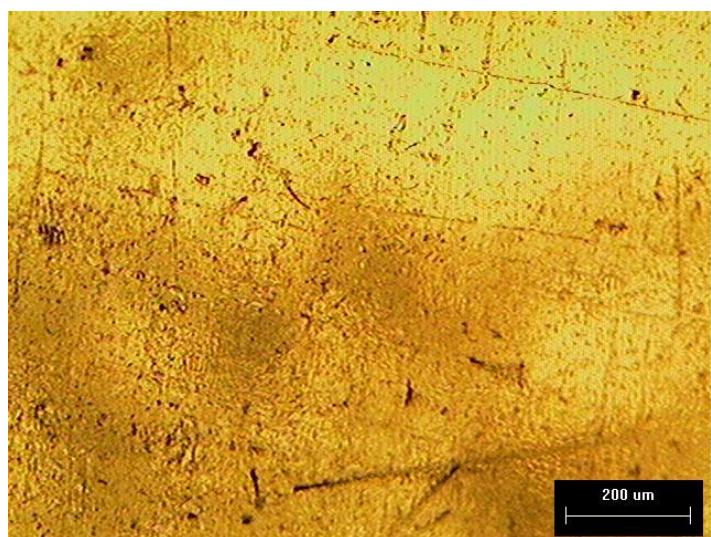
(c)



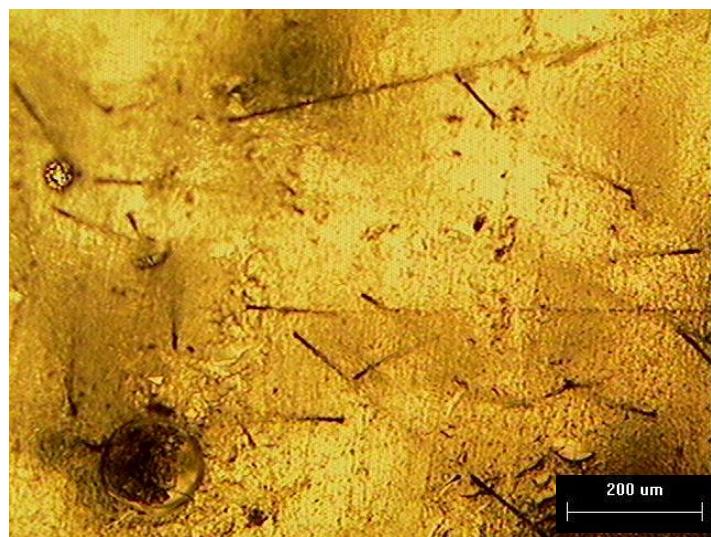
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

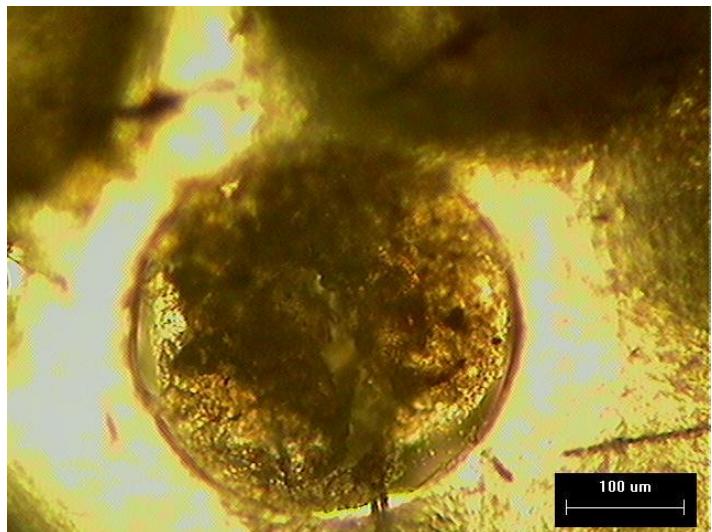
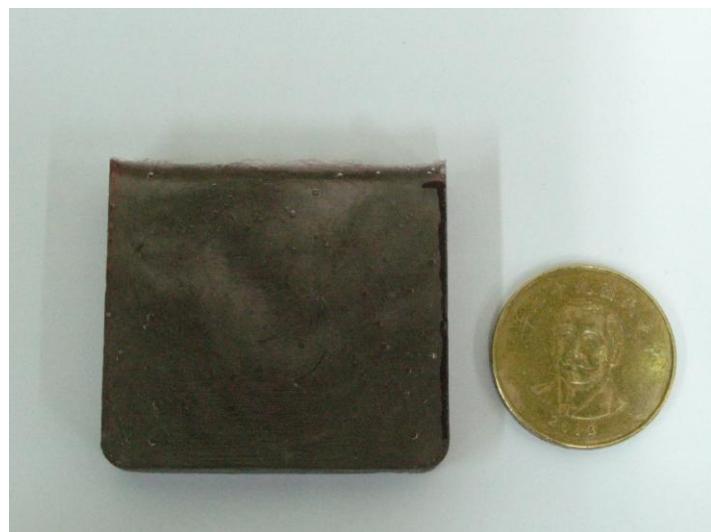
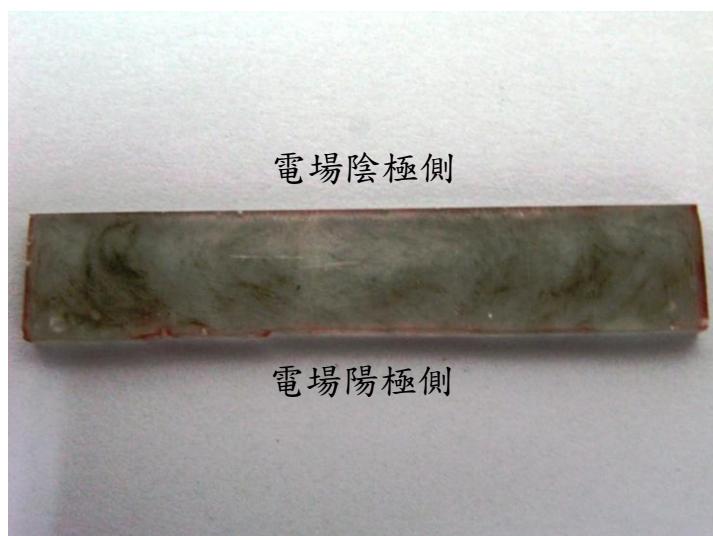


圖 4.5 電場強度  $100\text{V/mm}$  誘發纖維配向處理實驗結果(未含絕緣層)  
鍍鎳碳纖維  $0.2\text{wt\%} +$  環氧樹脂，纖維長度  $3\text{mm}$ ，直徑  $10\mu\text{m}$ ，試片尺寸( $40\text{mm}\times 50\text{mm}\times 10\text{mm}$ )，電場強度  $100\text{V/mm}$ ，圖 (c)、(d)、(e)、(f)、(g)： $50\times$  下光源觀測圖，圖 (h)： $100\times$  下光源觀測圖。

(a)



(b)



(c)

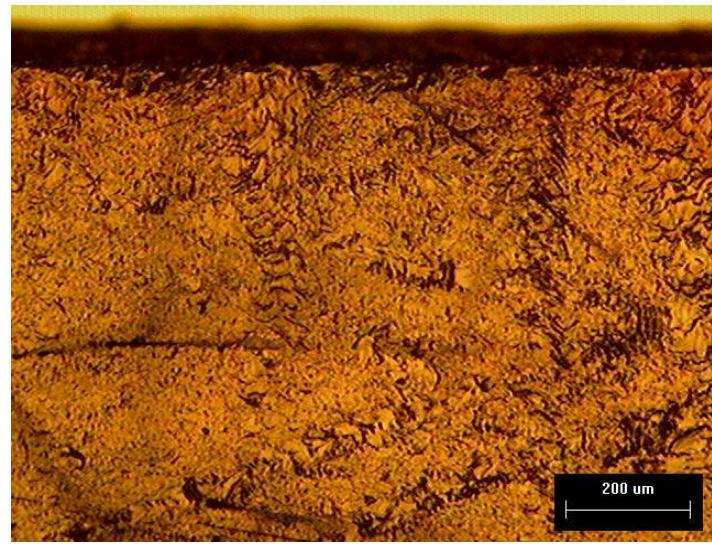
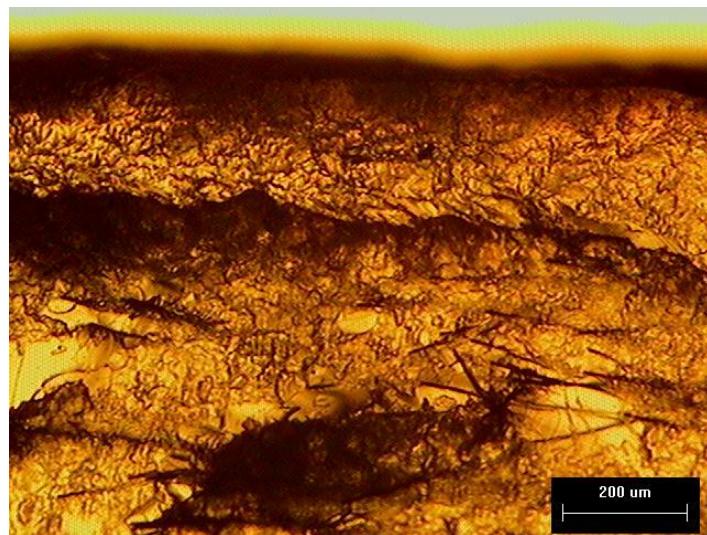




圖 4.6 電場強度  $100\text{V/mm}$  誘發纖維配向處理實驗結果(含絕緣層)  
鍍鎳碳纖維  $0.2\text{wt\%} +$  環氧樹脂，纖維長度  $3\text{mm}$ ，直徑  $10\ \mu\text{m}$ ，試片尺寸( $40\text{mm} \times 50\text{mm} \times 10\text{mm}$ )，電場強度  $100\text{V/mm}$ ，圖 (c)、(d)、(e)： $50\times$  下光源觀測圖。

(a)



(b)

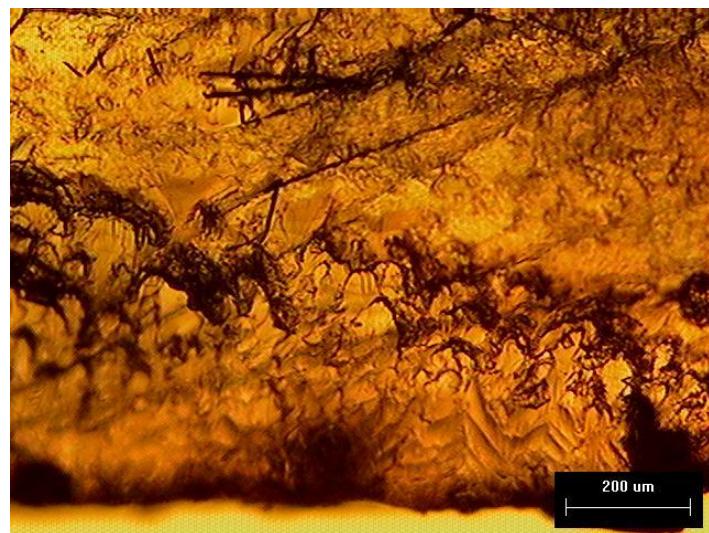


圖 4.7 電場強度  $500\text{V/mm}$  誘發纖維配向處理實驗結果(含絕緣層)  
鍍鎳碳纖維  $0.2\text{wt\%}$  + 環氧樹脂，纖維長度  $1\text{mm}$ ，直徑  $10\mu\text{m}$ ，試片尺寸( $40\text{mm} \times 50\text{mm} \times 2\text{mm}$ )，電場強度  $500\text{V/mm}$ ，圖 (a)、(b)： $50\times$  下光源觀測圖。

## 4.3 磁場對纖維配向的實驗

### 4.3.1 磁場誘發纖維配向試片觀察結果

本研究在磁場誘發纖維配向實驗，是採用直流磁場以誘發鍍鎳碳纖維配向於垂直磁場方向為實驗目的，並參考過去相關磁場誘發奈米碳管配向相關文獻的實驗方法進行實驗。在實驗初期使用不含冷卻系統的磁場裝置進行誘發纖維配向處理，但在實驗結果發現實驗試片有過熱的情況發生，於是加裝冷卻系統使其試片在經磁場處理下減少過熱的情況發生。其誘發纖維配向效果也逐漸的呈現出來，但從實驗結果得知磁場的邊緣效應對於誘發纖維的配向與聚集，將會產生明顯的影響，於是重新設置一個磁場裝置避免邊緣效應的產生。雖然邊緣效應已消除，纖維配向效果也有了明顯的效果呈現，但在考慮到雙極板的穿透導電性能需求，於是加長了纖維長度，並改變複合材料的澆注方式，避免纖維滯留在澆口附近。

在實驗初期將 0.1~0.6wt% 長度 1mm 的纖維澆注於未經磁場處理模具內，在經過試片觀察得知，少數纖維有向下沉澱的現象產生但整體而言其纖維還是分佈均勻，如圖 4.8 所示。使用電磁場產生裝置誘發 0.5wt% 長度 1mm 纖維配向，從試片外貌觀察得知，在磁場處理區域有明顯的氣泡產生，對於磁場處理區域邊緣側有明顯的纖維聚集現象產生，如圖 4.9 (a)。從平行磁場纖維相對均勻分佈區域，觀察得知纖維已經有沿著垂直磁場方向排列產生(圖 4.9 (b))。觀察平行磁場邊緣效應處理區域得知，其纖維產生的聚集現象也是沿著垂直磁場方向排列(圖 4.9 (c))。從垂直磁場邊緣效應處理區域觀察得知，只有相對極少量的纖維會沿著平行磁場方向排列，對於大多數纖維而言其纖維還是沿著垂直磁場排列，如圖 4.9 (d)、(e) 所示。

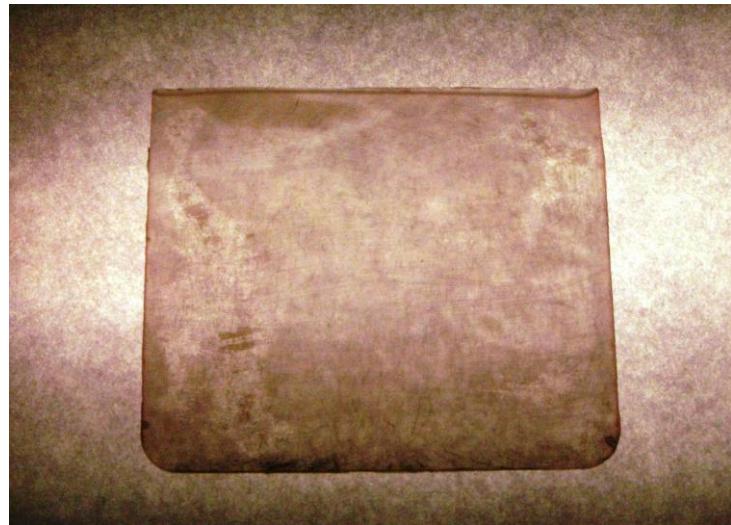
在考慮到磁場處理時其作用區域有過熱情況發生，造成試片產生大量的氣泡，經加裝冷卻系統後其效應明顯的減少。由於纖維長度相對於試片厚度太長，造成澆注到模內時有大量的纖維滯留在澆口附近，但在磁場處理區域還是有少量的纖維聚集現象產生。在經過冷卻系統處理後，磁場處理區域不再有過熱產生氣泡的現象產生(圖 4.10 (a))。從圖 4.10 (b) 觀察得知，其未經過磁場處理的試片，垂直磁場側觀測纖維是呈現均勻分散，

並沒聚集的現象產生。再從試片不同方向觀察纖維配向與聚集的結果得知，其經磁場處理的結果與未加冷卻系統的結果是一致的，如圖 4.10 (c) ~ (e) 所示。

在考慮邊緣效應與磁場作用區域過熱現象產生下，使用磁場產生裝置進行試片處理，以利於試片穿透導電性量測與纖維分佈均勻性。經過磁場產生裝置處理後的試片，對於紅色虛線磁場處理區域邊緣效應已消除，由於此磁場產生裝置相對於電磁場產生裝置產生的磁通量密度較低，磁場處理區域產生的溫度也相對較低，對於該試片的處理不會有過熱與氣泡的問題產生(圖 4.11 (a))。在觀測平行磁場處理區域，纖維沿著垂直磁場方向排列且分散均勻，垂直磁場處理區域，纖維也是沿著垂直磁場方向整齊排列且分散均勻。

在考慮到雙極板穿透導電性能不足的情況下，改變纖維長度與含量進行成形，由於纖維長度相對試片厚度較長，在澆注時易使纖維滯留於澆口附近，於是改變澆注方式將原本從試片厚度方向澆注複合材料，改由試片平面方向澆注複合材料，避免纖維滯留在澆口附近，在澆注完成後使用螺絲將模具合模並固定。圖 4.12~4.14 為 0.4%、0.6% 與 0.8wt% 纖維長度 2mm 配向後的試片完成品與纖維配向觀測圖，其中各圖(a)為試片完成品平面照片，從外觀觀察得知有些許纖維往試片邊緣分佈，此現象是因為複合材料於澆注完成後，模具固定螺絲在上緊時模內多餘的複材往模板間溢出所造成並不影響纖維配向，從試片整體觀察得知纖維並沒有產生團聚且分散均勻，因此其現象並不是磁通量密度分不均所造成。各圖(b)為平行磁場纖維配向觀測圖，從其纖維配向觀測比較得知隨著纖維含量的提升其纖維配向量有明顯的減少趨勢產生且不易觀察。由於纖維長度與纖維含量的增加都會提升纖維在環氧樹脂裡面轉動的難度，因此從各圖(c)和各圖(d)垂直磁場纖維配向分析結果得知，在其實驗參數處理下纖維配向量也是隨著纖維含量提升而減少。

(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

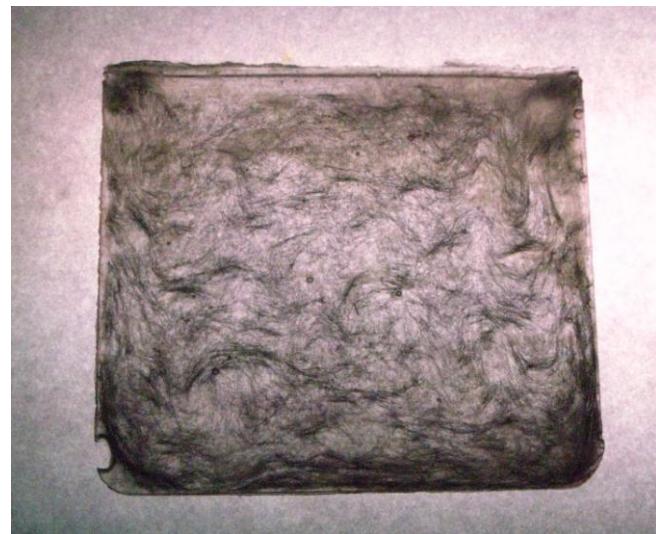
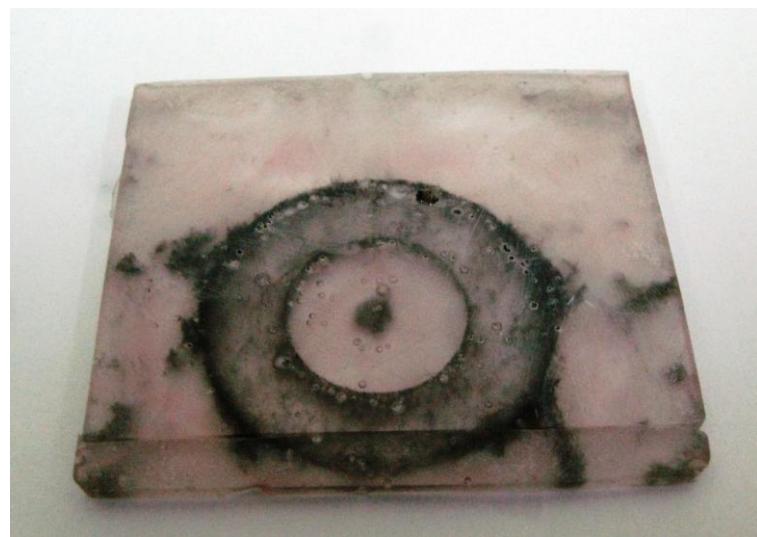


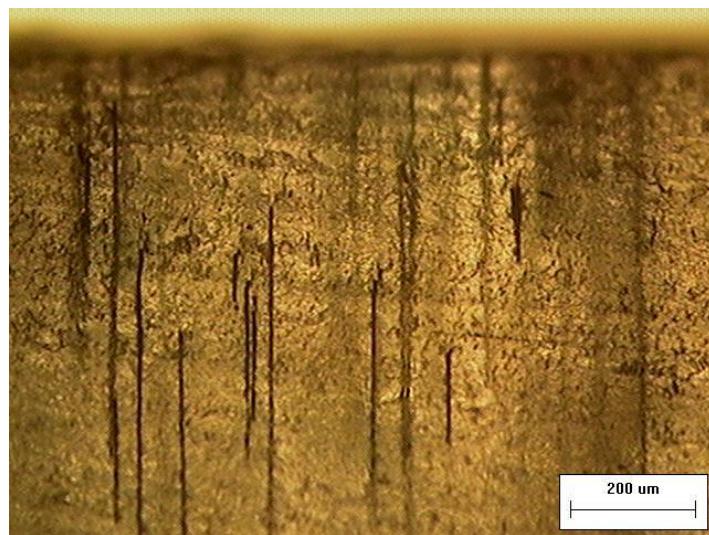
圖 4.8 未經磁場處理不同纖維含量試片圖

纖維長度 1mm，直徑  $10\ \mu\text{m}$ ，試片尺寸( $40\text{mm}\times50\text{mm}\times2\text{mm}$ )，圖 (a) ~ (f):  
0.1~0.6wt% + 環氧樹脂。

(a)



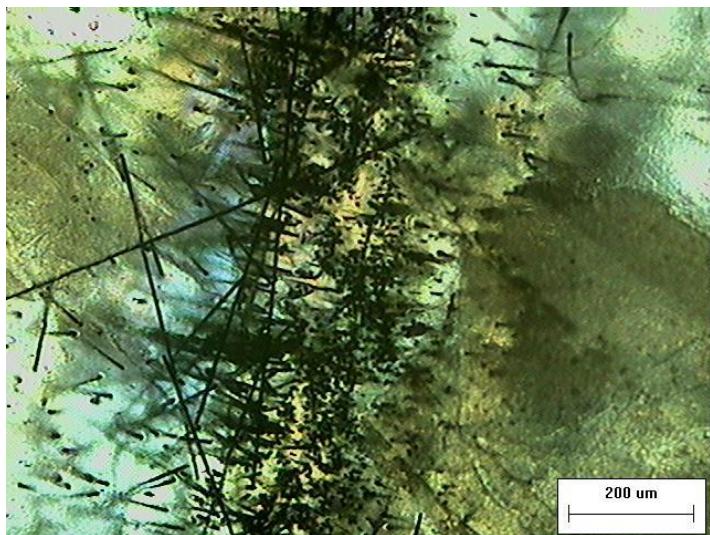
(b)



(c)



(d)



(e)

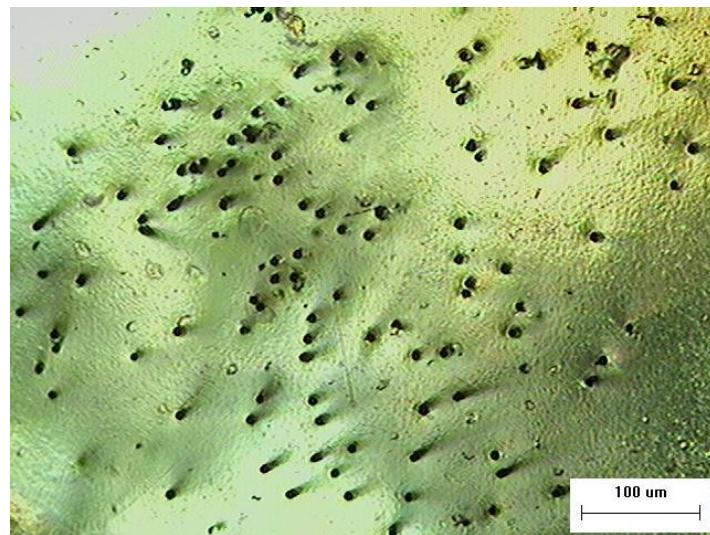


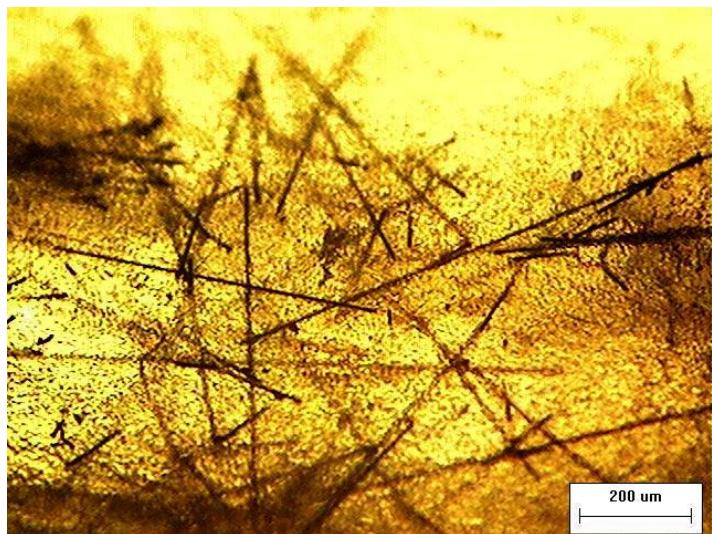
圖 4.9 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、含邊緣效應)

鍍鎳碳纖維 0.5wt% + 環氧樹脂，纖維長度 1mm，直徑  $10\text{ }\mu\text{m}$ ，試片尺寸( $40\text{mm} \times 50\text{mm} \times 2\text{mm}$ )，磁通量密度 0.184Tesla，圖 (a) ~ (d): 50x，圖 (e): 100x。

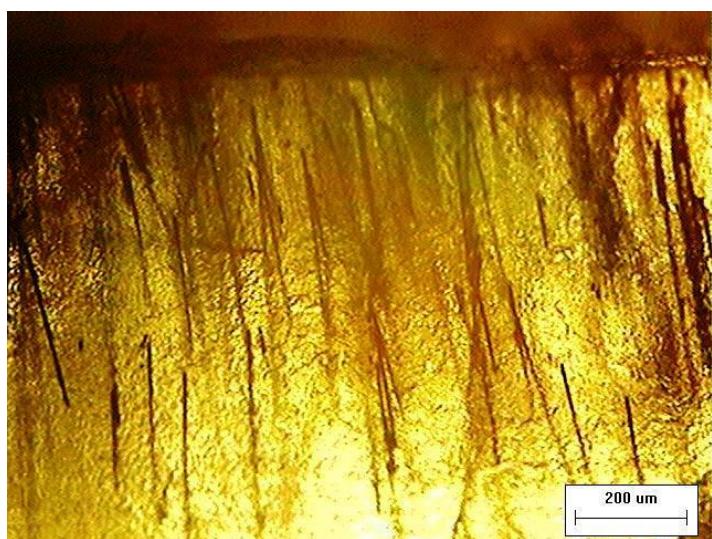
(a)



(b)



(c)



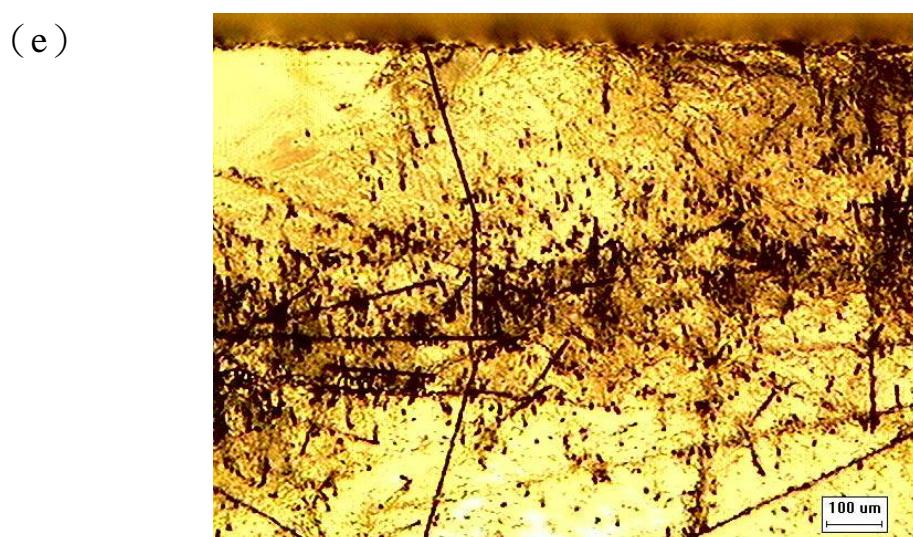
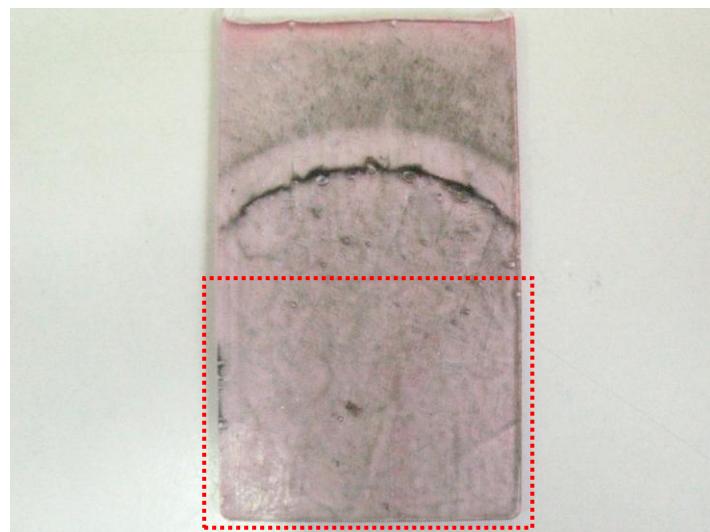
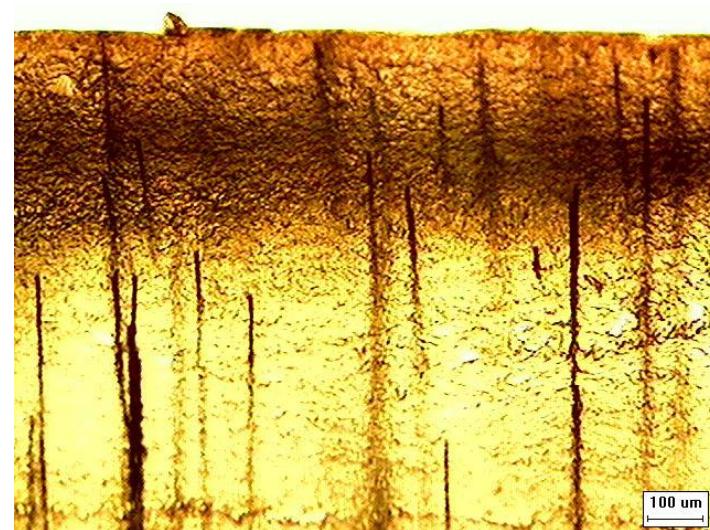


圖 4.10 磁場誘發纖維配向處理試片圖(含冷卻系統、含邊緣效應)  
鍍鎳碳纖維 0.5wt% + 環氧樹脂，纖維長度 2mm，直徑  $10 \mu\text{m}$ ，試片尺寸( $40\text{mm} \times 50\text{mm} \times 2\text{mm}$ )，磁通量密度 0.184Tesla，圖 (a) ~ (e) : 50x。

(a)



(b)



(c)

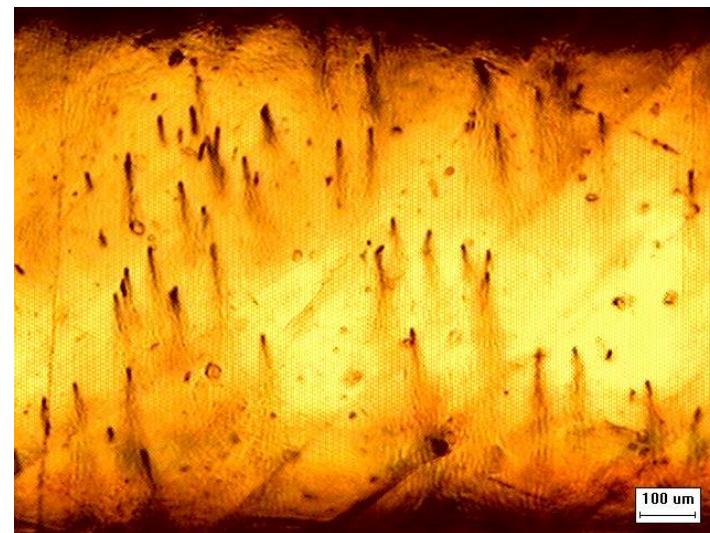
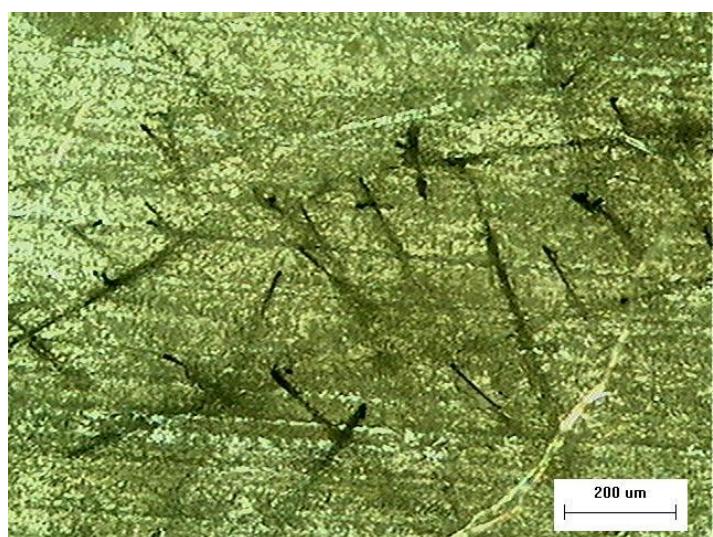


圖 4.11 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應)  
鍍鎳碳纖維 0.5wt% + 環氧樹脂，纖維長度 1mm，直徑  $10\mu\text{m}$ ，試片尺寸 (100mm  $\times$  54mm  $\times$  2mm)，磁通量密度 0.069Tesla，圖 (b) ~ (c): 50x。

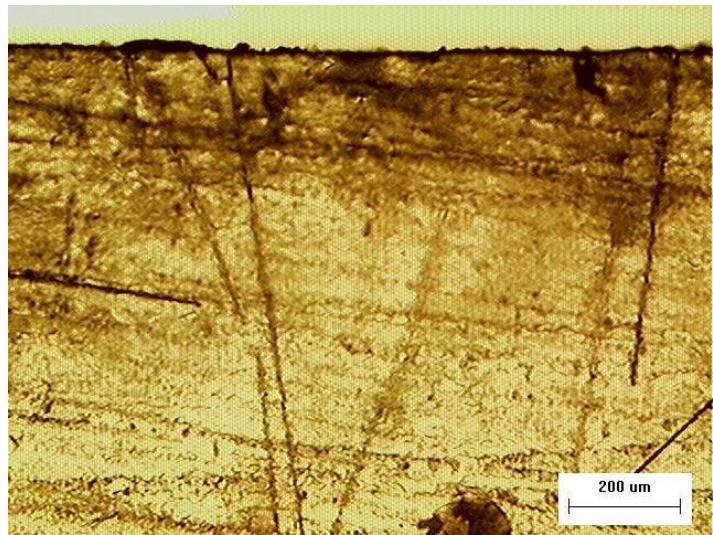
(a)



(b)



(c)



(d)

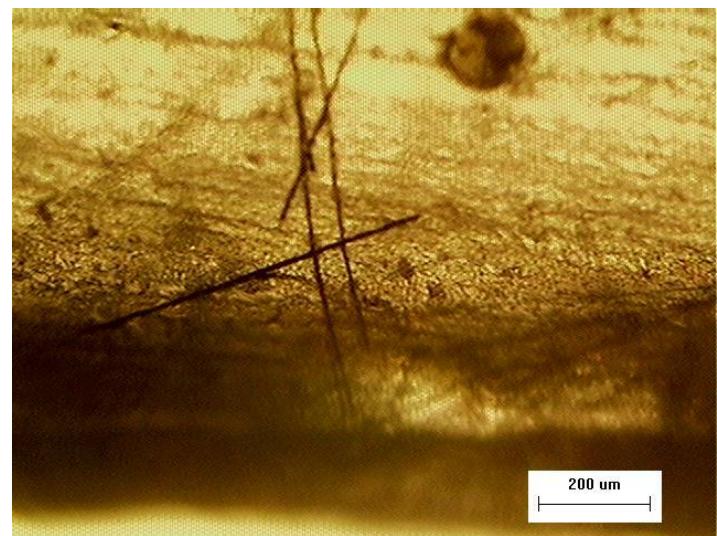
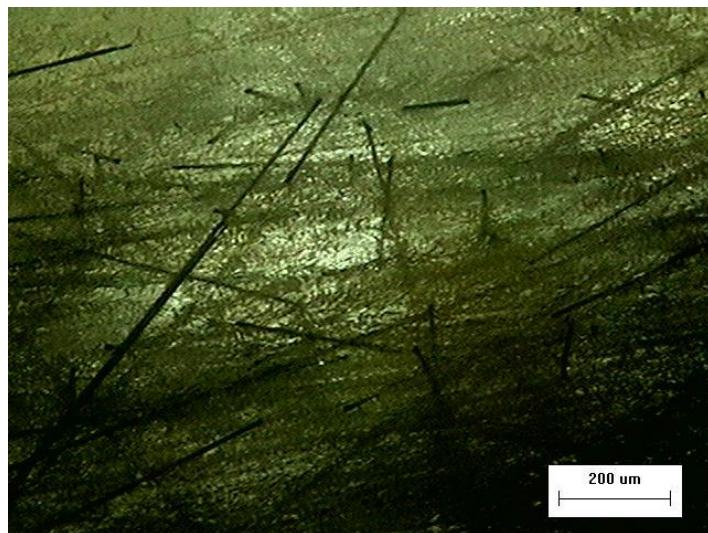


圖 4.12 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應)  
鍍鎳碳纖維 0.4wt% + 環氧樹脂，纖維長度 2mm，直徑  $10\text{ }\mu\text{m}$ ，試片尺寸(63mm  
 $\times$ 54mm $\times$ 2mm)，磁通量密度 0.069Tesla，圖 (b) ~ (d): 50x。

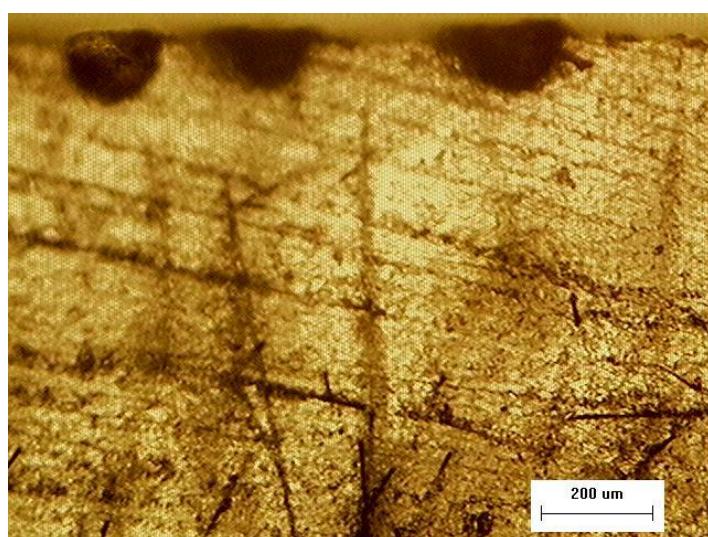
(a)



(b)



(c)



(d)

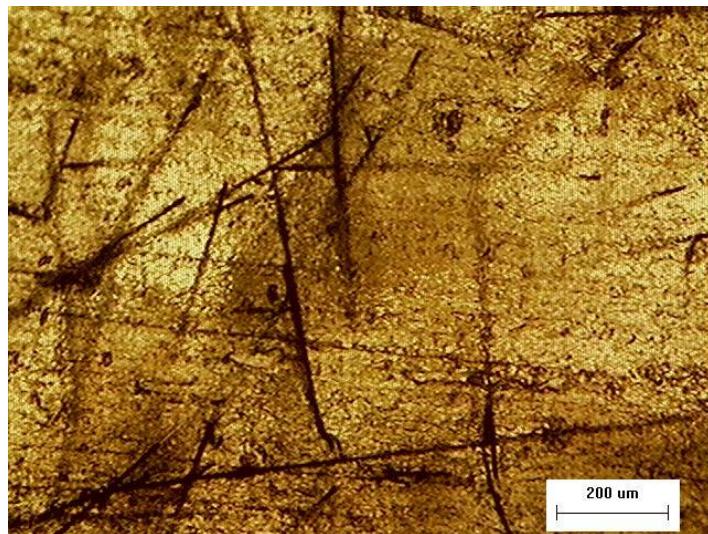


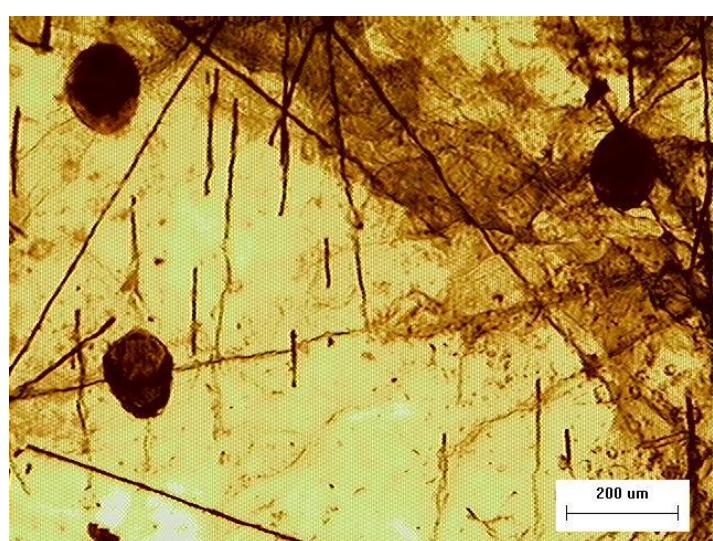
圖 4.13 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應)

鍍鎳碳纖維 0.6wt% + 環氧樹脂，纖維長度 2mm，直徑  $10\ \mu\text{m}$ ，試片尺寸(63mm  $\times$  54mm  $\times$  2mm)，磁通量密度 0.069Tesla，圖 (b) ~ (d): 50x。

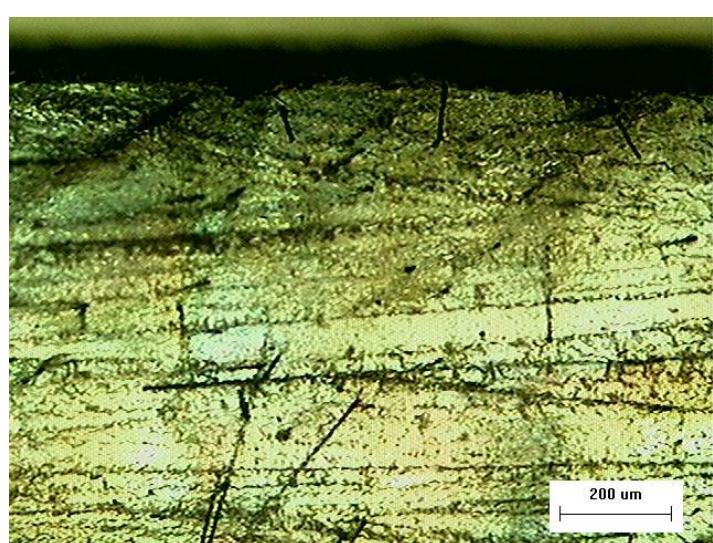
(a)



(b)



(c)



(d)

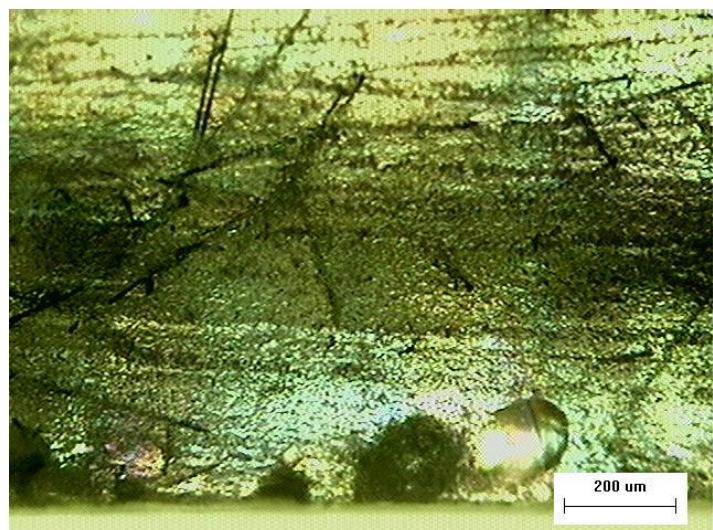
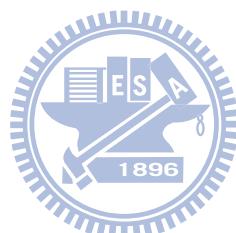


圖 4.14 磁場誘發纖維配向處理試片圖(未含冷卻系統、未含邊緣效應)  
鍍鎳碳纖維 0.8wt% + 環氧樹脂，纖維長度 2mm，直徑  $10\ \mu\text{m}$ ，試片尺寸(63mm  
 $\times$ 54mm $\times$ 2mm)，磁通量密度 0.069Tesla，圖 (b) ~ (d): 50x。



### 4.3.2 電磁場誘發纖維配向穿透導電性量測結果

本研究在電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向穿透導電性佐證實驗量測數據結果如附錄六、附錄七所示，其量測試片與實驗參數如圖 4.15、4.16、4.19 所示。由於鍍鎳碳纖維未經磁場處理其試片所量測的穿透導電性數據變化太大，不易觀察出其導電性分佈特性，相對於經過磁場誘發鍍鎳碳纖維配向之試片穿透導電性量測結果，有明顯的導電性分佈特性，於是本研究將對其穿透導電性實驗結果進行說明。

圖 4.17，黃色部分為纖維長度 1mm 未經磁場處理，不同纖維含量試片，可量測到導電性的試片之數目。黃色部分，其可量測到的試片數目有隨纖維含量百分比提升而遞增趨勢，其最高可量測到的試片數目百分比(19/64)為 29.68%。紅色部分為經過磁場處理，纖維長度 1mm，0.5wt% 可量測到導電性的試片數目，該組試片可量測到的試片數目百分比(54/64)為 84.37%。圖 4.18，綠色線條部分是纖維長度 1mm，0.5wt% 經過磁場處理，53 片試片之導電性量測結果，並以每 25 歐姆為一個區間量測到之試片數目對應圖，由藍色虛線分佈區域觀察得知，大部分量測到的試片導電性，在其實驗參數下，導電性都在 100 歐姆以下。其中又以 25-50 歐姆所佔的比例最高(13/64)為 20.3%。

圖 4.20，紅色部分是纖維長度 2mm，0.4wt% 經磁場處理，48 片試片之導電性量測結果，並以每 5 歐姆為一個區間量測到之試片數目對應圖，其可量測到的試片數目百分比(48/48)為 100%，且都在 25 歐姆以下其中又以 5 歐姆以下所佔的比例最高(26/48)為 54.16%，其次是 5-10 歐姆所佔的比例(8/48)為 16.6%。圖 4.21，藍色部分是纖維長度 2mm，0.6wt% 經磁場處理，48 片試片之導電性量測結果，並以每 25 歐姆為一個區間量測到之試片數目對應圖，其可量測到 125 歐姆以下的試片數目百分比(36/48)為 75%，其中又以 25-50 歐姆所佔的比例最高(18/48)為 37.5%。圖 4.22，綠色部分是纖維長度 2mm，0.8wt% 經磁場處理，48 片試片之導電性量測結果，並以每 50 歐姆為一個區間量測到之試片數目對應圖，其可量測到 250 歐姆以下的試片數目百分比(35/48)為 72.9%，其中又以 0-50 歐姆所佔的比例最高(26/48)為 54.1%。

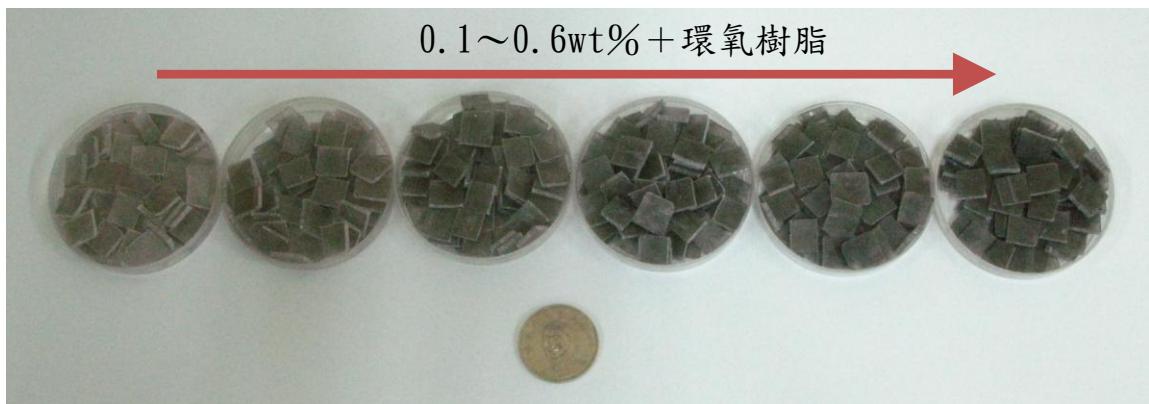


圖 4.15 穿透導電性量測試片實體圖(未經磁場處理、纖維長度 1mm)  
鍍鎳碳纖維長度 1mm，0.1~0.6wt% + 環氧樹脂，試片尺寸( $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 2\text{mm}$ )，每一組共 64 片。



圖 4.16 穿透導電性量測試片實體圖(經磁場處理、纖維長度 1mm)  
鍍鎳碳纖維長度 1mm，0.5wt% + 環氧樹脂，試片尺寸( $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 2\text{mm}$ )，磁  
通量密度 0.069Tesla，共 64 片。



圖 4.17 不同纖維含量穿透導電性可量測之試片數目分佈圖

鍍鎳碳纖維長度 1mm，0.1~0.6wt% + 環氧樹脂，扭矩(250kgf-cm)，量測時間(30sec)，取最小值(黃色部分)。

鍍鎳碳纖維長度 1mm，0.5wt% + 環氧樹脂，磁通量密度 0.069Tesla，扭矩(250kgf-cm)，量測時間(30sec)，取最小值(紅色部分)。

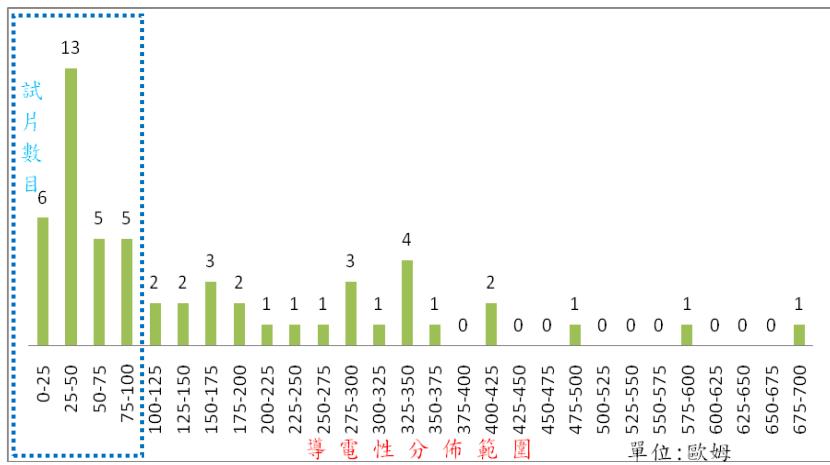


圖 4.18 0.5wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果

鍍鎳碳纖維長度 1mm，0.5wt% + 環氧樹脂，磁通量密度 0.069Tesla，扭矩(250kgf-cm)，量測時間(30sec)，取最小值。

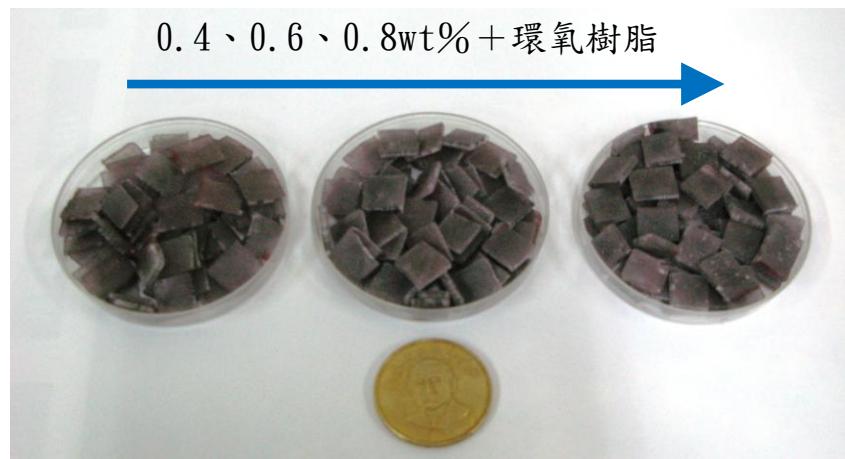


圖 4.19 穿透導電性量測試片實體圖(經磁場處理、纖維長度 2mm)  
鍍鎳碳纖維長度 2mm, 0.4、0.6、0.8wt% + 環氧樹脂，試片尺寸(10mm×10mm×2mm)，磁通量密度 0.069Tesla，每一組共 48 片。



圖 4.20 0.4wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果  
鍍鎳碳纖維長度 2mm, 0.4wt% + 環氧樹脂，磁通量密度 0.069Tesla，扭矩(250kgf-cm)，量測時間(30sec)，取最小值。

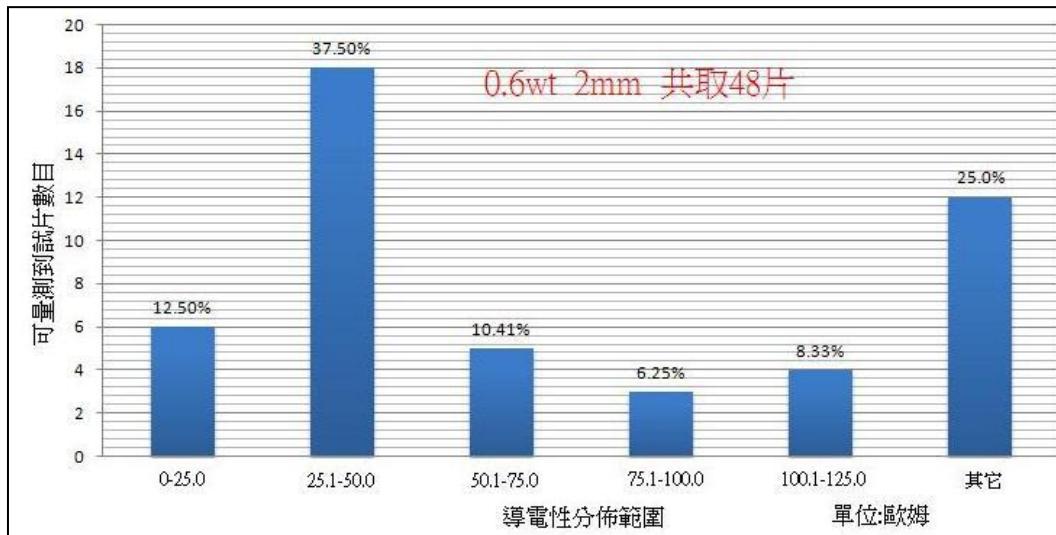


圖 4.21 0.6wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果

鍍鎳碳纖維長度 2mm，0.6wt%+環氧樹脂，磁通量密度 0.069Tesla，扭矩 (250kgf-cm)，量測時間(30sec)，取最小值。



圖 4.22 0.8wt%+環氧樹脂經磁場處理穿透導電性量測結果

鍍鎳碳纖維長度 2mm，0.8wt%+環氧樹脂，磁通量密度 0.069Tesla，扭矩 (250kgf-cm)，量測時間(30sec)，取最小值。

## 4.4 雙極材料功能性檢測結果與討論

### 4.4.1 平面導電性與熱性質分析

在平面導電性量測部分，本實驗使用四點探針進行平面導電性量測。由於經過電磁場誘發纖維配向實驗與穿透導電性量測結果得知，纖維長度 2mm 在其配向成形參數下所得的穿透導電性是最佳的，於是量測 0.4、0.6、0.8wt% 三種不同纖維含量其試片平面導電性，每組參數共取六片並與已商品化的雙極板材料石墨板進行比較，量測結果如圖 4.23 所示。由於所使用的纖維含量已經遠低於未經過配向處理構成導電的最低臨界值，所以對於其參數配向後的平面導電性量測結果是偵測不到的(超過 200M 歐姆)。對於已商品化石墨材料其平面導電性量測結果是通過美國能源局公佈標準，遠小於  $0.01\Omega \cdot cm$ 。

複合材料熱裂解溫度分析是採用熱重分析儀(Thermogravimetry Analysis)進行分析，判定其材料配方在質子交換膜燃料電池工作溫度下( $60-100^{\circ}C$ )是否有熱裂解的現象產生。裂解溫度點之量測是取約 5mg 樣品，以  $20^{\circ}C/min$  之升溫速率升溫至  $900^{\circ}C$ ，並在氮氣的氣氛下進行實驗。起始裂解溫度點之定義，一般取原始樣品重量損失的 5% 之位置為該測試樣品之起始裂解溫度點。圖 4.24 為 0.4wt% 纖維加環氧樹脂之重量分析曲線，由圖中可以明顯的看出其樣品在約  $170^{\circ}C$  後有明顯的裂解的現象產生，但根據裂解點溫度定義其裂解溫度約在  $213^{\circ}C$  已經遠高於燃料電池的工作溫度需求。

纖維含量(wt%)	0.4	0.6	0.8	石墨板
纖維長度(mm)	2.0	2.0	2.0	
磁通量密度 (Tesla)	0.069	0.069	0.069	
量測導電值 ( $\Omega \cdot cm$ )	>200M	>200M	>200M	

圖 4.23 纖維配向後平面導電性量測結果

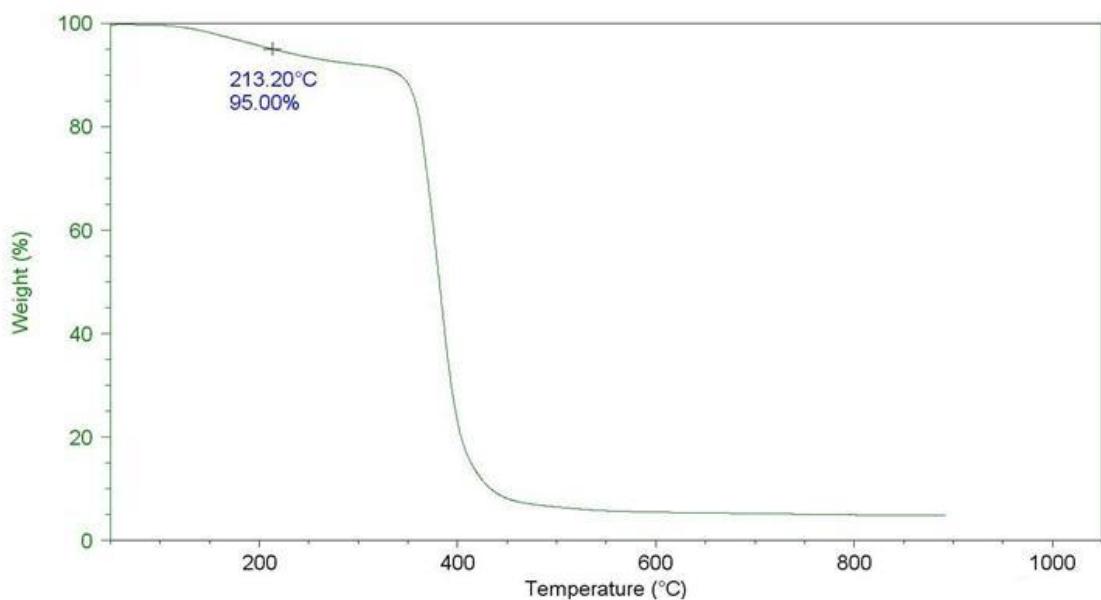


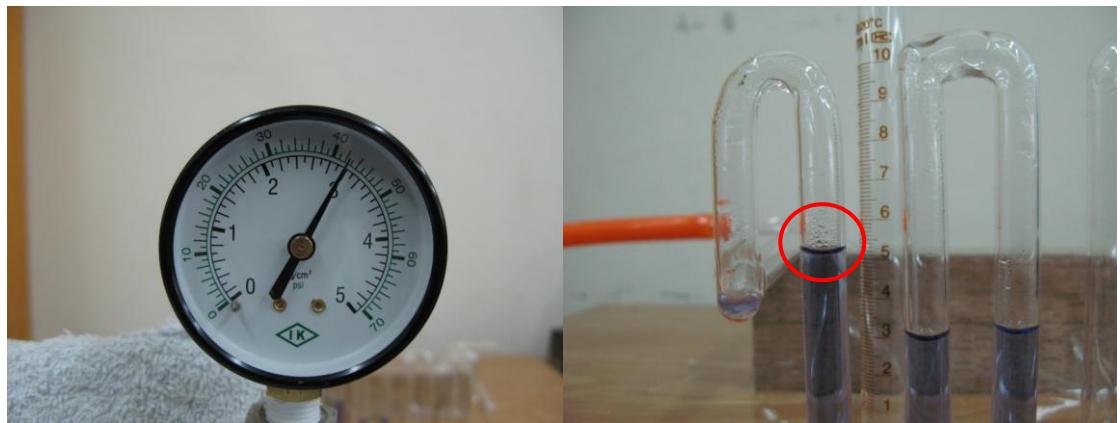
圖 4.24 纖維 0.4wt%+環氧樹脂熱重分析曲線

#### 4.4.2 氣體滲透率與腐蝕分析

本實驗雙極板氣體滲透率量測是採用自製設備進行量測，並以玻璃試管觀察其氣體滲透量。I. U. Hwang 等人使用  $3\text{ kg/cm}^2$  空氣壓力進行碳纖維環氧樹脂複合材料雙極板氣體滲透率量測[12]。雙極板氣體滲透率測試參數與空氣滲透量觀察，如表 4.1 圖 4.25 所示。從實驗數據觀察得知鍍鎳碳纖維纖維 0.8wt% 長度 2mm 加環氧樹脂複合材料，其氣體滲透率  $1.441574533 \times 10^{-9}\text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$  已經遠低於美國能源局對於燃料電池雙極板氣體滲透率標準值  $2.0 \times 10^{-8}\text{ m}^3\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ，因此其複合材料的選擇對於燃料電池雙極板的應用具有一定的可行性。因此其實驗結果也驗證了纖維與樹脂之間的黏結具有一定的程度，並沒有因為纖維與樹脂之間的黏結力不足造成多餘的孔隙讓氣體滲透。

在腐蝕分析中，本實驗使用 Jiehan 5600 electronchemical workstation 進行電化學反應測試，並以  $0.5M\text{ H}_2\text{SO}_4$  為電解液[32]，試片規格為  $20 \times 20\text{ mm}$ ，圖 4.26 為纖維 0.5wt% 加環氧樹脂經由恆電位儀所量測到的極化曲線。在圖形上方的直線區域稱為塔弗直線區域(Tafel region)，從兩直線的曲線切線交點位置，反應速率為最大值，對應至縱軸即為腐蝕電流，腐蝕電流越大表示其材料腐蝕速率越快，對應至橫軸即為腐蝕電位，腐蝕電位越大表示活性越低越不易被腐蝕；反之則較易腐蝕。從圖 4.26 陰、陽極化曲線之交點所對應的腐蝕電流與腐蝕電位，其腐蝕電流約為  $3.689 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ ，腐蝕電位約為 -1.039 v。美國能源局對於燃料電池雙極板在腐蝕電流必須小於  $16 \times 10^{-6}\text{ A/cm}^2$ ，因此鍍鎳碳纖維環氧樹脂複合材料在抗腐蝕性的表現，依然是通過標準的。

(a)



(b)

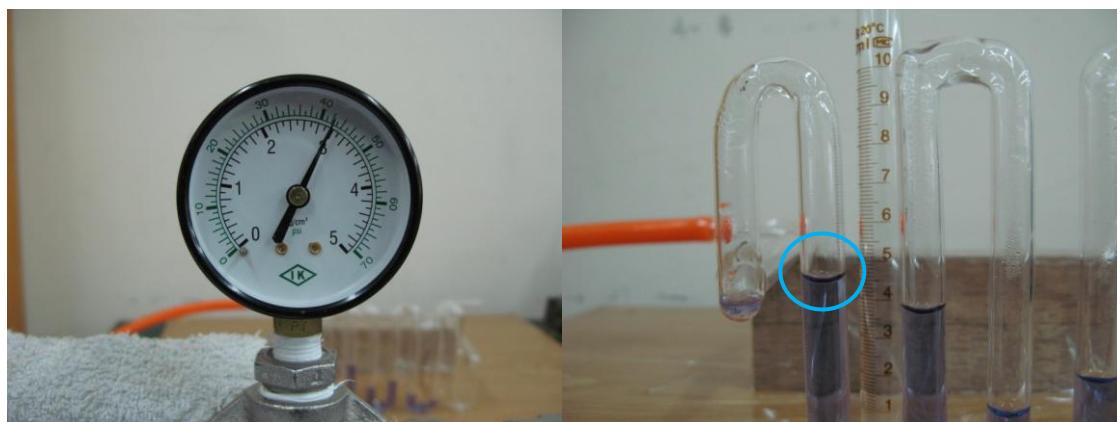


圖 4.25 0.8wt%+環氧樹脂氣體滲透量

圖(a)為 2010/03/09 上午 10:19:16 所觀測到的水柱高度約 51mm，錶壓約  $3 \text{ kg/cm}^2$ ，室內溫度  $19^\circ\text{C}$ 。

圖(b)為 2010/03/13 下午 04:35:30 所觀測到的水柱高度約 44mm，錶壓約  $3 \text{ kg/cm}^2$ ，室內溫度  $19^\circ\text{C}$ 。

表 4.1 雙極板氣體滲透率測試參數

測試參數	纖維: 0.8wt%、2.0mm 鐵壓: 3 kg/cm <sup>2</sup>
室內溫度	19°C
檢測時間	367220 sec
玻璃管內徑	約 7.70mm
位移量	約 7mm
法蘭墊片內徑	28mm
氣體滲透率	$1.441574533 \times 10^{-9} m^3 m^{-2} s^{-1}$

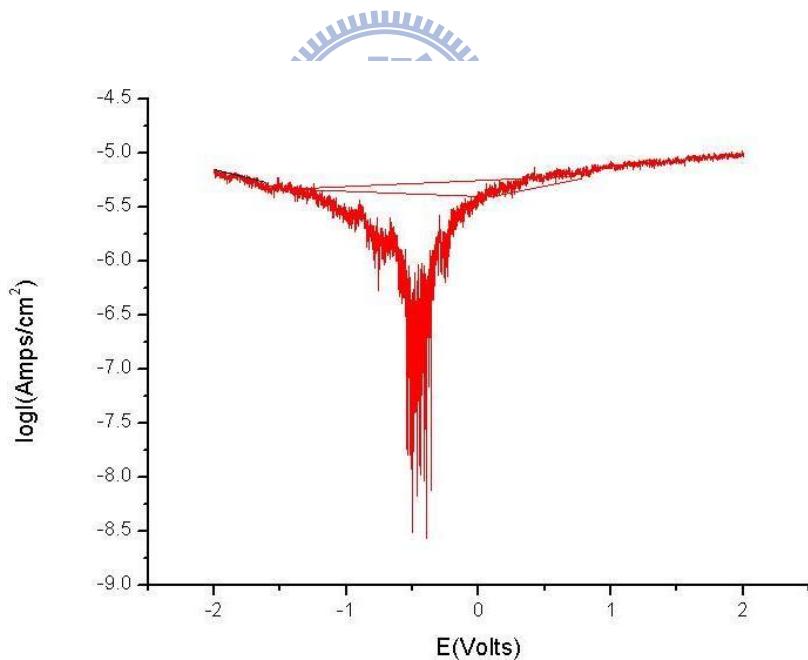


圖 4.26 0.5wt%+環氧樹脂 恒電位儀量測之極化曲線

## 4.5 單一電池發電性能結果與討論

本研究在做完外場誘發鍍鎳碳纖維配向於環氧樹脂材料實驗與材料功能性檢測後，初步評估其複合材料成形方法與導電性能對於燃料電池雙極板的作用需求具有一定的可行性。使用含量 0.4wt% 鍍鎳碳纖維，纖維長度 2mm 配向於環氧樹脂材料中，其單一極板穿透導電性約在  $10\Omega \cdot cm$ ，平面導電性超過 200 百萬歐姆，石墨雙極板平面導電性約  $0.0016\Omega \cdot cm$ 。在其雙極板成形完成後，使用銑床進行流場加工，並與石墨雙極板進行發電性能比較。單一電池雙極板流場與端板設計圖如附錄八所示，圖 4.31 為複合材料加工後雙極板之實體圖，圖 4.32 為石墨材料加工後雙極板之實體圖，圖 4.33 為單一電池組裝完成實體圖，圖 4.34 是單一電池整體接觸阻抗和固定螺絲扭力值之關係，表 4.2 為雙極板流場設計參數與單一電池發電性能執行參數。

石墨雙極板燃料電池在給予 70kgf-cm 固定螺絲後，其整體接觸阻抗約在  $30\Omega \cdot cm^2$ ，在經過 5 小時系統活化處理後其開迴路電壓(OCV)約在 0.84 伏特，由於雙極板流場設計與系統整體組裝接觸阻抗等問題的影響，造成其開迴路電壓並沒有達到理論輸出值 1.23 伏特。在複合材料雙極板給予 50kgf-cm 固定螺絲後，其整體接觸阻抗約在  $53\Omega \cdot cm^2$  相對於石墨雙極板明顯的高出很多，其開迴路電壓約在 0.78 伏特明顯得比石墨板少許多。從圖 4.27 石墨板極化曲線與圖 4.29 複合材料極化曲線圖比較結果得知，由於複合材料雙極板穿透電阻值遠大於石墨雙極板穿透電阻值，造成在電極所產生的電子都被雙極板的歐姆阻抗所損耗，只剩下極少量的電流被傳輸到端板，對其系統發電性能產生相當不利之影響。從圖 4.28 石墨雙極板與圖 4.30 複合材料系雙極板系統電流密度與功率密度圖比較結果得知，複合材料雙極板所產生的最大功率密度  $2.1mW$  約只有石墨雙極板的百分之一。因此對於真實商業化燃料電池雙極板產品應用，其複合材料穿透導電性能需求還有很大的進步空間。

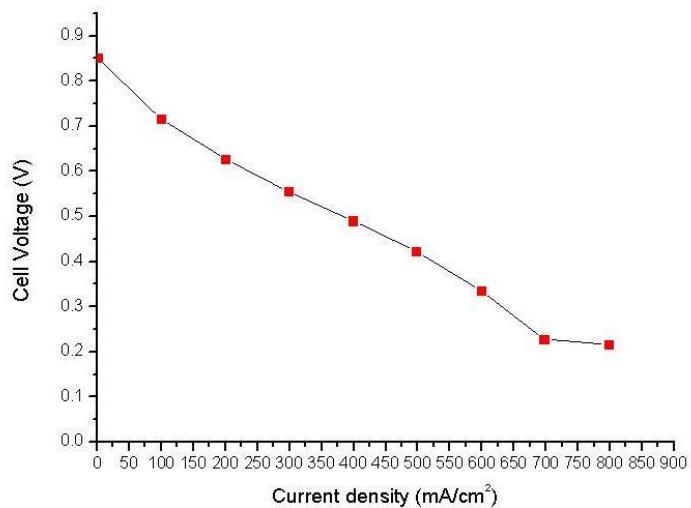


圖 4.27 石墨材料雙極板發電性能量測結果極化曲線圖

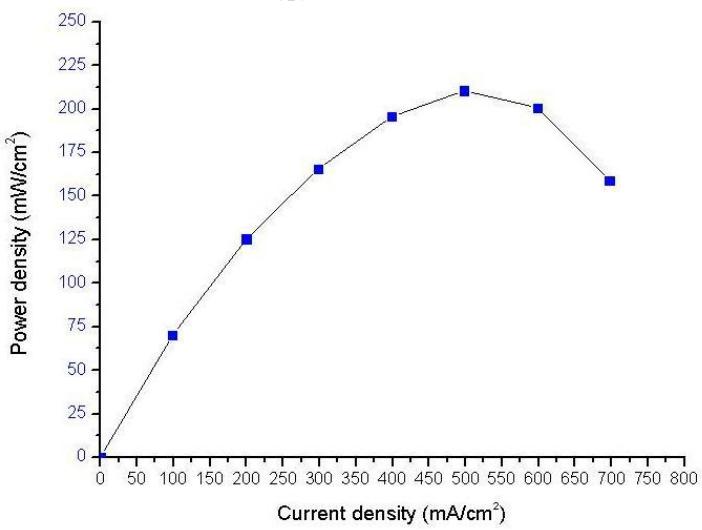


圖 4.28 石墨材料雙極板發電性能量測結果 I-P 曲線圖

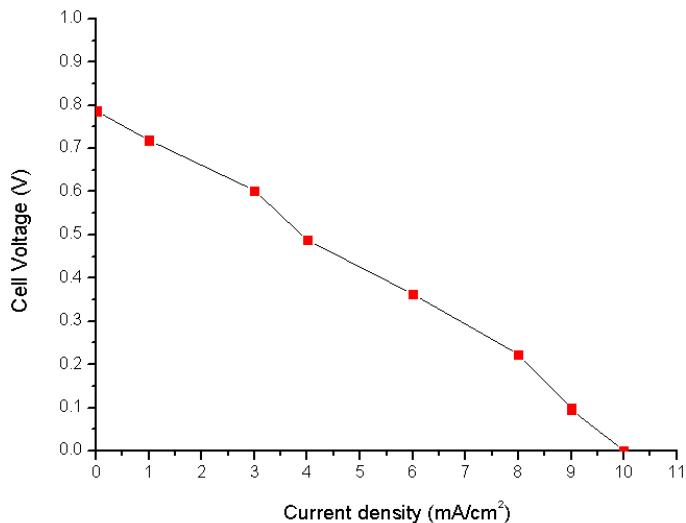


圖 4.29 複合材料雙極板發電性能量測結果極化曲線圖

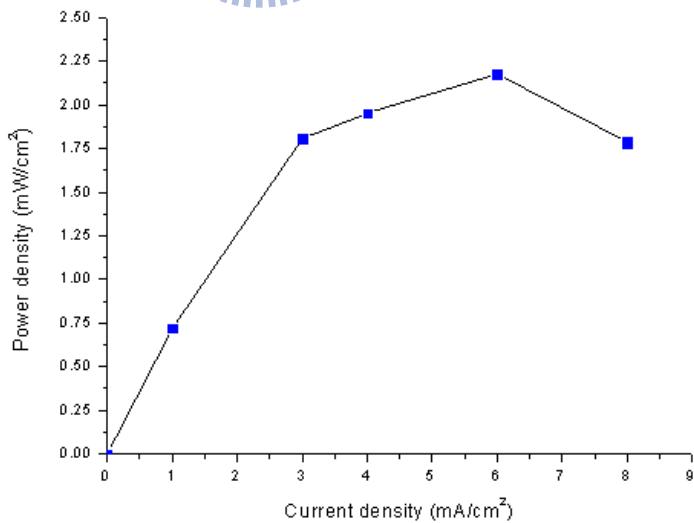
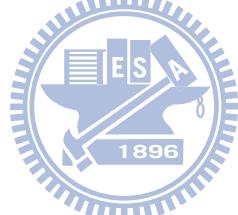


圖 4.30 複合材料雙極板發電性能量測結果 I-P 曲線圖



圖 4.31 纖維含量 0.4wt% 加工後雙極板之實體圖



圖 4.32 石墨材料加工後雙極板之實體圖



圖 4.33 單一電池組裝完成實體圖

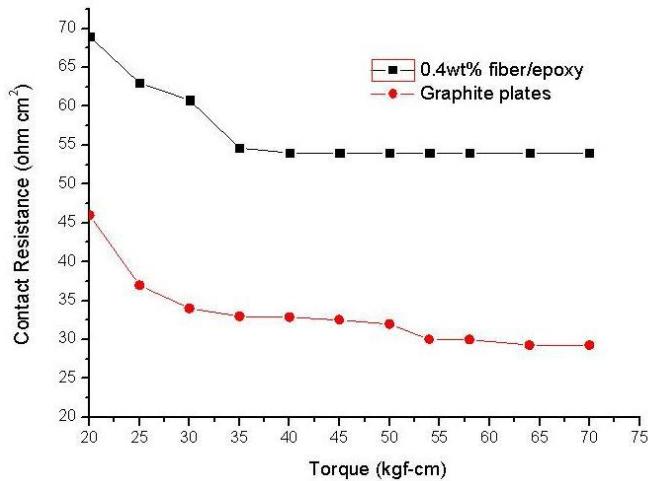


圖 4.34 單一電池整體接觸阻抗和固定螺絲扭力值之關係

表 4.2 雙極板流場設計參數與單一電池發電性能執行參數

流場設計	蛇形流場 開孔率：60% 肋條寬度：1mm 肋條深度：1mm
MEA 型式與 Pt 含量	五層 MEA(含氣體擴散層) 未含氣體擴散層厚度：0.25mm Pt 含量(陽極： $0.2\text{ mg/cm}^2$ 陰極： $0.6\text{ mg/cm}^2$ ) 反應面積： $1\text{ cm}^2$
空氣流量與溫度	相對濕度：100% 流量：100 sccm 溫度： $65^\circ\text{C}$
氮氣流量與溫度	相對濕度：100% 流量：20 sccm 溫度： $65^\circ\text{C}$
電池作用溫度	$25^\circ\text{C}$
端板材料	黃銅板
絕緣墊片	直徑 8mm 厚度 5mm 電木條
氣密墊片	軟質鐵弗龍墊片
固定螺絲	M4×50mm 內六角不鏽鋼螺絲

## 第五章 結論與建議

### 5.1 結論

#### 5.1.1 外場誘發纖維配向

##### 電場部分

本研究對於電場誘發鍍鎳碳纖維配向控制之實驗其結果與預期的有所出入，在根據其不同參數之實驗結果歸納出了以下幾點結論：

1. 對於使用未含絕緣層電場誘發鍍鎳碳纖維配向控制，在其纖維長度(3mm)、電場強度(100V/mm)、試片厚度(10mm)與該黏度環氧樹脂等實驗參數下，並沒有誘發纖維配向的情況產生，且已經有電蝕作用與鍍鎳碳纖維往電場陽極側方向聚集的現象產生。
2. 對於使用含絕緣層電場誘發鍍鎳碳纖維配向控制，在其纖維長(1mm)、電場強度(500V/mm)、試片厚度(2mm)與該黏度環氧樹脂等實驗參數下，並沒有誘發纖維配向與聚集的現象產生。
3. 電蝕作用有助於鍍鎳碳纖維的聚集作用，但還是沒有達到其纖維配向之預期目標。對於要同時解決電蝕作用與完成其纖維配向之控制可能是個困難點，如何使其纖維產生配向與聚集的現象產生，可能在電場處理過程中需要電荷傳遞的媒介，使其纖維滿足電泳特性完成聚集與配向。
4. 在使用電場誘發鍍鎳碳纖維聚集與配向，其纖維長度、試片厚度與其纖維含量之間的關係也是一個重要考量，在不產生電荷累積與轉移下其電蝕作用是不易產生的。
5. 使用電場誘發鍍鎳碳纖維配向於環氧樹脂控制處理，其方法對於真實高導電性性能需求產品的量產是較不適宜的。

## 磁場部分

本研究對於電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向控制之實驗結果已有了明確性的結果，並根據其實驗結果歸納出以下幾點結論：

1. 對於使用電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向控制，在其纖維長度(1mm)、磁通量密度(0.069Tesla)與試片厚度(2mm) 與該黏度環氧樹脂等實驗參下，其鍍鎳碳纖維配向效果已經有了明顯的效果。
2. 磁場邊緣效應與冷卻系統的改善，將有助於鍍鎳碳纖維的配向分散均勻性與產品的完整性。對於改善邊緣效應後的磁場裝置進行磁通量密度分佈量測，其磁通量密度從磁場處理邊緣區域往圓芯方向有明顯的呈梯度遞減。
3. 在纖維長徑比大於等於十時，其纖維沿著垂直磁場轉動能力比沿著磁通量密度呈梯度變化方向位移容易。
4. 對於使用直流磁場誘發鍍鎳碳纖維配向控制其配向分佈觀察得知，其纖維並沒有往單邊場(陽極或陰極)區域聚集的情況產生且分散均勻。驗證了其纖維具備了磁性而無極性。
5. 在使用電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向與聚集，其纖維長度、試片厚度與其纖維含量之間的關係也是一個重要考量，在考慮到其纖維在空間中轉動阻礙與磁場之間的交互作用下，其纖維的配向與聚集必存在著力平衡關係。
6. 在考慮到纖維強化材尺寸配向效果下，電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於高分子材料的發展，是較適用於相對大尺度基材，意即公釐級以上產品的開發與製造。
7. 相較於其他學者過去利用磁場誘發奈米碳管配向控制的研究得知，本研究所使用的磁場能量相對極低，其方法對於真實產品製造而言其可行性是很高的。

### 5.1.2 纖維配向與雙極板導電機制

本研究對於電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於矩型薄板穿透方向，在其環氧樹脂黏度與系統磁通量密度(0.069Tesla)等參數實驗下。對於其纖維不同含量與長度，穿透導電性量測結果已有了明確性的結果，並根據其實驗結果歸納出定性與定量分析結論：

#### 定性分析

1. 在纖維含量 0.5wt%、長度(1mm)、試片厚度 2mm、磁通量密度(0.069Tesla)與該黏度環氧樹脂等實驗參數下，其試片穿透導電性有明顯的提升。在取 64 個試片做穿透導電性量測結果得知，有 45.3% 的試片都在 100 歐姆以下，其中又以 25-50 歐姆所佔有比例最高 20.3%。
2. 雖然其單一纖維長度經配向後，並不足以構成試片穿透方向直接導電，但根據過去磁場誘發奈米碳管配向相關文獻實驗結果得知，纖維之間在磁場處理的過程中會有相互作用力促進連接作用構成導電通路，使試片完成穿透導電通路。
3. 相互作用力的大小，取決於纖維本身導磁係數與外部磁場之間的相互關係。對於試片穿透導電性分佈不均，則與試片內部纖維彼此之間的接觸點與分子間電荷傳遞媒介有關，導致電荷上的轉移產生了難易度，因此相對驗證出其導電性分佈範圍不均現象產生。
4. 在考慮到試片穿透導電性量測結果，試片的硬度、導電纖維接觸點與碳紙的接觸，將會影響穿透導電性量測結果，適當的試片拋光將有效降低接觸阻抗。



#### 定量分析

由於本研究欲成形矩形薄板，在考慮到纖維長度不足以直接構成導電的情況下其穿透導電性並不理想。使用纖維長度(2mm)、試片厚度 2mm、磁通量密度(0.069Tesla)與該黏度環氧樹脂等實驗參數下，進行 0.4、0.6、0.8 等不同纖維重量百分比進行實驗。

1. 隨著纖維含量提升，其試片穿透導電性分佈範圍有明顯增加的趨勢產生，且其纖維配向度也隨著含量的提升而減少。因此在其實驗參數範圍下，其試片最佳穿透導電性約在 1 歐姆，其纖維在完全垂直磁場方向排

列。

2. 使用磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於矩形薄板穿透方向，其纖維長度等於薄板厚度時將可得到最佳穿透導電性。在適當提升系統磁通量密度，將有效提升其纖維配向度與試片穿透導電性。

### 5.1.3 雙極板材料功能性檢測與發電性能量測

本研究對於使用電磁場誘發鍍鎳碳纖維配向於環氧樹脂，其矩形薄板在穿透方向有明顯的導電性提升。於是進行其試片平面導電性、熱性質、氣密與抗腐蝕等性質檢測。在完成其檢測後使用其纖維含量 0.4wt%、長度 2mm、磁通量密度(0.069Tesla)，成形(63x54x2mm)矩形薄板，並與石墨板進行流場加工，在同樣的量測標準下進行 I-V、I-P 曲線性能比較。並從其實驗結果歸納出以下幾點結論：

1. 本研究對於使用鍍鎳碳纖維環氧樹脂複合材料成形燃料電池雙極板，除了平面導電尚未通過要求，其餘材料檢測項目都是通過美國能源局對於雙極板材料的要求。因此對於其複合材料雙極板平面導電性的性能需求還有很大的進步空間。
2. 本研究所使用複合材料雙極板發電功率密度約只有石墨雙極板的 1%， $2.1\text{mW}$ ，其開回路電壓(OCV)也約只有石墨板的 92.85%， $0.78\text{V}$ 。
3. 本研究所使用的複合材料單一雙極板其穿透導電性約只有石墨板的 6000 分之一， $10\Omega \cdot \text{cm}$ ，因此其系統歐姆阻抗是相對太大，造成其系統發電性能不盡理想。由於本研究所使用的複合材料其平面導電性是超過  $200\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$ ，造成此複合材料雙極板構成發電主要還是雙極穿透導電性所提供的導電通路。因此對於燃料電池雙極板而言其穿透導電性能需求比平面導電性能更具重要性。
4. 本研究所使用的鍍鎳碳纖維其導電性能還不足以構成配向後在燃料電池雙極板的性能需求，若使用更高導電性能之纖維配向將有助於雙極板的穿透導電性。
5. 使用導電纖維配向於燃料電池雙極板穿透方向，提高其穿透導電性，對於燃料電池雙極板之應用具有一定的可行性。

## 5.2 建議

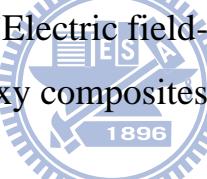
在本研究實驗中，尚有些待改進與檢討的地方列舉如下：

1. 改善電磁場磁通量密度分佈的均勻性，以有效提升複材產品的完整性。
2. 選用適宜的模具固定裝置，以增加試片的脫模速度。
3. 選用適宜的高導電纖維配向於雙極板的穿透方向，以達到雙極板的穿透導電性能需求。
4. 對雙極板的表面做鍍層處理，以有效提極板的平面導電性，增加單位面積穿透極板的電流量，期能有效提升燃料電池的發電效率。



## 參考文獻

- [1] 技術在線，2005 年 11 月 07 日，新聞發佈，『成本可削減 40%！三菱重工開發出新一代飛機用 CFRP』
- [2] 技術在線，2009 年 08 月 14 日，新聞發佈，『【熱設計】所有設計人員都應參與熱設計』
- [3] J. K. Kuo, C. K. Chen, “A novel Nylon-6-S316L fiber compound material for injection molded PEM fuel cell bipolar plates” Journal of Power Sources, Vol. 162, pp. 207-214, 2006
- [4] G. Song, Z. Wenting, “Interface of C/Al composite prepared by stir cast ” Journal of Chemical Industry and Engineering(China), Vol. 59, (2008)
- [5] 許明發編著，『複合材料纖維學』，初版，全威圖書有限公司，台北，民國 91 年
- [6] D. N, E.NK, B. E, A. G, “Surface energy and mechanical properties of plasma-modified carbon fibers” Carbon Vol. 33, pp. 853-858, 1995
- [7] P. MCR, B. CA, N. M. Mechanical, “Surface and interfacial characterization of pitch and PAN-based carbon fibers” Carbon Vol. 38, pp. 1323-1327, 2000
- [8] S. J. Park, M.K. Seo, Y. S. Lee, “Surface characteristics of fluorine-modified PAN-based carbon fibers” , Carbon Vol. 41, pp. 723-770, 2003
- [9] 劉國杰主編，『納米材料改性塗料』，第一版，化學工業出版社，北京，民國 97 年 7 月
- [10] 賴耿陽譯著，『碳纖維材料入門』，復漢出版社，民國 72 年 12 月出版
- [11] 台灣新紀元周刊，2009 年 08 月 06 日出刊，『奈米，帶來幸福如意？』
- [12] I. U. Hwang, Ha Na Yu, S. S. Kim, D. G. Lee, J. D. Suh, S. H. Lee, B. K. Ahn, S. H. Kim, T.W. Lim, “Bipolar plate made of carbon fiber epoxy compositie for polymer electrolyte membrane fuel cells” Journal of Power Sources, Vol. 184, pp. 90-94, 2008

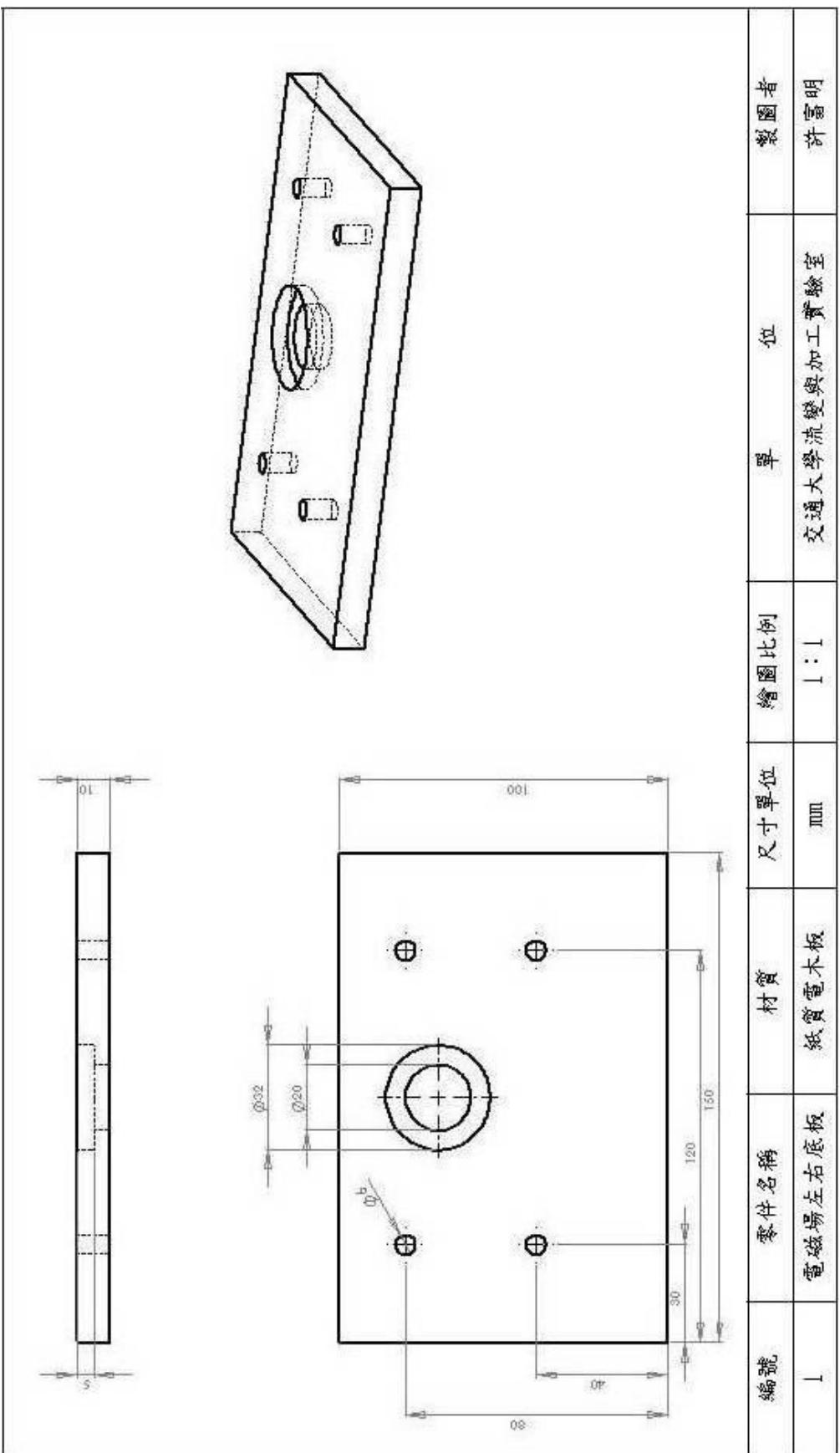
- [13]X.L. Xie, Y. W. Mai, X. P. Zhou, “Dispersion and alignment of carbon nanotubes in polymer matrix : A review” Materials Science and Engineering, Vol. R44, pp. 89-112, 2005
- [14]R. Schueler, J. Petermann, K. Schulte, H.P. Wentzel, “Agglomeration and electrical percolation behavior of carbon black dispersed in epoxy resin” , John Wiley & Sons, Inc., CCC 0021-8995/97/131741-06,1997
- [15]T. Prasse, L. Flandin, K.Schulte, W. Bauhofer, “In situ observation of electric field induced agglomeration of carbon black in epoxy resin” Applied Physics Letters, Vol. 72, Num22, 1998
- [16]M.K. Schwarz, W. Bauhofer, K. Schulte, “Alternating electric field induced agglomeration of carbon black filled resins” , Polymer, Vol. 43, pp. 3079-3082, 2002
- [17]C.A. Martin, J.K.W. Sandler, A.H. Windle, M.-K. Schwarz, W. Bauhofer, K. Schulte, M.S.P. Shaffer, “Electric field-induced aligned multi-wall carbon nanotube networks in epoxy composites” , Polymer,Vol. 46,pp. 877-886, 2005
- 
- [18]C.Park, J. Wilkinson, S. Banda, Z. Ounaies, K. E. Wise, G. Sauti, P. T. Lillehei, J. S, H. Son, “Aligned single-wall carbon nanotube polymer composites using an electric field” Journal of Polymer Science : Part B : Polymer Physics, Vol. 44, pp. 1751-1762, 2006
- [19]D. Shi, P. He, J. Lian, X. Chaud, S. L. Budko, E. Beaugnon, L.M. Wang,R. C. Ewing, R. Tournier, “Magnetic alignment of carbon nanofibers in polymer composites and anisotropy of mechanical properties” Journal of Applied Physics, 97, 064312, 2005
- [20]E. Camponeschi, R. Vance, M. A. Haik, H. Garmestani, R. Tannenbaum, “Properties of nanotube-polymer composites aligned in a magnetic field” Carbon, Vol. 45, pp. 2037-2046, 2007
- [21]B. W. Steinert, D. R. Dean, “Magnetic field alignment and electrical properties of solution cast PET-carbon nanotube composite films” Polymer,

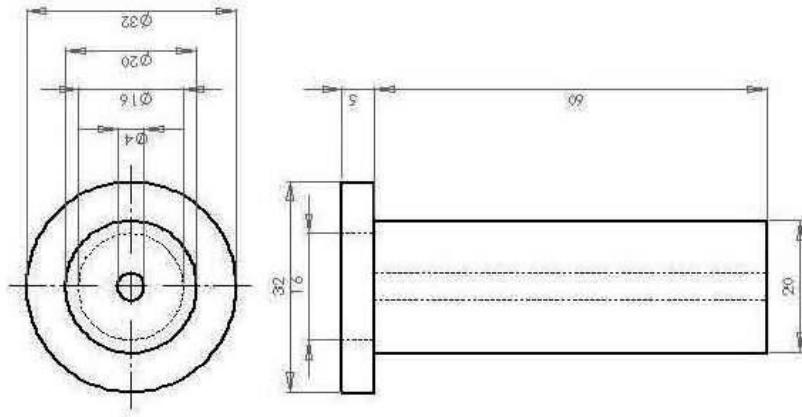
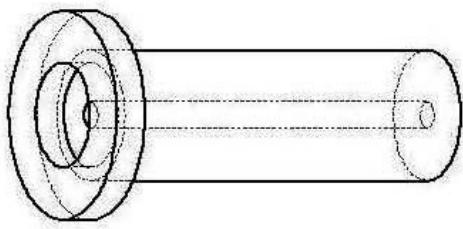
Vol. 50, pp. 898-904, 2009

- [22]E.A. Cho, U.-S. Jeon, H.Y. Ha, S.-A. Hong, I.-H. Oh, “Characteristics of composite bipolar plates for polymer electrolyte membrane fuel cells” Journal of Power Sources, Vol. 125, pp. 178-182, 2004
- [23]D.P. Davies, P.L. Adcock, M. Turpin, S.J. Rowen, “Stainless steel as a bipolar plate material for solid polymer fuel cells” Journal of Power Sources, Vol. 86, pp. 237-242, 2000
- [24]L. Du, S. C. Jana, “Highly conductive epoxy/graphite composites for bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells” Journal of Power Sources, Vol. 172, pp. 734-741, 2007
- [25]張啟陽著，『應用電磁學』，第七版，台灣東華書局股份有限公司，民國 79 年 2 月
- [26]官德樣譯，『電磁學』，第六版，徐氏基金會出版社，民國 74 年 4 月
- [27]婁祥林譯『應用電磁學 上冊』，初版，乾泰圖書有限公司，民國 74 年 8 月
- [28]劉昌煥主編，『電機機械』，二版，台灣東華書局股份有限公司，民國 91 年 8 月
- [29]莊東漢著，『材料分析與實驗檢測』，五南圖書出版股份有限公司，民國 95 年 8 月
- [30]Haynes,Gardner S “Laboratory Corrosion Tests and Standards ” ， Philadelphia , PA : ASTM, c1985
- [31]陽健章，『 $FeCoNiCrAl_{0.5}$ 塊狀高熵合金的環境腐蝕行為之研究』，國立台灣科技大學機械工程研究所碩士論文，民國 98 年 6 月
- [32]S.C.Hui,P. Mu,Y.R.zhang, “Sodium silicate/graphite conductive composite bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells” , Journal of Power Sources, Vol. 162, pp. 460-463, 2006

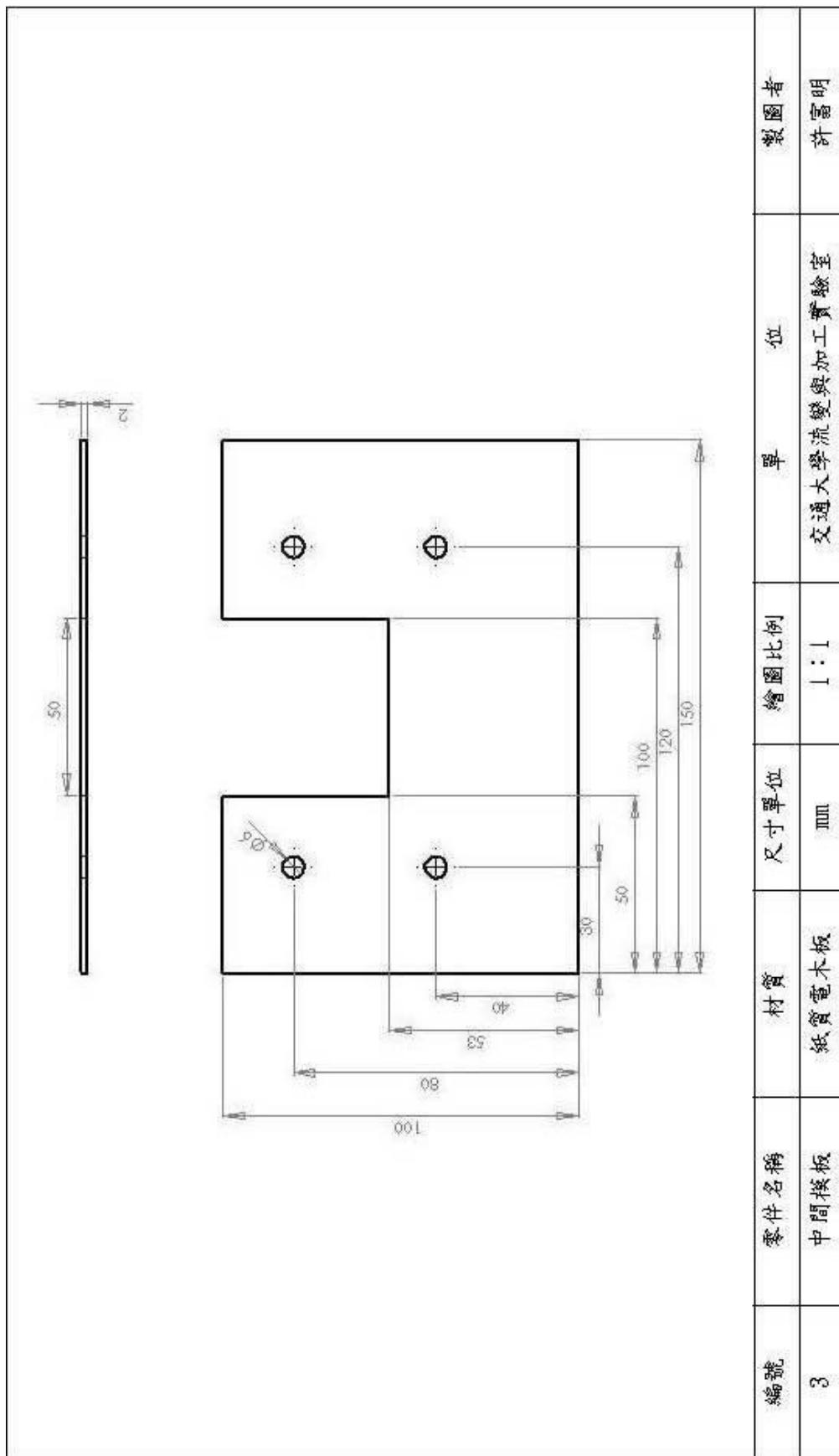


附錄一 電磁場結構設計圖



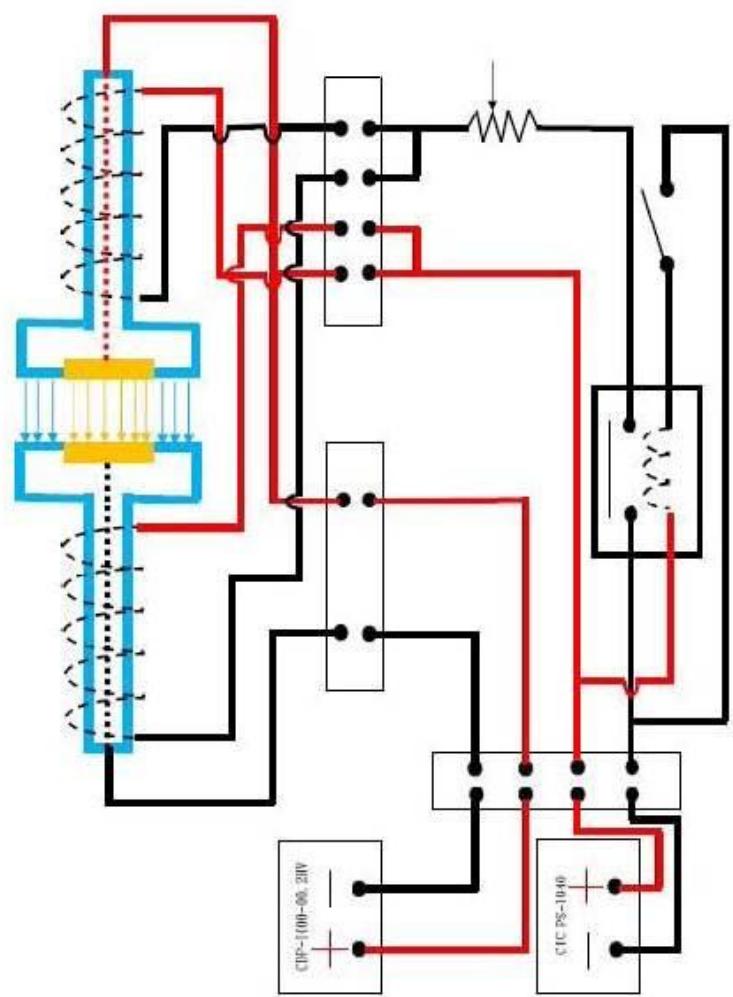


編號	零件名稱	材質	尺寸單位	繪圖比例	單位	製圖者
2	導磁鐵芯	SC15 碳鋼	mm	1 : 1	交通大學流變與加工實驗室	許富明





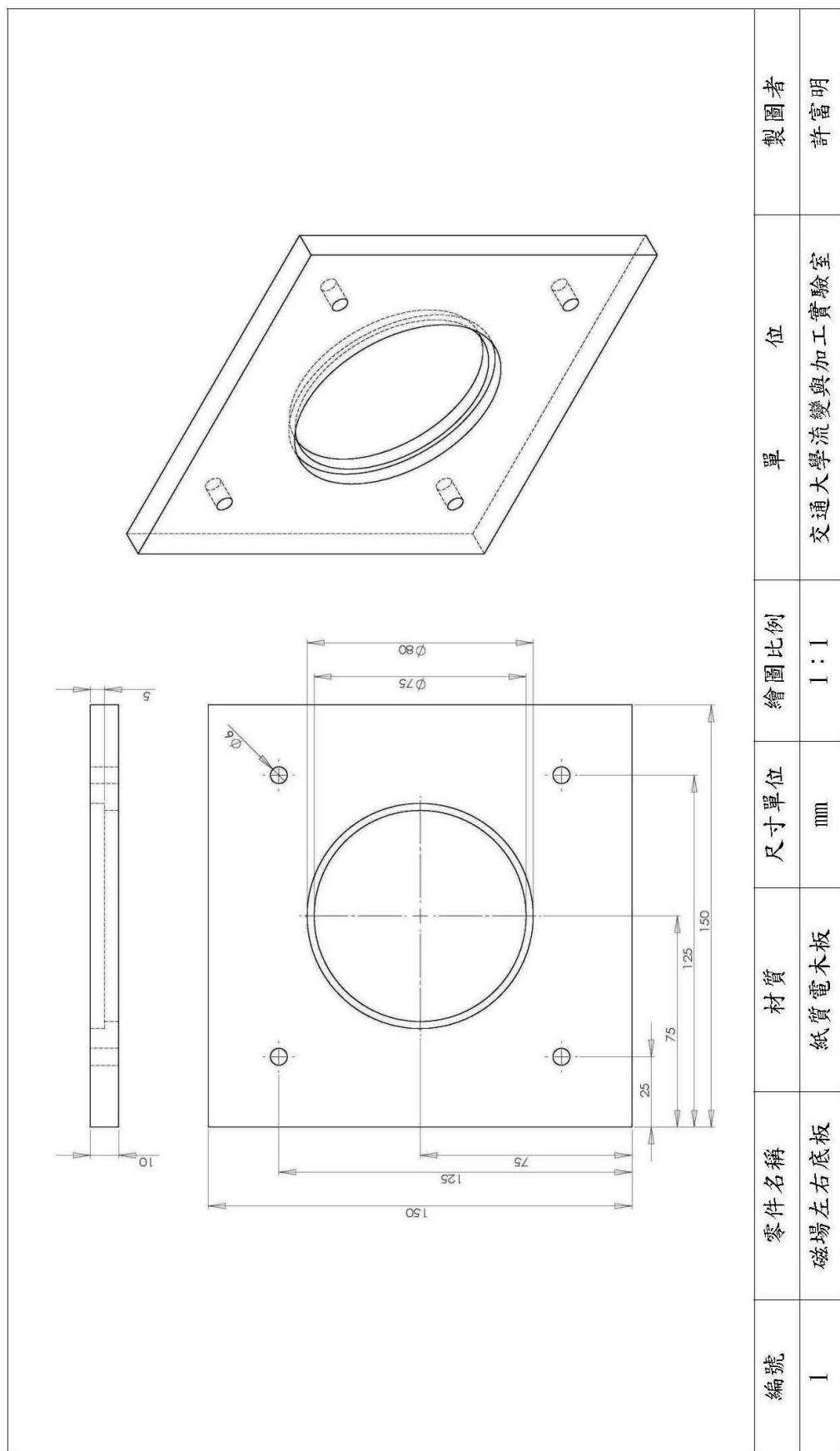
## 附錄二 電磁場產生裝置電路配線圖

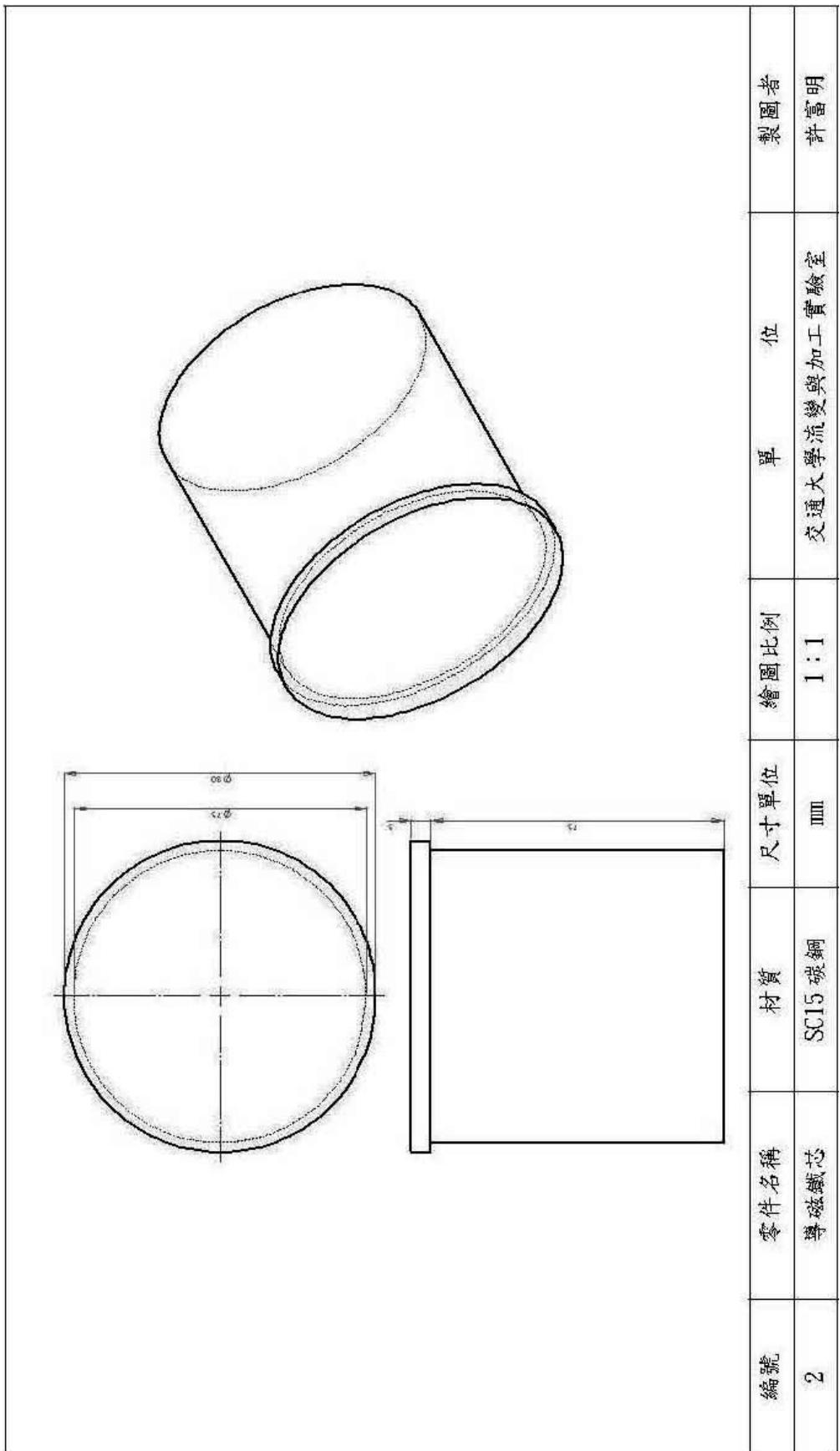


編號	零件名稱	單位	製圖者
1	電磁場產生裝置電路配線圖	交通大學流變與加工實驗室	許富明

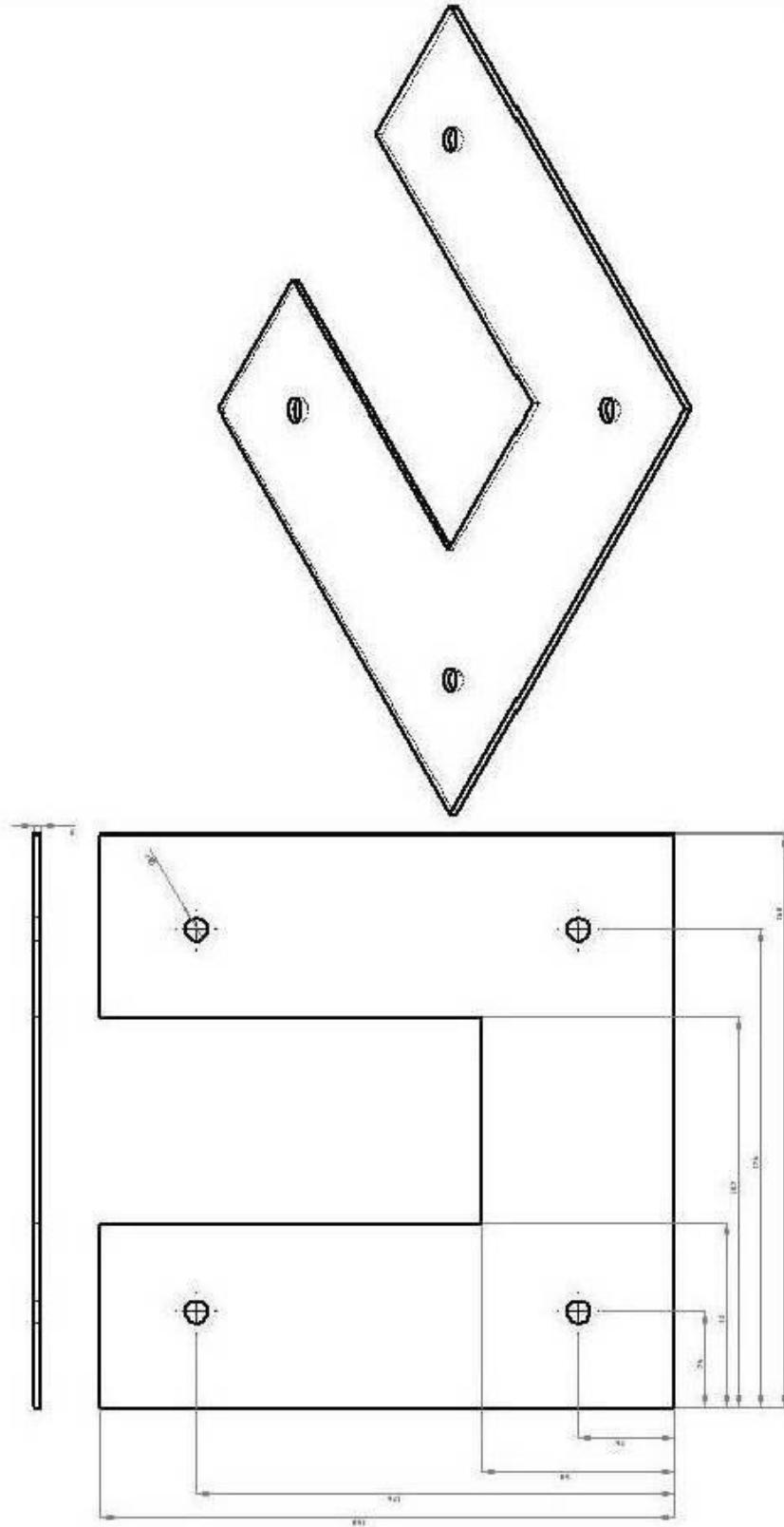


附錄三 磁場結構設計圖





編號	零件名稱	材質	尺寸單位	繪圖比例	單位	製圖者
2	導磁鐵芯	SC15 碳鋼	mm	1 : 1	交通大學流變與加工實驗室	許富明



編號	零件名稱	材質	尺寸單位	繪圖比例	單位	製圖者
3	中間模板	紙質電木板	mm	1 : 1	交通大學流變與加工實驗室	許奮明



#### 附錄四 CIE-3130B 多功能高精度電錶詳細規格

## CIE-3130B 多功能高精度電錶

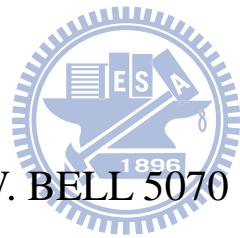
### 特 色

- 4,1/2 位背光液晶顯示、最大讀數 22000
- AC True Rms 真有效值測量
- 類比條碼顯示、讀值快速
- 自動關機功能
- 自動換檔、可選擇手動換檔
- 最大值/最小值鎖定功能
- 電池電力不足警示
- 附強力磁鐵及腳架，適合各種工作環境
- 新式雙色防震鑄模
- 尺寸：165H × 78W × 42.5D / mm
- 多種功能：AC/DC 電壓、AC/DC 電流、電阻、電容、頻率、二極體、導通蜂鳴



### 一般規格

功 能	檔 位	最 小 解 析 度	精 確 度
直 流 電 壓 DCV	220mV/2.2V/22V/220V/1000V	0.01mV	±(0.05%+2dgts)
交 流 電 壓 ACV	220mV/2.2V/22V/220V/750V (50Hz~2kHz)(True Rms)	0.01mV	±(1.2%+5dgts)
直 流 電 流 DCA	220uA/2200uA/22mA/220mA/10A	0.01uA	±(0.5%+2dgts)
交 流 電 流 ACA	220uA/2200uA/22mA/220mA/10A (50Hz~1kHz)(True Rms)	0.01uA	±(1.5%+5dgts)
電 阻 Ω	22Ω/2.2KΩ/22KΩ/220KΩ /2.2MΩ/22MΩ/220MΩ	0.01Ω	±(0.5%+5dgts)
電 容 F	22nF/220nF/2.2uF/22uF/220uF /2.2mF/22mF	1pF	±(3.0%+5dgts)
頻 率 Hz	2Hz~22MHz	0.01Hz	±(0.1%+1dgts)
導 通 蜂 鳴	400Ω < 25Ω 響 聲	1Ω	
二 極 體	測試電流 = 1mA 開路電壓約 2.0V	0.01V	±(3.0%+3dgts)



附錄五 F.W. BELL 5070 高斯計詳細規格

## 5000 Series Hand-held Gaussmeters

<b>Model</b>	<b>5060</b>	<b>5070</b>	<b>5080</b>
<b>Probe Included</b>	Yes	Yes	Yes
<b>Auto Zero</b>	Yes	Yes	Yes
<b>Min/Max Hold</b>	-	Yes	Yes
<b>True RMS</b>	-	Yes	Yes
<b>Auto Range</b>	-	Yes	Yes
<b>True Peak Hold</b>	-	-	Yes
<b>Relative Mode</b>	-	-	Yes
<b>Outputs (Analog)</b>	-	-	Yes
<b>Communication Port</b>	-	-	Yes

<b>Model</b>	<b>5060</b>	<b>5070</b>	<b>5080</b>
<b>Basic Accuracy</b>	4%	2%	1%
<b>Frequency Bandwidth</b>	dc	dc - 10 kHz	dc - 20 kHz
<b>Sampling Rate</b>	-	10/sec	10/sec
<b>Ranges</b>	(2)	(2)	(3)
Low Range	2 kG	200 G	300 G
Mid Range	-	2 kG	3 kG
High Range	20 kG	20 kG	30 kG
<b>Resolution</b>			
<b>Low Range</b>	1.0 G (100 uT)	0.1 G (10 uT)	0.1 G (10 uT)
Mid Range	-	1.0 G (100 uT)	1.0 G (100 uT)
High Range	10 G (1 mT)	10 G (1 mT)	10 G (1 mT)
<b>Display</b>	LCD	LCD	LCD
<b>Digits</b>	3 1/2	3 1/2	3 3/4
<b>Readings</b>	Gauss Tesla	GaussTesla Ampere/Meters	GaussTesla Ampere/Meters
<b>Analog Output</b>	-	-	<u>3V F.S.</u>
<b>Communication Port</b>	-	-	RS-232

附錄六 0.1~0.6wt%纖維長度1mm+環氧樹脂穿透導電性量測結果



試片 纖維 含量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	48	47	48	
49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64									
0.1	∞	0.20	∞	∞	0.05	∞	∞	∞	0.30	∞	∞	∞	0.88	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
Wt %	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	
0.2	∞	0.30	∞	∞	0.04	∞	∞	∞	0.201	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	117.	∞	
Wt %	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	6		
0.3	∞	0.35	∞	∞	0.04	∞	∞	∞	0.41K	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	1.18	0.58	
Wt %	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	26K	29K	
0.4	∞	0.40	∞	∞	0.04	∞	∞	∞	0.46	∞	∞	∞	∞	0.15	0.48	0.62								
Wt %	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	15	57K	98K	73K							
0.5	∞	0.49	∞	∞	0.04	∞	∞	∞	0.49	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞		
Wt %	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞		
0.6	∞	0.58	∞	∞	0.04	∞	∞	∞	0.50	∞	∞	∞	∞	0.15	0.52	0.60	∞	∞	∞	∞	∞	∞	117.	
Wt %	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	85K	38K	59K						6		

				</																	

K：千歐姆 M：百萬歐姆  $\infty$ ：超過 220M 歐姆



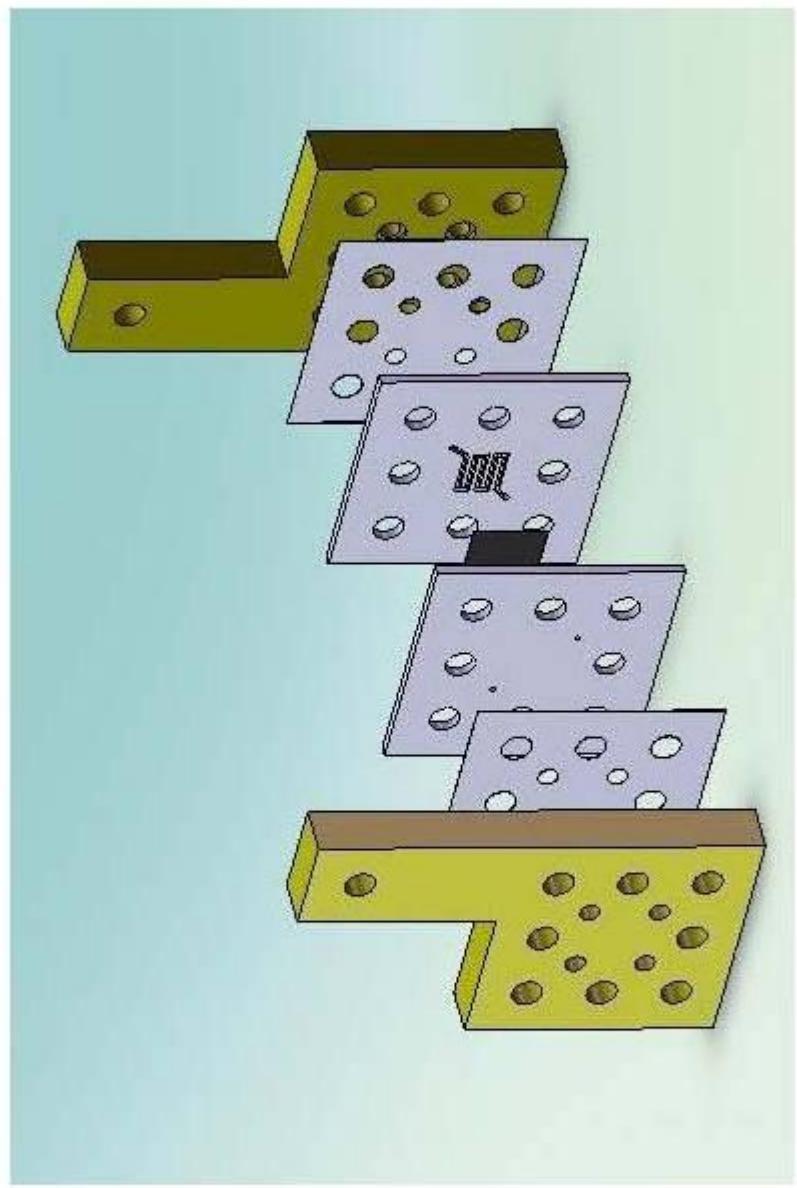
附錄七 0.4、0.6、0.8wt%纖維長度2mm + 環氧樹脂穿透導電性量  
測結果

試片 纖維 含量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48				
0.4Wt %	16.8	21.2	15.9	17.7	12.5	2.82	4.86	3.47	15.4	2	4.05	0.87	14.3	9.06	1.35	13.7	21	12.6	12.4	13.7	7.52	9.32	2.6	2.86			
0.6Wt %	3.54	2.31	2.1	9.93	0.96	8.27	3.08	2.45	9.88	5.54	1.53	20.1	2.19	1	9.16	1.93	9.79	2.68	3.92	15.8	5	1.39	2.8	1.48	1.37		
0.8Wt %	112.	218.	39.6	68.5	26.5	41.7	29.3	119.	27.9	$\infty$	48.4	113.	16.9	39.2	2.74	63.1	$\infty$	73.0	30.5	11.3	12.2	50.63	7	7	30.2		
	48	64K	8	4	6	2	5	23	1	1	39	6	3	M	1	8	3	11.3	6	11.3	6	50.63	7	7			
	34.5	$\infty$	$\infty$	43.8	1.61	31.9	96.6	$\infty$	41.0	48.1	79.1	33.7	37.1	14.2	146.	155.	51.7	54.5	90.1	$\infty$	13.7	$\infty$	25.9	103.			
	8				5K	7	5		5	6	5	9	8	4	7	41	9	4	6	6	6	6	4	08			
	82.7	161.	$\infty$	26.1	25.2	245.	$\infty$	9.63	30.2	$\infty$	293	$\infty$	33.9	$\infty$	52.4	49.0	$\infty$	$\infty$	15.5	45.5	$\infty$	333	24.6	76.5			
	64			6	8	27			1		4		4	9	4	9	3	7	7	M	7	M	3	5			
	18.8	$\infty$	$\infty$	41.1	35.4	$\infty$	18.8	18.3	$\infty$	22.6	$\infty$	92.4	69.4	$\infty$	$\infty$	27.3	23.7	7.5	$\infty$	$\infty$	4	7	7	$\infty$	97.22	$\infty$	$\infty$
	3				6	5		6	9		4	4	2														

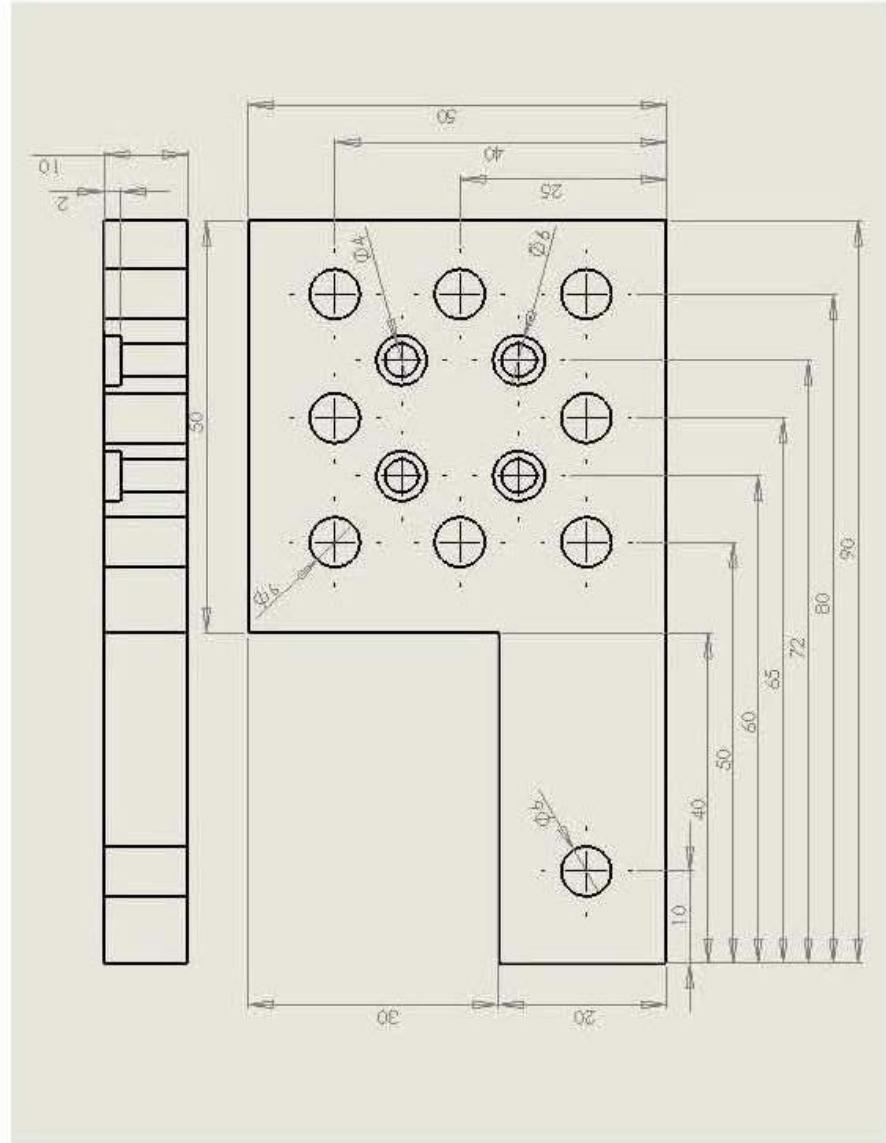
K : 千歐姆      M : 百萬歐姆       $\infty$  : 超過 220M 歐姆

附錄八 單一電池雙極板流場與端板設計圖

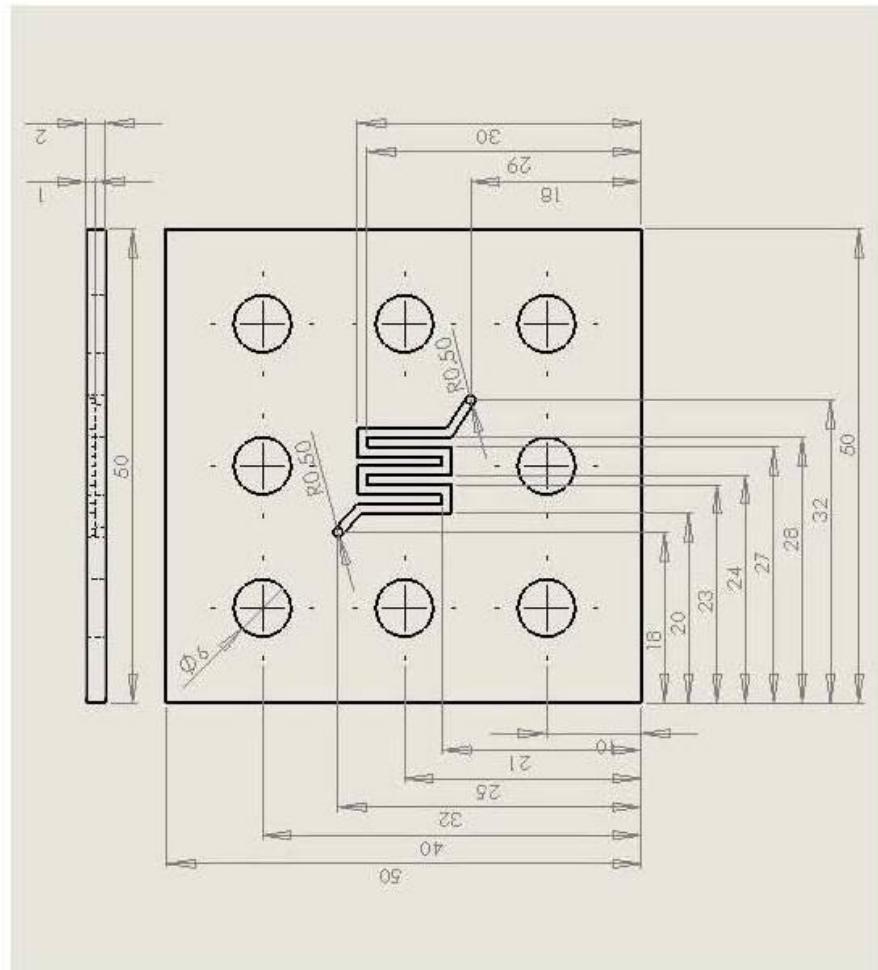




編號	零件名稱	材質	尺寸單位	繪圖比例	單位	製圖者
1	單一電池爆炸試圖	複合材料	mm	1 : 1	交通大學流變與加工實驗室	許富明



編號	零件名稱	材質	尺寸單位	繪圖比例	單位	製圖者
2	燃料電池端板	黃銅	mm	1 : 1	交通大學流變與加工實驗室	許富明



編號	零件名稱	材質	尺寸單位	繪圖比例	單位	製圖者
3	雙極板	複合材料	mm	1 : 1	交通大學流變與加工實驗室	許富明