

# 水熱條件對質子交換膜燃料電池性能的影響

## The Influence of Water and Thermal Conditions on the Performance of PEM Fuel Cells

宋隆裕、顏貽乙、何淑梅、曹芳海

Lung-Yu Sung, Yi-Yie Yan, Shu-Mei Ho, Fanghei Tsau

水熱條件的管理在質子交換膜燃料電池中，扮演非常重要的角色，同時它也是影響電池內部水平衡狀態的主要因素。本研究將針對一些重要的水熱影響條件：電池操作溫度、反應氣體流量、加濕溫度及壓力來進行測試，以探討它對質子交換膜燃料電池的影響程度，並試著從中尋找出較佳的運轉操作條件。

The conditions of water balance in proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) are studied in this research. It is known that water and thermal management is very important to PEM fuel cells. The performance can be optimized with better control of cell conditions. Some important conditions in water and thermal management including cell temperature, reactant flow rate, humidity, and pressure are investigated in this research.

### 一、前言

燃料電池 (fuel cell) 是利用電化學反應，直接將燃料中的化學能轉換成電能的一種發電裝置，其原理非常簡單就是電解水的逆反應，此燃料電池的概念源起於 1839 年的英國物理學家 William Grove。燃料電池是透過電化學反應將氫氣 ( $H_2$ ) 與氧氣 ( $O_2$ ) 結合產生水及電能，因為不經過燃燒的過程，所以沒有卡諾循環 (Carnot cycle) 的限制，因此具有高效率、低噪音的特性，最後產物為水，幾乎是一種沒有污染的能源，所以也被稱為「綠色的環保發電機」及「21 世紀的新能源」。

目前燃料電池依其所使用電解質的不同，大致可區分為：(1) 磷酸型燃料電池 (PAFC)、(2) 熔融碳酸鹽型燃料電池 (MCFC)、(3) 固態氧化物型燃料電池 (SOFC)、(4) 鹼液型燃料電池 (AFC)、(5) 質子交換膜型燃料電池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)、(6) 直接甲醇燃料電池 (DMFC) 等。各種燃料電池依其容量、效率特性而有不同的用途，其特性比較如表 1 所列。

其中，近幾年來最受到大家矚目焦點是質子交換膜燃料電池 (PEMFC)，因為它具有低溫操作、安靜、啟動快、低污染、高效率及維護簡單等優點，並且應用範圍廣泛，例如可作為分散式發電系

表 1. 各種燃料電池特性比較。

電池種類	PAFC	MCFC	SOFC	AFC	PEMFC	DMFC
電解質	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub>	KOH	質子交換膜	質子交換膜
陽極 (負極)	Pt/C	Ni, Cr	Ni/ZrO <sub>2</sub>	Pt/C	Pt/C Pt-Ru/C	Pt/C Pt-Ru/C
陰極 (正極)	Pt/C	NiO	Sr/LaMnO <sub>3</sub> LaCoO <sub>3</sub>	Pt/C	Pt/C	Pt/C
作用離子	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	O <sup>-2</sup>	OH	H <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>
工作溫度	180–205 °C	600–700 °C	800–1000 °C	室溫–90 °C	室溫–80 °C	室溫–60 °C
可用燃料	天然氣、甲醇、 輕油	天然氣、甲醇、 石油、煤碳	天然氣、甲醇、 石油、煤碳油	純氫	天然氣、甲醇、 LPG	甲醇
優點	<ul style="list-style-type: none"> <li>CO 耐久性好</li> <li>可汽電共生</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>發電效率高</li> <li>可汽電共生</li> <li>可用空氣做氧化劑</li> <li>可於電池內進行重組反應</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>發電效率高</li> <li>可汽電共生</li> <li>可用空氣做氧化劑</li> <li>可於電池內進行重組反應</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>啟動快</li> <li>室溫常壓下操作</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>壽命長、功率密度高</li> <li>可用空氣做氧化劑</li> <li>室溫工作、啟動迅速</li> <li>輸出功率可隨意調整</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>室溫工作、啟動迅速</li> <li>不需燃料重組器</li> </ul>
缺點	<ul style="list-style-type: none"> <li>成本高</li> <li>發電效率低</li> <li>磷酸溢出及腐蝕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>設備材料腐蝕</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>工作溫度較高</li> <li>高溫劣化</li> <li>熱損壞</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>需以純氧作氧化劑</li> <li>成本高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>易受 CO 毒化</li> <li>材料與加工成本高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>嚴重甲醇穿透</li> <li>易受 CO 毒化</li> <li>發電效率低</li> </ul>
用途	中小事業、分散式電源	大型發電、中小事業、分散式電源	大型發電、中小事業、分散式電源	太空載具	家用、車用、可移動式電源	攜帶式電源

統<sup>(1)</sup>、交通動力源<sup>(2,3)</sup>及可攜式電力源<sup>(4)</sup>等。且由於近年來在質子交換膜及觸媒技術獲得突破性的進展，促使 PEMFC 的發展相當迅速，預期在 2004–2005 年之間將可見到量產商品。

## 二、PEMFC 內部結構及原理

圖 1 是質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 的內部結構，其中的膜電極體 (membrane electrode assembly, MEA) 則是此 PEMFC 的核心元件，它也是決定電池發電效能最主要的關鍵所在。膜電極體的構造類似三明治，中間是一層固態質子交換膜 (proton exchange membrane, PEM) 作為電解質用，厚度約為 20–200 μm，此質子交換膜的兩側為觸媒電極 (陰極、陽極)，厚度為 5–40 μm，一般稱此為三層 MEA 結構。另外還有所謂的五層 MEA (三層 MEA 加上兩片氣體擴散層) 及七層 MEA (五層 MEA 加上兩片氣體流場板)。

MEA 中的電極分成陽極 (anode, “-”) 及陰極 (cathode, “+”)，它具有雙層結構，分別由氣體擴散層 (gas diffusion layer, GDL) 及觸媒層 (catalyst layer, CL) 所構成，此氣體擴散層是與反應氣體相接觸，而觸媒層兩側分別與氣體擴散層及質子交換膜相接觸。氣體擴散層是由多孔的碳紙 (carbon paper) 或碳布 (carbon cloth) 所組成，它主要作用為提供氣體進出觸媒層的通道，並充當觸媒層的結構支撐與收集電流。觸媒層則是以具良好導電性的碳黑為載體 (support)，在此碳黑載體上沉積許多微小奈米 (nm) 級的貴金屬元素 (如 Pt、Ru、Sn、Mo 等)<sup>(5,6)</sup>，主要功能是作為電化學反應的催化劑，燃料電池的電化學反應只發生在此觸媒層的內部<sup>(7)</sup>。

各種燃料電池的工作原理大致相同，都是由正負兩個電極以及具有可導電離子的電解質所構成。當燃料電池運轉時，氫氣由陽極進入，氧氣 (或空氣) 由陰極進入燃料電池。在此以 PEMFC 電池為例來說明反應原理，首先反應氣體經由電極觸媒的

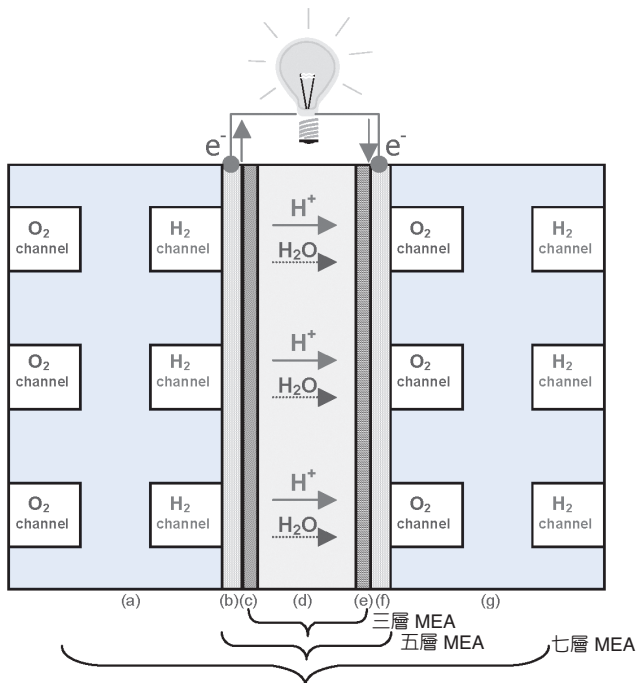


圖 1. 質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 內部結構，(a) 及 (g) 為氣體流場板、(b) 及 (f) 為氣體擴散層 (GDL)、(c) 及 (e) 為觸媒層 (CL)、(d) 為質子交換膜 (PEM)、(b) + (c) 為陽極、(e) + (f) 為陰極。

催化作用，使得在陽極的氫分子分解成氫離子與電子 ( $\text{H}_2 \rightarrow 2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ )，電子自陽極流出至電池的外部電路，經負載 (load) 作功後自陰極流入電池。當氫離子在陽極產生時，由於電池內部的電位降，使氫離子不斷移動傳導至另一側的陰極，此時氧分子在陰極被還原成氧離子 ( $1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{O}^{2-}$ )，並與移動過來的氫離子相結合形成水分子 ( $\text{O}^{2-} + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{H}_2\text{O}$ )。

當氫離子因傳導而移動時，它通常會伴隨數個水分子進行傳導 (即以水合離子形態  $\text{H}(\text{H}_2\text{O})_n^+$  移動)。因此，電池運轉發電時水分子會不斷地由陽極向陰極移動，此時若不能適時的補充水分，將導致質子交換膜過於乾燥，而使傳導氫離子的能力降低，這也將使 PEMFC 的運轉性能大幅度衰減。所以如何補充水分及維持質子交換膜在適濕狀態，又不會導致觸媒電極被水覆蓋而阻絕反應氣體的進入 (通常稱此為淹水 (flooding) 現象)，這就是所謂的水管理 (water management)<sup>(8-10)</sup>。

同時，電池的溫度也會因電化學放熱反應而上升，當電池溫度逐漸升高時，也會改變電池組件的一些特性 (例如：質子交換膜性質、觸媒活性、氣體擴散速率及水揮發速度等)，這些特性的改變都會影響電池運轉的性能，故需要進行熱管理 (thermal management)<sup>(10,11)</sup>，才能使電池發揮出最佳的效能。

因此，可知水管理與熱管理在 PEMFC 系統中，扮演非常重要的角色，同時也是影響電池內部水平衡 (water balance) 狀態的主要因素。所以在運轉操作質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 時，其首要任務就是要做好完善的水管理與熱管理工作。

### 三、研究方式

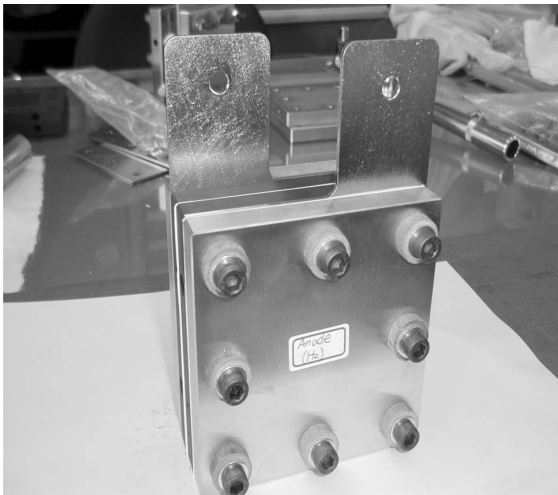
#### 1. 電池設計及製作組件

圖 2 為本研究的電池外觀結構及流場設計，它是一種小型的質子交換膜燃料電池，此電池外觀尺寸約為  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ 。而圖 3 則是此電池製作所需之組件，其中包括：二片表面鍍鉻之高碳鋼端板 (end plate)、二片鍍金之集電板 (current collector plate)、二片高緻密度之石墨流場板 (flow field plate)、二片軟質 PTFE 氣密墊片 (gasket)、二片多孔氣體擴層 (GDL)、八支螺桿、四組氣體接頭及一片三層膜電極體 (MEA) 等。

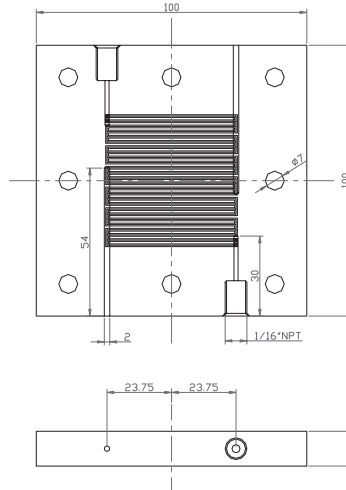
本研究所用的 MEA 是由美國 Gore 公司所生產，它的型號為 PRIMEA<sup>®</sup>5621，其中 MEA 活性面積 (active area) 為  $25\text{ cm}^2$  ( $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ )，PTFE 氣密墊片的尺寸為  $10\text{ cm} \times 10\text{ cm} \times 0.5\text{ mm}$  (厚度)；氣體擴散層 (GDL) 厚度為  $0.4\text{ mm}$  的碳布 (CARBEL<sup>®</sup>CL)。反應氣體的進出口是在石墨流場板的側面，此石墨流場板是採蛇行 (serpentine) 的流道設計，其中表面凹陷氣道的寬度為  $1\text{ mm}$ 、深度為  $1\text{ mm}$ ，而兩氣道間凸出導電帶的寬度亦為  $1\text{ mm}$ 。

#### 2. 研究裝置

圖 4 為本燃料電池的性能測試系統，其中反應氣體 ( $\text{H}_2$ 、 $\text{O}_2$  (或空氣)) 的流量是由質量控制器 (mass flow controller) 所控制，反應氣體在進入電池之前，需分別進入一加濕器 (humidifier) 進行加濕



(a)



(b)

圖 2.  
質子交換膜燃料電池 (PEMFC)，(a) 外觀結構，  
(b) 流場設計。

處理，其中的加濕量是由溫度控制器來調節及控制。當反應氣體被水加濕後，它會帶著飽和的水氣進入電池中進行反應，經電化學反應後的產物水 (H<sub>2</sub>O) 隨著尾氣排出電池，尾氣經冷卻、氣液分離後排放掉。此電池的操作溫度則由溫度控制器所控制，燃料電池的外部接著一電子負載器 (electronic load bank)，其功用是控制及調整電池輸出的電流及電壓。

此燃料電池性能測試系統及其中的控制軟體，

都是本研究室自行開發設計的，目前國內已有許多的大專院校採用此測試系統，使用的情形也一直深獲好評。此測試系統的操作非常簡易，它可依照測試人員的需求，進行單電池 (single cell) 或電池組 (cell stack) 的測試。燃料電池各項的實驗測試是經由一控制軟體來完成，它可進行多項的測試分析，例如電流對時間、電壓對時間、功率對時間、Tafel data 及長期測試等，而其中的測試數據皆可由電腦自動記錄、儲存及繪圖。

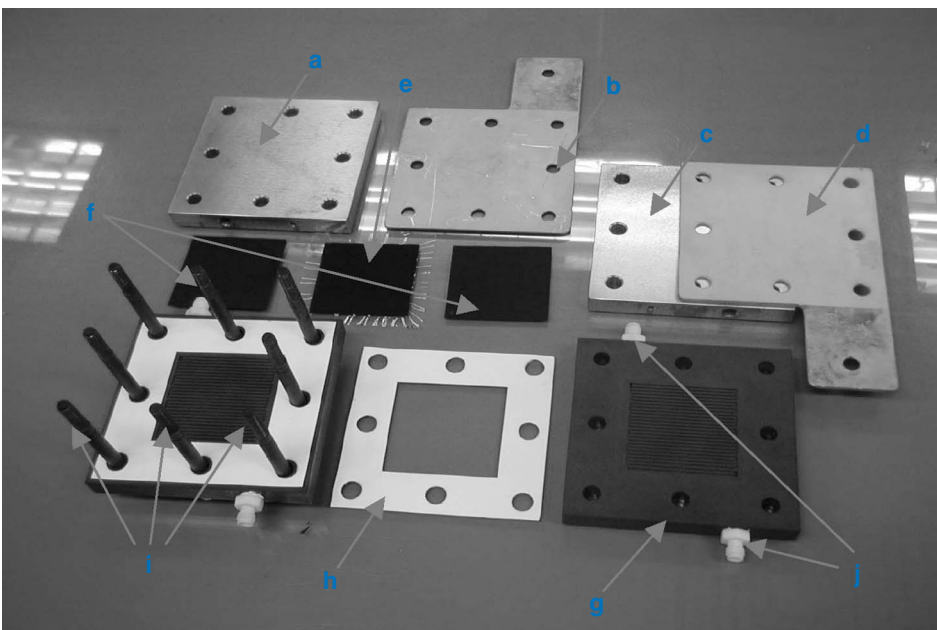


圖 3.  
電池製作所需之組件。其中，a 及 c 為碳鋼端板、b 及 d 為鍍金集電板、e 為膜電極體、f 為氣體擴散層、g 為石墨流場板、h 為氣密墊片、i 為螺桿，j 為氣體接頭。

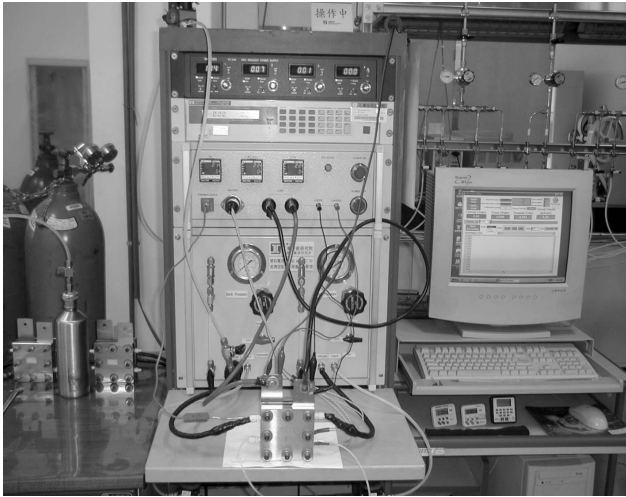


圖 4. 燃料電池性能測試系統。

#### 四、研究結果與討論

為使電池性能快速達到最佳的狀態，電池在組裝後運轉前需要進行活化 (activation) 的處理步驟。本研究是採變流強制活化 (forced activation at varied current) 的方式進行，其中電池的活化電流密度範圍為  $100-600 \text{ mA/cm}^2$ ，活化時間約為 10 hrs，當電池經活化處理後就可進行各項的性能測試。本研究的實驗測試項目包括：電池操作溫度的影響、反應氣體流量的影響、反應氣體加濕溫度的影響及反應氣體壓力的影響等，以下分別說明此實驗測試的結果與討論。

#### 1. 操作溫度的影響

操作溫度對質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 的性能影響非常大。當操作於低溫時，因 MEA 上的催化觸媒活性低及反應速率慢，這是造成電池性能不佳的主要原因；當操作於高溫時，雖可大幅提升催化觸媒的活性及反應速率，但如果溫度過高時，很容易造成質子交換膜 (PEM) 的脫水乾燥，而使它喪失傳導氫離子的能力。所以 PEMFC 電池存在一較佳的操作溫度，此溫度與 MEA 的特性及反應條件有密切的關係。

圖 5 為電池在不同的操作溫度下之 I-V 極化曲線，電池分別在六種不同的操作溫度 ( $30^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$ 、 $60^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$ 、 $80^\circ\text{C}$ ) 下進行實驗測試，其他的測試條件如下：(1) 陽極及陰極反應氣體分別為氫氣 ( $\text{H}_2$ ) 與空氣，其計量比為  $\text{H}_2/\text{air} : 1.5 \times / 2.5 \times$ ，(2) 陽極及陰極反應氣體的加濕溫度為  $70^\circ\text{C}$ ，(3) 氣體反應壓力為常壓 (ambient)。

由圖 5 可知，電池的輸出電流密度 (current density) 是隨著電池操作溫度的上升 ( $30^\circ\text{C}-50^\circ\text{C}$ ) 而快速增加，但溫度到達  $50^\circ\text{C}-60^\circ\text{C}$  時，電池的電流密度之增加幅度就逐漸變小。當操作溫度大於  $70^\circ\text{C}$  時，電池的輸出電流密度就開始往下降，而且下降的幅度非常大。

因此，顯而易知電池的操作溫度對 PEMFC 而言是一個非常重要的控制參數，所以想要得到較佳的電池運轉性能，首要任務就是做好電池的熱管理

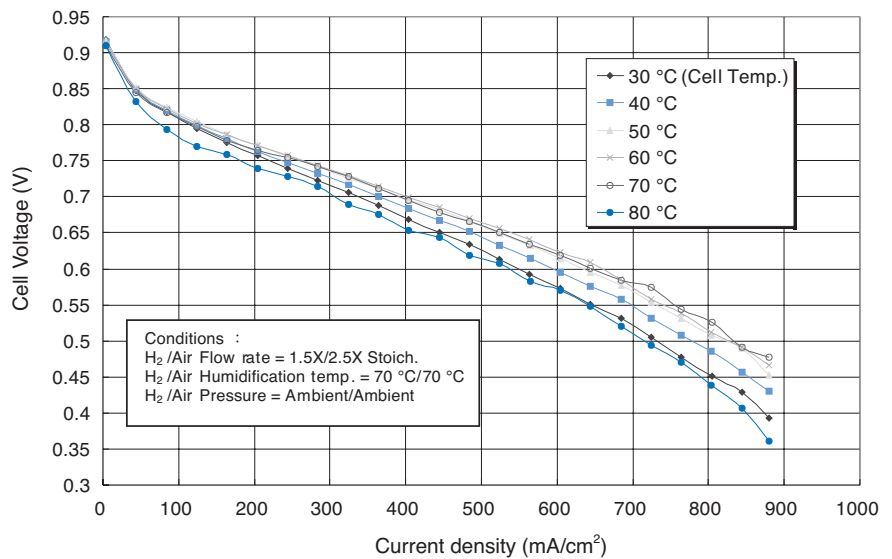


圖 5. 電池在不同的操作溫度下之 I-V 極化曲線。

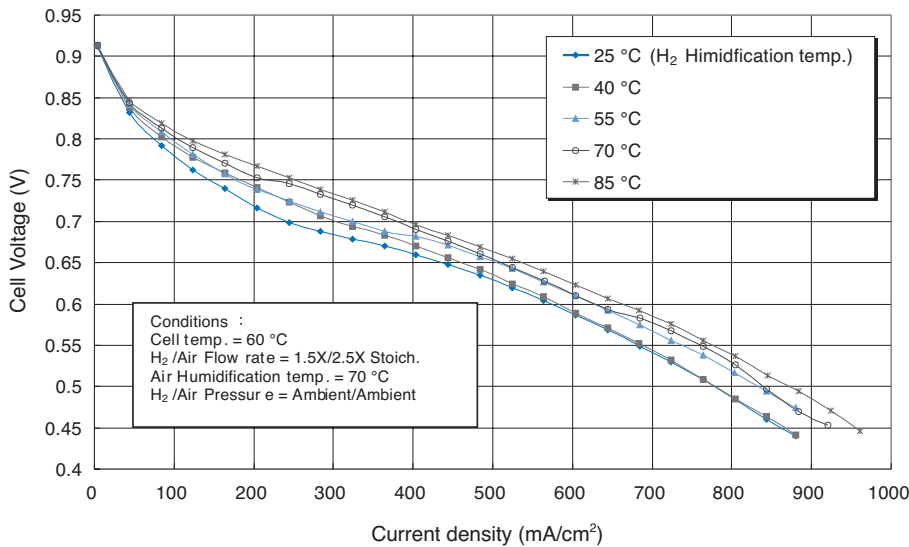


圖 6. 陽極反應氣體 (H<sub>2</sub>) 在不同的加濕溫度下，PEMFC 之 I-V 極化曲線。

工作，由此研究結果可得知，PEMFC 較佳的電池操作溫應該是在 60 °C – 70 °C 之間。

## 2. 反應氣體加濕溫度的影響

PEMFC 中的質子交換膜 (PEM) 要維持在濕潤的狀態下，才能產生較佳的氫質子 (H<sup>+</sup>) 傳導特性。質子交換膜要維持濕潤所需的水分可從兩個途徑來供給：(1) 電池運轉操作時，陰極會因電化學還原反應直接產生水 ( $1/2O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ )，(2) 可從外部伴隨反應氣體進入電池內。

本研究是採用外部加濕器 (humidifier) 來調節質子交換膜的含水量，反應氣體 (H<sub>2</sub>、air) 是在外

部先通過加濕器充分的加濕後，再進入電池內部，假設加濕後的反應氣體均含有飽和水蒸氣。可調整加濕器的溫度來控制水蒸氣進入電池的含量，質子交換膜會因水蒸氣而達到潤濕效果，使它維持在一定的飽和含水量。對於質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 而言，只單靠陰極側所產生的水量來對質子交換膜的濕潤是不足夠的，因此，反應氣體進行加濕處理是有其必要性的。

陽極與陰極之反應氣體在不同的加濕溫度下，電池的 I-V 極化曲線分別如圖 6 及圖 7 所示，其中反應氣體 (H<sub>2</sub>、air) 是在五種不同的加濕溫度 (25 °C、40 °C、55 °C、70 °C、85 °C) 下進行實驗測

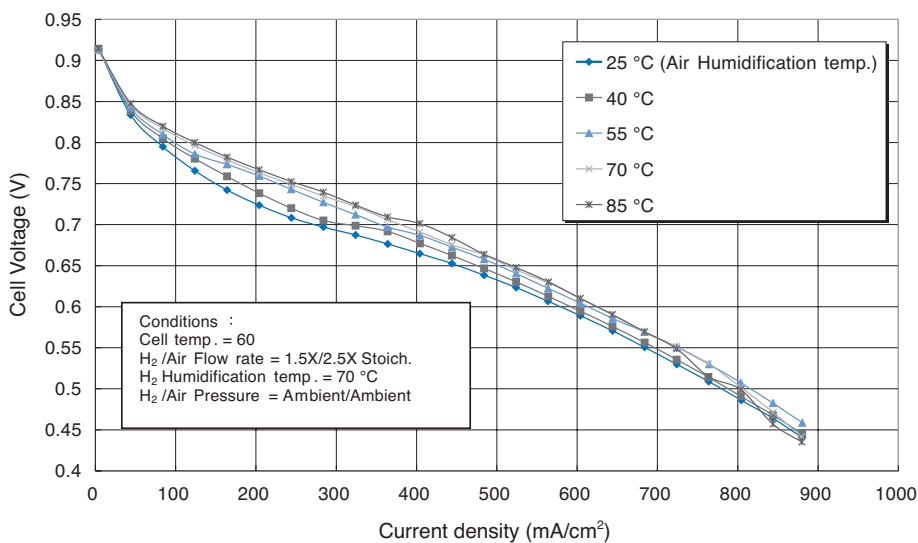


圖 7. 陰極反應氣體 (air) 在不同的加濕溫度下，PEMFC 之 I-V 極化曲線。

試，其他的測試條件如下：(1) 電池溫度為 60 °C，(2) 反應氣體的化學計量比流量為  $H_2/air: 1.5 \times / 2.5 \times$ ，(3) 氫氣及空氣的加濕溫度皆為 70 °C，(4) 反應氣體的壓力為常壓。

由圖 6 及圖 7 可知，電池的輸出電流密度是隨著加濕溫度的上升而增加，其中反應氣體經加濕所得到的效果，為陽極反應氣體 ( $H_2$ ) 明顯優於陰極反應氣體 (air)。然而，在陰極反應氣體加濕對提升電池性能並不顯著，此原因可能是因為陰極本身就會產生水之故，水量如果過多，除了會稀釋反應氣體的濃度外，也會阻塞擴散層 (GDL) 內的氣體孔道，而造成部分電極的淹水現象。

### 3. 反應氣體計量比的影響

燃料電池電化學反應所需氣體 ( $H_2$ 、 $O_2$ ) 的流量，是隨著電池輸出電流密度的增加而增加，其中所需的理論流量可經由計算得到，此理論流量一般稱為化學計量比 (stoichiometry)。提高反應氣體的流量雖有助於提升燃料電池的性能，但流量太大又會造成浪費，而使燃料電池的運轉成本相對提高，所以電池性能與氣體流量之間也存在一較佳的操作點。

陽極反應氣體與陰極反應氣體在不同計量比下，電池的 I-V 極化曲線分別如圖 8 及圖 9 所示，所用的計量比流量 ( $H_2$ 、air) 分別有六種 ( $1.0 \times$ 、 $1.5 \times$ 、 $2.0 \times$ 、 $2.5 \times$ 、 $3.0 \times$ 、 $3.5 \times$ )，其他測試條件

為：(1) 電池溫度為 60 °C，(2) 反應氣體的加濕溫度為 70 °C，(3) 反應氣體的壓力為常壓。

由圖 8 可知，增加陽極的  $H_2$  計量比 ( $1.5 \times - 3.5 \times$ )，無論是在低電流密度或高電流密度下，對電池性能的提升幾乎是沒有助益。這是因為  $H_2$  在陽極進行電化學氧化反應的速率非常快，以及  $H_2$  的活性極化阻力非常小之故。雖然如此，但當  $H_2$  計量比等於  $1.0 \times$  而電池在  $380 \text{ mA/cm}^2$  低電流區時，會出現極限電流密度 (limiting current density)，這主要是因為  $H_2$  的流量不足所造成。

而由圖 9 可知，當增加陰極反應氣體 (空氣) 的計量比時，在低電流密度下 ( $0 - 300 \text{ mA/cm}^2$ )，對電池性能的提升幫助不大，但在高電流密度下 ( $> 300 \text{ mA/cm}^2$ )，對電池性能的提升就非常明顯。例如電池電壓在 0.5 V、空氣的計量比分別在  $1.5 \times$  及  $3.5 \times$  時，電池輸出的電流密度可從  $750 \text{ mA/cm}^2$  提升至  $910 \text{ mA/cm}^2$ 。這是因為  $O_2$  在陰極進行的還原反應非常慢， $O_2$  活性極化阻力及質傳擴散阻力都非常大之故，所以提高空氣的計量比流量可增加  $O_2$  的濃度及供給量，而使  $O_2$  活性極化及質傳擴散阻力得到顯著的改善。

### 4. 反應氣體壓力的影響

提高反應氣體的壓力有利於電池性能的提升，這可從熱力學及動力學層面上進行探討。從熱力學的角度分析，提高  $H_2$ 、 $O_2$  的壓力有利於增大電池

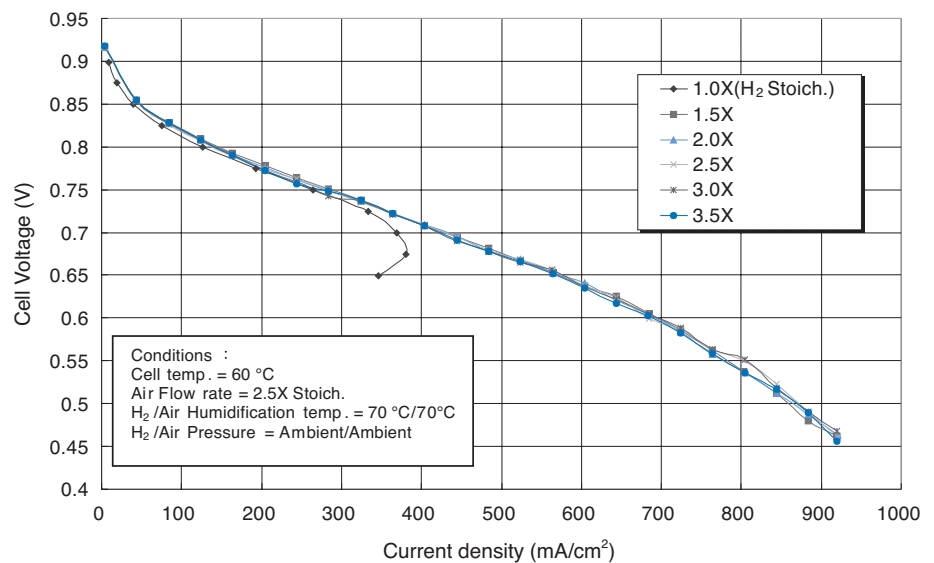


圖 8. 陽極反應氣體 ( $H_2$ ) 在不同的計量比流量下，PEMFC 之 I-V 極化曲線。

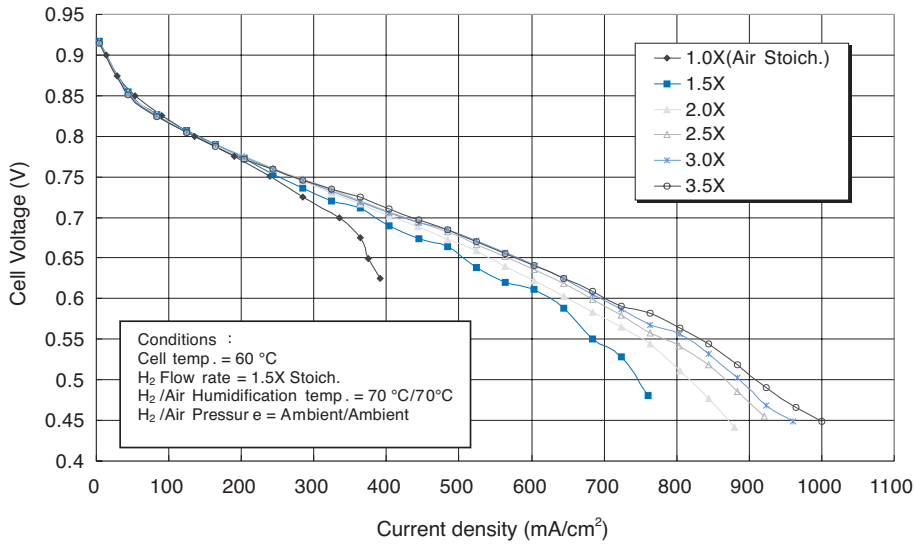


圖 9. 陰極反應氣體 (air) 在不同的計量比流量下, PEMFC 之 I-V 極化曲線。

的可逆電壓, 而改善電池性能。若從動力學的角度分析, 增加氣體壓力也有利於提高電池的交換電流密度 (exchange current density) 及降低活化過電位 (overpotential)。反應氣體壓力的增加意味著觸媒層內反應物的濃度增大, 此有利於反應物在電極內部的擴散, 並可減少擴散所造成的濃度極化 (concentration polarization)。

陽極反應氣體 ( $H_2$ ) 與陰極反應氣體 (air) 在不同壓力下, 電池的 I-V 極化曲線分別如圖 10 及圖 11 所示, 其中反應氣體 ( $H_2$ 、air) 的壓力各有五種 (0 psig、5 psig、10 psig、15 psig、20 psig), 其他的測試條件如下: (1) 電池溫度為 60 °C, (2) 反應

氣體的計量比流量為  $H_2$ /air: 1.5× / 2.5×, (3) 反應氣體的加濕溫度為 70 °C。

由圖 10 可知, 提高陽極的  $H_2$  壓力, 對電池性能的提升並不顯著, 這是因為 PEMFC 陽極反應氣體 ( $H_2$ ) 的活性極化阻力本來就非常小, 所以提高  $H_2$  壓力對電池性能的提升有限。

反之, 若提高陰極反應氣體 (air) 壓力時, 無論是在低電流密度或高電流密度下, 電池性能多能明顯的提升, 如圖 11 所示。特別在高電流密度下最能顯示出它的效果, 例如電池電壓在 0.5 V、空氣壓力分別在 0 psig 及 20 psig 時, 電池輸出的電流密度可從 860 mA/cm<sup>2</sup> 提升至 1180 mA/cm<sup>2</sup>。這

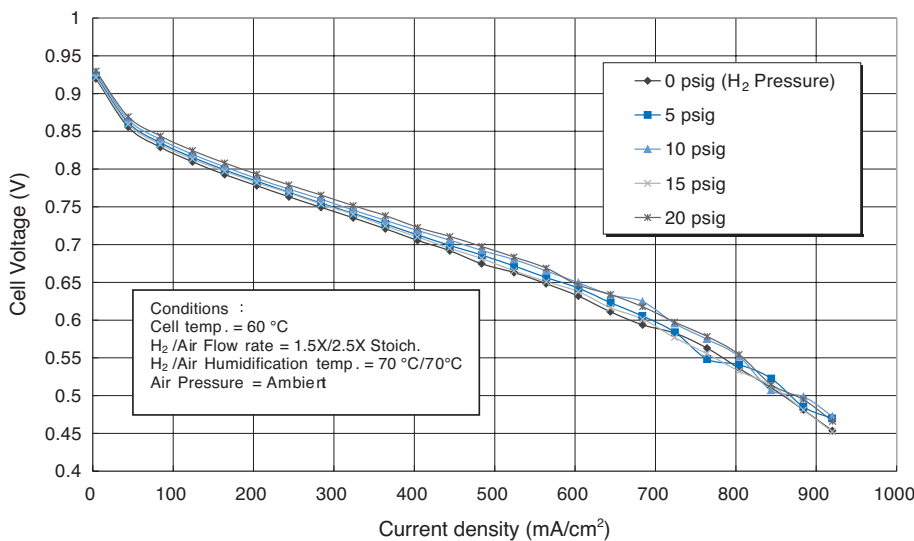


圖 10. 陽極反應氣體 ( $H_2$ ) 在不同的壓力下, PEMFC 之 I-V 極化曲線。

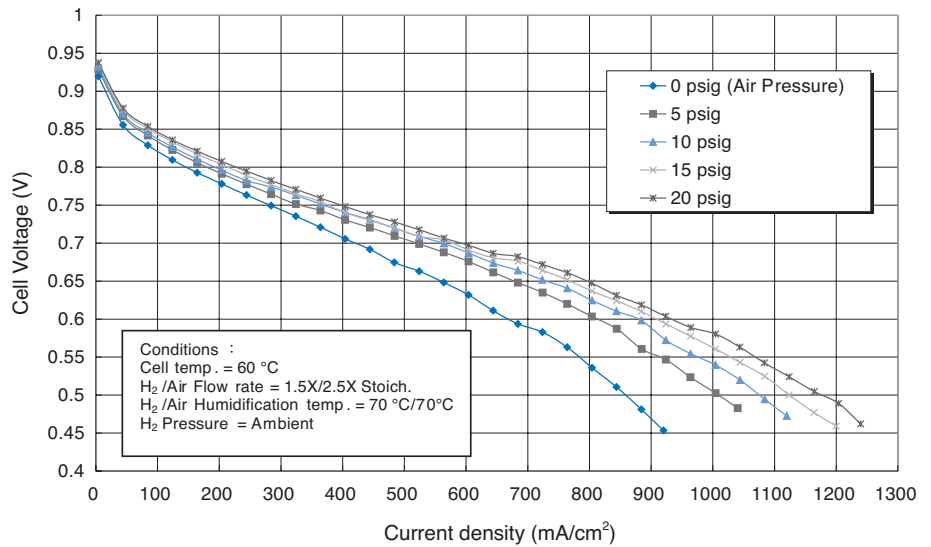


圖 11. 陰極反應氣體 (air) 在不同的壓力下，PEMFC 之 I-V 極化曲線。

是因為 PEMFC 陰極反應氣體 (O<sub>2</sub>) 的活性極化及質傳擴散阻力皆相當的大，提高空氣的壓力除可增加 O<sub>2</sub> 濃度外，並可同時降低活性極化與質傳擴散阻力，所以可得到較顯著的功效。

## 五、結論

本研究已針對質子交換膜燃料電池 (PEMFC) 一些重要的水熱條件參數進行實驗測試及分析，從實驗結果與討論可以歸納出下列幾點結論。

1. 電池溫度如控制在 60 °C–70 °C 之間，將可獲得一較佳的電池性能，當電池溫度超過 70 °C 時，電池性能將大幅度下降。
2. 電池性能是隨著反應氣體加濕溫度的上升而增加，其功效是陽極反應氣體 (H<sub>2</sub>) 明顯優於陰極反應氣體 (air)。
3. 電池性能隨著陰極反應氣體 (air) 計量比流量的增加而增加，但增加陽極反應氣體 (H<sub>2</sub>) 的計量比流量，對電池性能的提升幾乎是沒有助益。
4. 提高陽極反應氣體 (H<sub>2</sub>) 的反應壓力對電池性能的提升並不顯著，但提高陰極反應氣體 (air) 的壓力時，無論是在低電流密度或高電流密度下，電池性能多能明顯增加 (特別在高電流密度下)。

5. PEMFC 電池運轉較佳的操作條件如下：(1) 電池操作溫度為 60 °C–70 °C，(2) H<sub>2</sub> 化學計量比流量為 1.5×，(3) 空氣的化學計量比流量為 2.5×，(4) H<sub>2</sub> 加濕溫度為 85 °C，(5) 空氣的加濕溫度為 85 °C，(6) 陽極反應氣體 (H<sub>2</sub>) 為常壓 (ambient)，(7) 陰極反應氣體 (air) 壓力為 10 psig。

以上的操作條件是小型質子交換膜燃料電池的實驗結果，它亦可作為大型 PEMFC 電池組 (stack) 操作運轉或設計時的參考。

## 誌謝

本研究要感謝經濟部能源委員會能源基金「燃料電池計畫」之贊助。

## 參考文獻

1. A. J. Applyby, *J. Power Sources*, **69**, 153 (1996).
2. J. M. Ogden, M. M. Steinbugler, and T. G. Kreutz, *J. Power Sources*, **79**, 143 (1999).
3. C. Bernay, M. Marchand, and M. Cassir, *J. Power Sources*, **108** (1-2), 139 (2002).
4. K. Tuber, M. Zobel, H. Schmidt, and C. Hebling, *J. Power Sources*, **122**, 1 (2003).
5. A. T. Haug, R. E. White, and J. W. Weidner, *J. Electrochem. Soc.*, **149** (7), 862 (2002).

6. H. Yu, Z. Hou, B. Yi, and Z. Lin, *J. Power Sources*, **105**, 52 (2002).
7. S. D. Thompson, L. R. Jordan, and M. Forsyth, *Electrochim. Acta*, **46**, 1657 (2001).
8. D. M. Bernardi, *J. Electrochem. Soc.*, **137** (11), 3344 (1990).
9. T. Okada, G. Xie, and Y. Tanabe, *J. Electroanal. Chem.*, **413**, 49 (1996).
10. T. F. Fuller and J. Newman, *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 1218 (1993).
11. N. Djilali and D. Lu, *Int. J. Therm. Sci.*, **41**, 29 (2002).

- 
- 宋隆裕先生為國立台灣科技大學化工系碩士，現任工研院能資所燃料電池與氫能研究室研究員。
  - 顏貽乙先生為國立交通大學機械系博士，現任工研院能資所燃料電池與氫能研究室主任。
  - 何淑梅小姐為明新工專化工科畢業，現任工研院能資所燃料電池與氫能研究室副工程師。
  - 曹芳海先生為美國喬治亞理工學院航太工程博士，現任工研院能資所新興能源組組長。

- Lung-Yu Sung received his M.S. degree in chemical engineering from the National Taiwan University of Science and Technology. He is currently a researcher at the Fuel Cell and Hydrogen Energy Laboratory of the Energy and Resources Laboratories of the ITRI.
- Yi-Yie Yan received his Ph.D. in mechanical engineering from the National Chiao Tung University. He is currently the manager of the Fuel Cell and Hydrogen Energy Laboratory of the Energy and Resources Laboratories of the ITRI.
- Shu-Mei Ho graduated from Ming Hsin College in chemical engineering. She is currently an associate engineer at the Fuel Cell and Hydrogen Energy Laboratory of the Energy and Resources Laboratories of the ITRI.
- Fanghei Tsau received his Ph.D. in aeronautics and astronautics engineering from the Georgia Institute of Technology, USA. He is currently the Director of the Innovative Energy Technology Division of the Energy and Resources Laboratories of the ITRI.