

# 低成本燃料電池雙極板技術發展現況

Status of Low-cost Bipolar Plates of Proton Exchange Membrane Fuel Cell

王文琳 W. L. Wang<sup>1</sup>、劉政宏 C. H. Liu<sup>2</sup>

工研院南分院(IS/ITRI) 副理<sup>1</sup>、研究員<sup>2</sup>

雙極板(Bipolar Plate)是質子交換膜燃料電池(PEMFC)的關鍵元件，對雙極板的要求為：高的導電性、好的抗腐蝕性、高的機械強度、高的氣密性、質輕且便宜。本文將以商品化低成本的角度介紹國內外雙極板的發展現況，說明目前市場上兩種雙極板材料：複合碳板與金屬雙極板在製程與材料上的考量。

The bipolar plates are the key components of the proton exchange membrane fuel cells. Properties required for the bipolar plates are high electric conductivity, high corrosion resistance, high mechanical strength, high gas impermeability, light materials, and low cost. This article offers a brief introduction of the domestic and abroad status of low-cost bipolar plates. From the viewpoint of the cost for the process and the materials, two types of bipolar plates were been discussed.

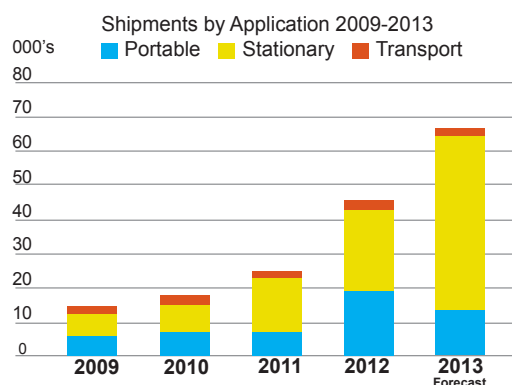
關鍵詞/Key Words

雙極板(Bipolar Plates)、質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC)、複合碳板(Composite Carbon Plates)、金屬雙極板(Metallic Bipolar Plates)

## 前言

近年來燃料電池已廣泛地建置在許多應用市場中，並且被確認為比傳統的內燃機發電機或電池更可靠的技術選項。根據統計，燃料電池在2013年的出貨量幾乎是2011年的兩倍<sup>(1)</sup>，如圖一所示。其中就裝置台數來看，質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell; PEMFC)持續地保有最多的裝置數量，其普及性可歸因於廣大的應用領域以及適合可大可小的發電規模。若依產品最大需求功率分類，大致上可分為兼具緊急電力功能之大型定置型發電機及持久性之供電系統(kW~10 kW)、

以提供區域性電力或備用電力、移動式電源與可攜式電力(1 kW以下)，以及亦可作為電動車輛、輕型車之電力來源(kW~100 kW)。同時，燃料電池發電過程中因為僅有水生成，所以幾乎不會造成任何污染，亦不需要壓縮機等動件，故不會產生噪音與振動，這些兼具發電機與蓄電池的特性使其能更有彈性地應用至許多場所與產品上。目前國內PEM燃料電池市場，主要著眼於電力網供電不及的偏遠地區、社區型住宅或需要高度穩定電力的製造業廠區，以及醫療院所等。利用燃料電池做為這些場所的常備與緊急備援電力，提供非常可



資料來源：Fuel Cell Today

▲圖一 2009~2013年燃料電池（含可攜式型、運輸型、定置型）出貨量增加情形<sup>(1)</sup>

靠的電力輸出。

唯PEMFC目前裝置成本仍高，故降低成本及發展可量產型的組件與模組技術一直是PEMFC商業化量產應用的最重要課題，其中雙極板就是一項燃料電池組中非常關鍵的組件。圖二為PEMFC的構造示意圖<sup>(2)</sup>，在膜電極體(MEA)的兩端即為雙極板，其一側為氣體流道，而另一側則是冷卻流道，但對於散熱需求低的燃料電池則可以兩側皆為氣體流道。對雙極板的氣體流道來說，其功能是使反應氣體能十分均勻地輸送至活性觸媒，同時將未參與反應的氣體與產物水經由氣體流道排除。冷卻流道的功用則是均勻地分配冷卻劑於活性反應區，藉以吸收燃料電池發電後生成的餘熱，為燃料電池熱管理的重要環節。整體而言，雙極板是燃料電池的電子與熱能的傳導路徑，需要具備良好的導電與導熱性質。一般雙極板的要求如下：

①化學與物理性質穩定，熱穩定性與化學惰性，不能具有揮發物或溶出性金屬成分。

②介面接觸阻抗要小，具有良好的導電性與導熱性，減少電池組中串接電池間的

電壓損失。

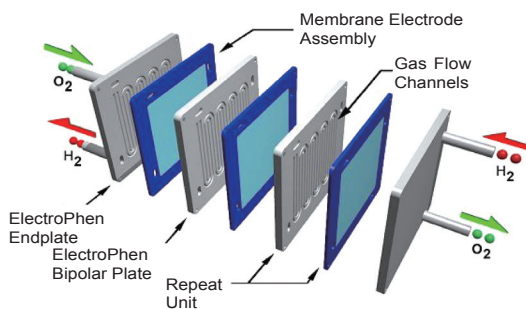
③耐溫與加工性能良好，加工製造時黏度與流動性質適當，成品避免過硬或過脆，方能製成薄型的產品。

④避免氫氣的穿透，陽極側流體中的氫氣不可經由雙極板擴散至陰極側空氣流體中。

⑤應有足夠的強度，避免在電池組組裝壓緊或鎖緊時，或在震動狀態的使用環境下發生破裂。

雙極板本身所使用的材料及其製作所牽涉的製程與工序不但影響燃料電池的性能與壽命，更直接影響燃料電池組的成本；以一個80 kW的燃料電池系統估算，至少需要350個以上的單電池串接起來，使用的雙極板數量約750~800片，一片雙極板的面積須大於300 cm<sup>2</sup>；假設以一年有3,000台的系統需求來計算，雙極板的需求量則是兩百多萬片，代表即使燃料電池系統的年需求量不多，雙極板仍然有大量的生產製造需求，因此雙極板的製造成本與產出速度將是影響燃料電池量產應用的關鍵因素。

依目前燃料電池系統年產量來看，概括推估PEMFC的雙極板成本約落在US\$5~10/kW之間<sup>(3)</sup>，成本的變動主要來自於選擇的材料及其製程，其中製程尚包括



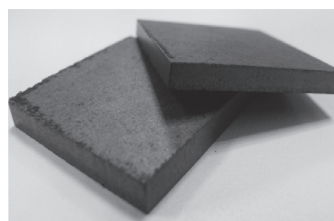
▲圖二 PEMFC電池組示意圖<sup>(2)</sup>

氣體流道與液體流道的成形工序。本文將探討符合大規模量產的低成本雙極板製作技術與發展現況，作為未來技術發展與生產製造相關人員之參考。

## 碳材-高分子複合板材

雙極板在燃料電池中的操作環境由70~80°C，提升至120°C，甚至160°C以上時，除了仍需維持既有的高電性與其他物理性質以外，高溫下的化學穩定性為最大的關鍵之一。依據電池中電解質使用的不同，搭配在不同的操作溫度區間下，可能會有不同種類以及濃度的電解質釋出至雙極板中，因此在高溫下的腐蝕效應將會放大。此外，傳統所使用的碳基雙極板，在電池的高溫環境下也會產生自發性的氧化反應，這兩項效應將會加速板材在高溫使用下的劣化行為。目前國際商用板材，主要以碳基複合雙極板為主要商品，而在電性以及高溫下的化學穩定性亦皆有差異，但距離美國能源局(DOE)針對雙極板所設定之目標仍有進步的空間。雖然全石墨化碳雙極板具有較高穩定性以及長效性，但是製造成本相對高昂，對未來市場化角度而言，並不適合作為優先選擇。

工研院南分院以導電性填充材料以及具高溫穩定特性聚合物，配合均相分散以及熱成形技術，開發出具高電性高溫型板材，如圖三所示。此外，透過有機/無機修飾法，針對材料容易受到酸侵蝕的側邊缺陷進行強化，可有效保護導電材料，減緩在高溫下的氧化效應，提升板材之長效性。同時，本部門以自建立之板材基本電性與高溫化學穩定性驗證系統，可於200°C高濃度磷酸環境下，測得所開發的高溫板材之腐蝕電流密度為0.7  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ，符合DOE



◀ 圖三 工研院研發之耐200°C雙極板

所設定 $<1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 之規格，預期可滿足高溫PEM燃料電池的操作環境需求。

在製程的選擇上，碳複合板材可經由熱壓成形以及射出成形來製備。根據先前相關結果顯示，以射出成形製備而成之板材，對於內部導電材料在Z方向的排列較為有利，因此可以降低在該方向的內部阻抗，進而提升電池效率<sup>(4)</sup>。但是值得注意的是，在射出成形製程中，物料的流動性為一相當關鍵之因素，若要獲得更高的板材電性，則需要有相對高的固含量，但可能因此降低物料流動狀態，影響板材特性，此變因在製程設計上須格外留意。但整體而論，射出成形在製造成本考量上相當符合量產需求，且國內在射出成形的加工技術上已經非常成熟，因此未來可直接與國內射出相關廠商配合進行製造生產。

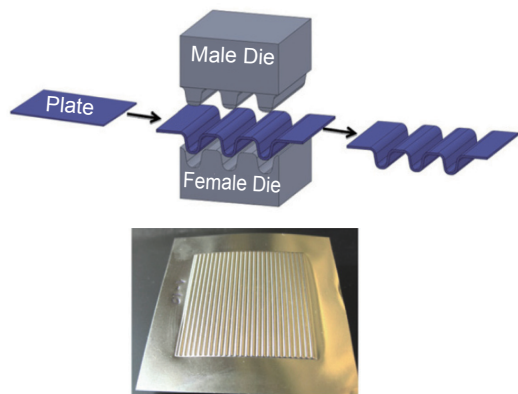
## 金屬雙極板

為了推動燃料電池的發展與應用，開發輕量化與低成本的雙極板乃重要關鍵。金屬材料由於導熱、導電和機械性質佳，適合應用於雙極板材料的開發，最重要的是金屬材料的延展性佳，使其不僅擁有易加工的特性，板材本身可以彎曲變形成雙面流道，有效降低電池組的體積與重量，還可以大量化生產降低成本。金屬雙極板的成形技術主要有：電化學蝕刻(Electrochemical Micro-machining)、模鑄(Die Casting)、滾軋(Rolling)、沖壓(Stamping)和液

壓(Hydroforming)等成形技術。其中電化學蝕刻成形的雙極板表面狀態較差，需再進行後續處理，做工繁複；鑄模成形的速度慢，較少人使用。滾軋技術是將流道圖形刻在輪軸上，然後再藉由滾軋的方式使金屬薄板成形。液壓則是近年發展的新技術，利用液體壓力並配合模具，致使金屬板變形為欲設計的流道圖形。沖壓是利用上下模具沖壓中間的金屬薄板，快速沖壓出流道圖形。沖壓、滾軋和液壓等成形技術由於效率高可大量生產，是較為理想的金屬薄板成形技術。圖四為金屬板沖壓製程的示意圖。

以金屬雙極板而言，可連續生產的沖壓技術滿足雙極板的產出速度，但金屬材料的易腐蝕與欠缺穩定的化學特性是最大的缺點，要兼顧金屬基材的防蝕性以及降低接觸電阻，以維持導電性，一個良好的表面改質或抗腐蝕層處理，是相當重要的研究主題。而決定成本的關鍵落在金屬底板原材及其鍍膜保護層，這方面可由兩個角度來說明。

### 1. 抗蝕性好但成本較高之不鏽鋼 + 便宜的塗層/表面改質技術



▲圖四 (a)沖壓製程的示意圖 (b)沖壓完後的金屬雙極板成品

不鏽鋼因添加了大量的鉻元素，致使表面產生緻密的氧化鉻保護膜，適合做為金屬雙極板的材料。雖然國外的研究學者如Davies<sup>(5)</sup>和Makkus<sup>(6)</sup>等提到許多抗蝕性極優異的不鏽鋼（如SS349、SS904L、SS926、SS446）可以直接使用作為燃料電池的雙極板，但這些說法缺乏長期的電池驗證數據來支撐，亦無法完全避免因鉻的氧化物生成而造成電池內部的高阻抗值，且這些性質優異的不鏽鋼，因其應用的市場較有限，所以產量少、價格高，特殊規格的产品（如超薄板厚等）亦十分稀少。而3系列的不鏽鋼如SS316L，由於碳含量低，成形性佳，又添加了鎳(Ni)和鉬(Mo)等抗蝕元素，是目前應用於金屬雙極板中最普及的不鏽鋼材。除了SS316L外，其他3系列的不鏽鋼如SS301和SS304的成形性均佳，且由於含鎳量較低，成本亦較SS316L不鏽鋼低，在成本的考量上較佔優勢，若搭配合適的塗層/表面改質技術，即可成為理想的金屬雙極板。

由於不鏽鋼材已具有基本的抗蝕性，對於抗蝕鍍層的要求較低，內含的鉻元素還可搭配一些表面改質技術如熱滲氮、酸洗等，讓不鏽鋼表面形成一層鉻的碳化物及氮化物，因而提升整體抗蝕表現。一般而言，不鏽鋼底板所搭配的抗蝕技術與材料較多元，因此抗蝕製程、選用的材料及生產速度將是最首要的考量，例如便宜的碳材即是十分具競爭性的鍍層材料。

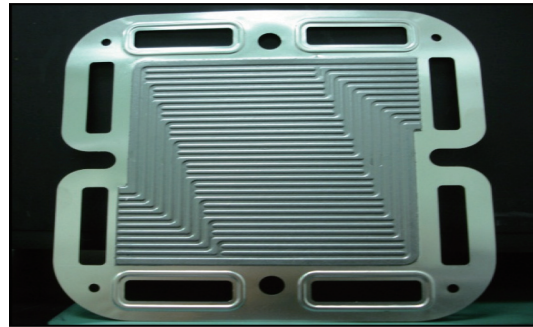
### 2. 便宜且蘊藏量多的輕金屬 + 可靠的鍍層

鎂材（密度 $1.75 \text{ g/cm}^3$ ）與鋁材（密度 $2.7 \text{ g/cm}^3$ ）的密度皆比不鏽鋼低，導熱係數佳，對於提升燃料電池性能與減輕電池組

重量的效益明顯。雖然純鋁的機械強度很低，但透過添加不同的元素（鋁合金）可以增加材料的強度。同時鋁合金價格約為不鏽鋼的一半，作為金屬雙極板的底材，具備價格優勢。最大的問題是鋁合金與鎂合金無法抗蝕與抗氧化，故這類型基板表面的鍍層品質要求高，可靠及無孔洞瑕疵的鍍膜技術是選用輕金屬底材的必要條件。常見搭配的技術是物理氣相沉積法鍍膜，在高真空的環境中，利用離子束或磁控濺鍍法製造欲鍍材料的帶電分子蒸氣，進而停留與附著於板材表面，常用的材料如TiN、CrN、Au等。General Motor在1997年發行一項專利，即使用6061鋁合金，先濺鍍上10 $\mu$ m的不鏽鋼層(Al-6XN)，再加上0.3 $\mu$ m的TiN鍍層。但要完成整個鍍膜的時間高達1小時以上（以150 nm/min的鍍膜速度計算），價格也較無鍍膜的不鏽鋼價格高出許多，導致失去選用輕金屬為金屬雙極板底材在價格上的優勢。

工研院自98年開始投入金屬雙極板的技術開發，研發出獨特之超薄碳沉積技術，如圖五所示。利用價格低廉的石墨材料多層堆疊在金屬雙極板表面，達成導電度 $> 150 \text{ S/cm}$ ，全板厚 $\leq 0.15 \text{ mm}$ 之目標。由於石墨的高化學穩定性與多層堆疊結構，有效阻擋酸液侵蝕金屬表面，其高電化學穩定性可由Tafel曲線的結果得之，在0.5M的硫酸內測得腐蝕電流小於 $1 \mu\text{A/cm}^2$ 。在發展高品質碳膜層的同時，亦致力降低碳膜層與金屬之間的異質接合介面阻抗，並達成最大沉積製程面積為 $400 \text{ cm}^2$ 。目前使用碳沉積之金屬板單電池耐久測試已超過3,000小時，電壓衰退率 $< 1\%$ 。（@60°C、 $\text{H}_2/\text{Air}$ ，常壓）

本部門自102年開始進行薄形金屬板試



▲圖五 碳沉積於薄形金屬雙極板之反應流道區

量產及其製程規劃，並且完成碳沉積鍍膜之量產製程設計與其相對應之機台建置，針對金屬雙極板相關技術已申請多項國內外專利以突破國際現有技術的屏障，朝向關鍵技術本土化目標邁進。目前技術平台可與國際技術領先知名品牌之相關產品進行橫向或垂直整合，發揮全方位解決方案之應用績效。

## 結 語

燃料電池至今已可見於各種的應用市場與領域，隨著應用系統與使用情境的差異，對於組件需求有不同的考量，對於成本亦有不同的容許空間。大致上來說，符合低成本及可滿足大量生產規模的技術，如射出成形、沖壓成形等生產速度較快的工藝技術將是最主要的趨勢。☞（參考文獻請見材料世界網<http://www.materialsnet.com.tw>）

## 致 謝

感謝經濟部能源局「103年度高效率氫能與燃料電池技術研發計畫(Development of High Efficiency Hydrogen Energy and Fuel Cell Technology)」(計畫編號: 103-D0112)於研究經費上之支持。

## 參考文獻

1. The Fuel Cell Industry Review, FuelCell Today, 2013
2. <http://www.futureenergies.com/pictures/fuelcellpower.jpg>
3. <http://www.hydrogen.energy.gov/>
4. Derieth T, Bandlamudi G, Beckhaus P, Kreuz C, Mahlendorf F, Heinzl A. Development of highly filled graphite compounds as bipolar plate materials for low and high temperature PEM fuel cells. Journal of New Materials for Electrochemical Systems, 11, 21-29 (2008)
5. Davies D. P., Adcock P. L., Turpin M., Rowen S. J., Journal of Power Sources (2000) 86, 237
6. Kim J. S., Peelen W. H. A., Hemmes K., Makkus R. C., Corrosion Science (2002)44, 635