



## 平板式固態氧化物燃料電池性能及反應物分佈情形之數值模擬

# Numerical Simulation on the Performance and Reactants Distribution in the Planar Solid Oxide Fuel Cells

蔡錦山<sup>1</sup> 葉修宇<sup>2</sup>

Chin-Shan, Tsai<sup>1</sup>, Hsiu-Yu, Yeh<sup>2</sup>

南榮科技大學工程科技研究所副教授<sup>1</sup>

南榮科技大學工程科技研究所研究生<sup>2</sup>

1 Associate Professor, Graduate School of Engineering Science and Technology

Nan Jeon University of Science and Technology

2 Postgraduate, Graduate School of Engineering Science and Technology

Nan Jeon University of Science and Technology

### 摘 要

本研究主要是以三維多物種傳輸之物理模型，探討流道結構及反應氣體流向對平板式固態氧化物燃料電池性能及反應物分佈情形之影響。本文所模擬之平板式固態氧化物燃料電池，其流道結構之長度×寬度×流道板肋部寬度尺寸分別為 10mm×0.5mm×1.3mm、10mm×0.75mm×1.3mm 及 10mm×1.0mm×1.3mm。分析範圍包括氣體流道、陽極、陰極及電解質，所使用之統御方程式為質量守恆方程式、動量守恆方程式、物種守恆方程式及電荷守恆方程式，利用有限元素軟體 COMSOL Multiphysics 求數值解。經由比較各流道之燃料電池極化曲線及功率密度曲線，結果顯示燃料電池性能隨流道寬度增加而提昇。燃料電池中陽極之氫氣及陰極之氧氣質量分率沿著流動方向而降低；水蒸汽質量分率則隨著流動方向而升高；而最高法向離子電流密度發生於陰極入口處。供應固態氧化物燃料電池之反應氣體為同向流時，所獲得之燃料電池性能及反應物分佈情形優於逆向流。

關鍵字：多物種傳輸、平板式固態氧化物燃料電池、流道結構、極化曲線

### 一、前言

近年來由於能源日益匱乏及溫室效應之影響，世界各國更努力積極發展使用較為乾淨、環保及有效率之能源技術，諸如風力能、水力能、太陽能、生質能及燃料電池等。燃料電池是一種經由電化學反應將燃料化學能直接轉化成電能的發電方式，具有低污染、高效率、無噪音及低震動等優點。燃料電池依電解質與操作溫度可區分為鹼性燃料電池(alkaline fuel cell, AFC)、固態氧化物燃料電池(solid oxide fuel cell, SOFC)、直接甲醇燃料電池(direct methanol fuel cell, DMFC)、磷酸燃料電池(phosphoric





acid fuel cell, PAFC)、熔融碳酸鹽燃料電池(molten-carbonate fuel cell, MCFC)及質子交換膜燃料電池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) (Kordesch and Simader, 1996; 鄭煜騰、鄭耀宗, 1997; 吳千舜、諸柏仁, 2004; 黃鎮江, 2005)。

在諸多類型之燃料電池中，以固態氧化物燃料電池的能量轉換效率最高，約為60%，若配合汽電共生系統則更可達到80%以上。固態氧化物燃料電池由陽極(anode)、電解質(electrolyte)及陰極(cathode)所組成，其組成材料為全固態的金屬氧化物、成本低廉。固態氧化物燃料電池之操作溫度為600°C~1200°C，因此極適合連續式的操作環境，可應用於發電機組，此亦為目前SOFC的主要發展方向，初期可用於大型建築物的輔助電力系統，等將來技術更為成熟之後，可做為獨立分散式的發電站或進入家用的龐大市場。

Brinkman et al. (1995)在其研究中探討當溫度分別為1759K及2057K時，對氧離子傳導性的影響，利用平均平方位移(mean square displacement, MSD)及Nernst-Einstein relation即可求得離子之傳導性。

Achenbach (1994)建立平板式(planar)固態氧化物燃料電池之物理模型，研究在不同流場型態下固態氧化物燃料電池之溫度場及電場分佈情形。其研究結果顯示，由於內重組反應會吸收大量熱量，逆向流(counter flow)之內部溫度梯度最大、同向流(co-flow)之電流密度分佈最均勻，而整體之燃料電池效率則以逆向流較好。

Recknagle et al. (2003)建構三維之固態氧化物燃料電池模組，模擬陰極和陽極中的反應氣體、溫度場和電流的分佈及燃料使用率，結果發現其溫度場的分佈主要取決於燃料供給壓力及溫度；而同向流可使電池內部呈現最均勻之溫度場分佈。

Zhao and Virkar (2005)根據實驗結果，發展平板式陽極支撐型固態氧化物燃料電池之半經驗式，研究電解質、陽極觸媒層及陰極支撐層之厚度、陽極支撐層孔隙率等參數對燃料電池性能之影響。Zhao and Virkar之實驗結果指出，在溫度800°C時，固態氧化物燃料電池之最大功率密度為1.8W/cm<sup>2</sup>。

目前固態氧化物燃料電池的發展主要分為管式(tubular)與平板式，其中管式固態氧化物燃料電池需要較高之操作溫度(~1000°C)，此結構會有較高的歐姆阻抗，因此效率會較平板式差，不過卻無平板式難以解決的高溫氣密問題，因此發展中溫型的固



態氧化物燃料電池（600~800°C）將是未來的研究趨勢(Yamamoto, 2000)。

管型 SOFC 的製程技術相當複雜、製作成本高昂、電流行進路線較長，因此電池內電阻損失較高，此種設計具有容易模組化及適合做為大型發電裝置的特色。平板狀的 SOFC 容易並聯組成電池模組，電流在平板狀結構的薄層電極與電解質內之行進路徑較短且均勻、內電阻較低，因此可獲得較高的電池功率密度，但其缺點為密封的難度較高。由於平板型固態氧化物燃料電池具有高功率密度及低製作成本之優點，因此成為 SOFC 的發展趨勢，本文亦選定以平板狀的 SOFC 作為研究對象。

## 二、平板式固態氧化物燃料電池物理模型

本研究主要是針對直通型流道之平板式固態氧化物燃料電池，以物理耦合軟體 COMSOL Multiphysics 作為分析工具，並提出合理可行之設計、分析方法與數值分析，探討流道結構及反應氣體流向，對平板式固態氧化物燃料電池性能及反應物分佈情形之影響。

### （一）幾何形狀與尺寸

本文所探討之平板式固態氧化物燃料電池，為三維多物種傳輸之數值模型，其流道型式為直通型流道，模擬區域則包括陽極、電解質膜及陰極三個部分，其中陽極、陰極由氣體流道出入口、雙極集電板、氣體擴散層及觸媒層所組成。為簡化問題，將流道出入口、集電板及觸媒層視為邊界條件；本研究之物理模型如圖1所示，各直通型流道之長度、寬度及肋部寬度分別為10mm×0.5mm×1.3mm、10mm×0.75mm×1.3mm及10mm×1.0mm×1.3mm。

本研究之平板式固態氧化物燃料電池，其幾何厚度尺寸分別為：R1 陰極擴散層 0.1mm、R2 陽極集電板 0.1mm、R3 電解質膜 0.1mm、R4 陽極擴散層 0.1mm、R5 陰極流道 0.4mm、R6 陽極流道 0.4mm 及 R8 陰極集電板 0.1mm，如圖 2 所示。

### （二）基本假設





本文利用數值模擬之計算結果，探討流道結構及反應氣體流向，對平板式固態氧化物燃料電池性能及反應物分佈情形之影響，為了簡化方程式的困難性，針對模型做了以下之假設：

1. 忽略重力場及磁力場之影響，且流場為穩態之層流流場。
2. 燃料電池之溫度場為均勻分佈。
3. 所有反應物及生成物均為氣體，且為不可壓縮之理想氣體、牛頓流體。
4. 流體的黏滯係數與密度均為常數。
5. 陽極流體為氫氣、水蒸汽；陰極流體為氧氣、水蒸汽及氮氣。
6. 擴散層及質子交換膜為均質、等向之多孔性介質。
7. 質子只能在電解質中傳輸；電子則僅能在固相中傳輸。

### (三) 統御方程式

分析固態氧化物燃料電池所使用之統御方程式，主要為質量守恆方程式、動量守恆方程式、物種守恆方程式及電荷守恆方程式。

多孔性介質中之流體流動情形，可以質量守恆方程式及動量守恆方程式描述，而質量守恆方程式如式(1)所示：

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = S_u \quad (1)$$

$$S_u = \sum_i S_a \frac{i_{cr,i} M_i}{n_i F} \quad (2)$$

式中  $\rho$  為混合物密度( $\text{kg/m}^3$ )、 $\bar{u}$  為速度向量( $\text{m/s}$ )、 $S_u$  為平衡觸媒層電化學反應的質量消耗與生成之源項( $\text{kg/m}^3\text{-s}$ ) (在觸媒層以外的區域  $S_u = 0$ )、 $S_a$  為單位體積的反應表面積( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )、 $i_{cr}$  為局部轉移電流密度( $\text{A/m}^2$ )、 $M$  為莫耳質量( $\text{kg/mol}$ )、 $n$  為參與反應之電子數、 $F$  為法拉第常數(Faraday's constant)。

多孔性介質中之流體速度可由式(3)之動量守恆方程式 (Brinkman方程式) 求得：

$$\left( \frac{\mu}{\kappa} + S_u \right) \bar{u} = \nabla \cdot \left[ -p \bar{I} + \frac{\mu}{\varepsilon} \left( \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \bar{u}) \bar{I} \right) \right] \quad (3)$$

$$\rho = \frac{P}{R_u T} \sum_{i=1}^N M_i x_i \quad (4)$$



式中  $\kappa$  為多孔性介質之滲透性(permeability,  $m^2$ )、 $\mu$  為動黏滯性係數(Pa-s)、 $\varepsilon$  為孔隙率(porosity)、 $p$  為壓力(Pa)、 $R_u$  為通用氣體常數(J/mol·K)、 $T$  為燃料電池操作溫度(K)、 $M$  為莫耳質量(kg/mol)、 $x$  為莫耳分率。

描述流道中之流體流動情形，則如式(5)及式(6)所示：

$$\nabla \cdot (\rho \bar{u}) = 0 \quad (5)$$

$$\rho(\bar{u} \cdot \nabla)\bar{u} = \nabla \cdot \left[ -p\bar{I} + \mu \left( \nabla \bar{u} + (\nabla \bar{u})^T - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \bar{u})\bar{I} \right) \right] \quad (6)$$

一般固態氧化物燃料電池之陽極流體為氫氣及水蒸汽；陰極則為氧氣、水蒸汽及氮氣。當多孔性介質中發生異種(heterogeneous)化學反應時，其成分之消耗或生成分佈情形，可以式(7)之Maxwell-Stefan方程式描述：

$$\rho \bar{u} \cdot \nabla \omega_i + \nabla \cdot \left\{ -\rho \omega_i \sum_{j=1}^N D_{ij}^{eff} \left[ \nabla x_j + (x_j - \omega_j) \frac{\nabla p}{p} \right] \right\} = R_i \quad (7)$$

式中  $\rho$  為式(4)之混合物密度( $kg/m^3$ )、 $\bar{u}$  為速度向量(m/s)、 $\omega$  為質量分率、 $x$  為莫耳分率、下標  $i$  代表流體成份為氫氣( $H_2$ )、水蒸汽( $H_2O$ )、氧氣( $O_2$ )、氮氣( $N_2$ )， $R$  為源項( $kg/m^3 \cdot s$ )，在本研究中將不考慮因溫度場所引起之源項。 $D_{ij}$  為二元氣體擴散係數( $m^2/s$ )，其值與溫度有關。

一般而言，觸媒層結構十分複雜，在操作原理上，氧氣及水蒸汽由流道進入後，藉由擴散效應擴散至氣體擴散層，然後再往觸媒層擴散，並發生電化反應，其過程遵守成分平衡及電位平衡方程式，在氣體流動上二元氣體擴散係數  $D_{ij}$  之值為(王建凱，2010)：

$$D_{ij} = k_d \times \frac{T^{1.75}}{p \left( v_i^{1/3} + v_j^{1/3} \right)^2} \left( \frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)^{1/2} \quad (8)$$

式中  $k_d$  為參考擴散係數( $m^2/s$ )、 $T$  為燃料電池操作溫度(K)、 $p$  為壓力(Pa)、 $v$  為莫耳擴散體積( $m^3/mol$ )、 $M$  為莫耳質量(kg/mol)，因擴散係數受多孔性介質孔隙率  $\varepsilon$  (porosity) 的影響，在本研究中以Bruggeman修正模式計算多孔性介質之等效擴散係數 (Grujicic and Chittajallu, 2004)：





$$D_{ij}^{eff} = D_{ij} \varepsilon^{\tau} \quad (9)$$

式中  $\tau$  為彎曲度(tortuosity)。固態氧化物燃料電池電荷守恆發生在包括電解質、觸媒層及氣體擴散層在內之固體部分，其中觸媒層包括離子導體（電解質）與電子導體（觸媒）等兩種固態材料，而電解質與氣體擴散層分別僅含離子導體與電子導體成分。在固態氧化物燃料電池中，使用式(10)及式(11)之電荷守恆方程式，可計算陽極、陰極觸媒層中離子導體電位及電子導體電位分佈情形：

$$\nabla \cdot (-\sigma_{ionic} \nabla \phi_{ionic}) = S_a i_{ct} \quad (10)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma_{elec} \nabla \phi_{elec}) = S_a i_{ct} \quad (11)$$

式中  $\sigma_{ionic}$ 、 $\sigma_{elec}$  分別為離子導體及電子導體之等效導電率(S/m)， $\phi_{ionic}$ 、 $\phi_{elec}$  分別為離子導體電位(V)及電子導體電位(V)， $S_a$  為單位體積的反應表面積( $m^2/m^3$ )、 $i_{ct}$  為局部轉移電流密度( $A/m^2$ )。

在電解質及陽極、陰極氣體擴散層中之離子導體電位及電子導體電位分佈情形，則可應用式(12)及式(13)求得：

$$\nabla \cdot (-\sigma_{ionic} \nabla \phi_{ionic}) = 0 \quad (12)$$

$$\nabla \cdot (-\sigma_{elec} \nabla \phi_{elec}) = 0 \quad (13)$$

在本研究中以Butler-Volmer方程式，描述陽極及陰極之局部轉移電流密度  $i_{ct,a}$ 、 $i_{ct,c}$  ( $A/m^2$ )，如式(14)及式(15)所示(Grujicic and Chittajallu, 2004, Ju et al., 2005)：

$$i_{ct,a} = i_{0,a} x_{H_2} \frac{c_t}{c_{H_2,ref}} \left[ \exp\left(\frac{0.5F}{R_u T} \eta\right) - \exp\left(\frac{-0.5F}{R_u T} \eta\right) \right] \quad (14)$$

$$i_{ct,c} = i_{0,c} \left[ \exp\left(\frac{0.5F}{R_u T} \eta\right) - x_{O_2} \frac{c_t}{c_{O_2,ref}} \exp\left(\frac{-0.5F}{R_u T} \eta\right) \right] \quad (15)$$

式中下標  $a$  表陽極、 $c$  表陰極， $i_{0,a}$  與  $i_{0,c}$  分別為陽極及陰極之交換電流密度( $A/m^2$ )、 $x_{H_2}$  與  $x_{O_2}$  分別為氫氣及氧氣之莫耳分率、 $c_{H_2,ref}$  與  $c_{O_2,ref}$  分別為氫氣及氧氣之參考濃度( $mol/m^3$ )、 $c_t$  為全部物種總濃度( $mol/m^3$ )、 $F$  為Faraday常數(C/mol)、 $R_u$  為通用氣體常數(J/mol·K)、 $T$  為燃料電池操作溫度(K)、 $\eta$  為過電位(V)。過電位  $\eta$  之值可由式(16)求得：





$$\eta = \phi_{elec} - \phi_{ionic} - \Delta\phi_{eq} \quad (16)$$

式中  $\phi_{elec}$  為電子導體電位(V)、 $\phi_{ionic}$  為離子導體電位(V)、 $\Delta\phi_{eq}$  為平衡電位(V)。

#### (四) 邊界條件

在本研究針對固態氧化物燃料電池單電池模型的邊界條件，主要包括空氣電極（陰極）、固態電解質（YSZ隔膜）及燃料電極（陽極）三合一結構的PEN板（膜電極組）、陽極及陰極氣體流道及雙極板。在陽極、陰極流道入口及出口處之邊界條件，分別設定為均勻之壓力，即

$$\text{陽極入口處： } p = p_{ref} + \Delta p_a \quad (17)$$

$$\text{陽極出口處： } p = p_{ref} \quad (18)$$

$$\text{陰極入口處： } p = p_{ref} + \Delta p_c \quad (19)$$

$$\text{陰極出口處： } p = p_{ref} \quad (20)$$

式中陽極及陰極出口處之壓力值  $p_{ref}$ ，在本研究中設為101325Pa， $\Delta p_a$  和  $\Delta p_c$  分別為陽極及陰極之入口、出口壓力差值(Pa)。除陽極、陰極流道入口及出口處外，其餘之邊界條件採用無滑移(no slip)邊界。

在本研究中固態氧化物燃料電池陽極之反應氣體為氫氣及水蒸汽；陰極則為氧氣、水蒸汽及氮氣，因此物種守恆方程式之邊界條件，在陽極入口處設定氫氣質量分率，陽極出口處則以對流通量(convective flux)求得氫氣及水蒸汽之質量分率；在陰極入口處設定氧氣及水蒸汽質量分率，陰極出口處則以對流通量求得氧氣、水蒸汽及氮氣之質量分率。

燃料電池之平均電流密度，定義為所有法向離子電流密度之積分平均值。陰極與陽極集電板之電位差即為燃料電池之操作電壓  $V_{cell}$  (V)，而燃料電池之操作電壓  $V_{cell}$  可由式(21)求得，其中  $\Delta\phi_{eq,a}$  和  $\Delta\phi_{eq,c}$  分別為陽極及陰極之平衡電位(V)，其值分別設定為  $\Delta\phi_{eq,a} = 0$  V、 $\Delta\phi_{eq,c} = 1$  V。在本研究中，將陽極入口處集電板之電位設為接地(ground)，而陰極入口處集電板之電位設為燃料電池操作電壓  $V_{cell}$ ，其餘之邊界條件則設為電絕緣(electric insulation)。

$$V_{cell} = \Delta\phi_{eq,c} - \Delta\phi_{eq,a} - V_{pol} \quad (21)$$





式中  $V_{pol}$  為極化電壓(V)。

本研究以COMSOL Multiphysics軟體求數值解，經由選取模組、繪圖建模、設定參數、物理性質、邊界條件、建立網格、求解及後處理等步驟，可得到數值模擬結果，本文進行數值模擬時所使用之主要相關參數預設值如表1所示。

### 三、結果與討論

為探討直通式流道結構對固態氧化物燃料電池性能及反應物分佈情形的影響，圖3所模擬之SOFC為逆向流，其流道長度×寬度×流道板肋部寬度尺寸為10mm×1.0mm×1.3mm。由圖3之結果顯示，燃料電池中陽極之氫氣及陰極之氧氣質量分率沿著流動方向而降低，而水蒸汽質量分率隨著流動方向而升高，最高法向離子電流密度則發生於陰極入口處。

比較圖4中各流道結構之SOFC極化曲線及輸出功率密度曲線，結果顯示隨著流道寬度之增加燃料電池效能隨之提昇。因增加流道及肋部寬度會降低內電阻及增加收集電子之面積，進而提昇電極反應面積及燃料電池性能。

一般同向流及逆向流兩種不同之流場型態，對氧氣質量分率在流道間的濃度分佈差異並不大，但由於氧氣電化學反應所產生之氧離子，經由電解質傳遞至陽極、導入三相介面反應產生電流密度，所以氧氣濃度分佈不能太差。要改善氧氣濃度分佈及電流密度分佈之不足，可藉由提高氧氣流量來增加氧氣的傳輸量。

同向流的氫氣質量分率大約在入口處氣體均勻分佈在氣體擴散電極，且有助於在觸媒層上之電化學反應；而逆向流的氫氣質量分率則是在流道間有較大的濃度變化，因此其觸媒層之電化學反應較同向流來得差。

比較圖3、圖5之氫氣質量分率濃度分佈情形，發現同向流在流道的濃度分佈比逆向流均勻，因此可使氫氣能夠均勻的散佈在觸媒層中、可獲得較佳的電化學反應；而氧氣之濃度分佈也相當重要，不管是同向流或逆向流，提高氧氣流量都有助於延緩電池內部之濃度極化、提升燃料電池的整體效能。圖6之模擬結果顯示，同向流之極化曲線及輸出功率密度曲線皆優於逆向流，因此供應固態氧化物燃料電池之反應氣體應





採同向流，可得到較佳之燃料電池性能及反應物分佈情形。

#### 四、結論

本研究以三維多物種傳輸數值模型，探討直通式流道結構及反應氣體流向對平板式固態氧化物燃料電池性能的影響。經由分析模擬結果，可得到以下之結論：

1. 本文所模擬之氣體流道長度、寬度及流道肋部寬度分別為 $10\text{mm}\times 0.5\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ 、 $10\text{mm}\times 0.75\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ 及 $10\text{mm}\times 1.0\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ ，經由比較各流道之極化曲線及功率密度曲線，結果顯示增加燃料電池流道寬度可提昇燃料電池之性能。
2. 燃料電池中陽極之氫氣及陰極之氧氣質量分率沿著流動方向而降低，水蒸汽質量分率則隨著流動方向而升高，而最高法向離子電流密度發生於陰極入口處。
3. 供應固態氧化物燃料電池之反應氣體為同向流時，所獲得之燃料電池性能及反應物分佈情形皆優於逆向流。

#### 參考文獻

- 黃鎮江 (2005)。綠色能源。新北市：全華。
- 鄭煜騰、鄭耀宗 (1997)。質子交換膜型燃料電池的製造技術。能源季刊，27 (2)，118。
- 吳千舜、諸柏仁 (2005)。燃料電池質子交換膜的最近發展。CHEMISTRY (THE CHINESE CHEM. SOC., Taipei)，62 (1)，123~138。
- 王建凱 (2010)。固態氧化物燃料電池膜電極組特性模擬及數值分析。台南大學碩士論文。
- Achenbach, E. (1994). Three-dimensional and time-dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, 49, 333-348.
- Brinkman, H. W., Briels, W. J. and Verweij, H. (1995). Molecular dynamics simulations of yttria-stabilized zirconia, *Chemical Physics Letters*, 247, 386-390.
- Grujicic, M. and Chittajallu, K. M. (2004). Design and optimization of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells, *Applied Surface Science*, 227, 56-72.
- Ju, H., Meng, H. and Wang, C. Y. (2005). A single-phase, non-isothermal model for PEM fuel cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 1303-1315, 2005.
- Kordesch, K. and Simader, G. (1996). *Fuel cells and their applications*, VCH, New York, 51-179.
- Recknagle, K. P., Williford, R. E., Chick, L. A., Rector, D. R. and Khaleel, M. A. (2003). Three-dimensional thermo-fluid electrochemical modeling of planar SOFC stacks,





- Journal Power Sources*, 113, 109-114.  
 Yamamoto, O. (2000). Solid oxide fuel cell: fundamental aspect and prospect, *Electrochimica Acta*, 45, 2423-2435.  
 Zhao, F. and Virkar, A. V. (2005). Dependence of polarization in anode-supported solid oxide fuel cells on various cell parameters, *Journal of Power Sources*, 141, 79-95, 2005.

表 1 數值模擬主要相關參數預設值

物理參數	符號	預設值	單位
動力黏滯性係數	$\mu$	$2.1 \times 10^{-5}$	Pa-s
大氣壓力	$p_{ref}$	101325	Pa
法拉第常數	$F$	96500	C/mol
通用氣體常數	$R_u$	8.314	J/mol-K
空氣黏度	$\mu_{air}$	$3.0 \times 10^{-5}$	Pa-s
陽極交換電流密度	$i_{0a}$	1	A/m <sup>2</sup>
陰極交換電流密度	$i_{0c}$	0.1	A/m <sup>2</sup>
陽極單位體積的反應表面積	$S_{a-a}$	$1 \times 10^9$	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
陰極單位體積的反應表面積	$S_{a-c}$	$1 \times 10^9$	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup>
初始電池極化	$V_{pol}$	0.05	V
陽極均衡電壓	$\Delta\phi_{eq,a}$	0	V
陰極均衡電壓	$\Delta\phi_{eq,c}$	1	V
H <sub>2</sub> 莫耳擴散體積	$v_{H_2}$	$6 \times 10^{-6}$	m <sup>3</sup> /mol
O <sub>2</sub> 莫耳擴散體積	$v_{O_2}$	$1.66 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup> /mol
N <sub>2</sub> 莫耳擴散體積	$v_{N_2}$	$1.79 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup> /mol
H <sub>2</sub> O莫耳擴散體積	$v_{H_2O}$	$1.27 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup> /mol
H <sub>2</sub> 摩爾質量	$M_{H_2}$	2	g/mol
O <sub>2</sub> 摩爾質量	$M_{O_2}$	32	g/mol
N <sub>2</sub> 摩爾質量	$M_{N_2}$	28	g/mol
H <sub>2</sub> O摩爾質量	$M_{H_2O}$	18	g/mol
參考擴散係數	$k_d$	$3.16 \times 10^{-8}$	m <sup>2</sup> /s
陽極入口H <sub>2</sub> 質量分率	$\omega_{a-H_2,in}$	0.4	
陰極入口O <sub>2</sub> 質量分率	$\omega_{c-O_2,in}$	0.15	
陽極入口H <sub>2</sub> O質量分率	$\omega_{a-H_2O,in}$	0.82	
陰極入口H <sub>2</sub> O質量分率	$\omega_{c-H_2O,in}$	0.43	
燃料電池結構尺寸		10×1.0×1.3	mm×mm×mm
燃料流向		逆向流	
燃料電池操作溫度	$T$	800	°C
陽極入口、出口壓力差值	$\Delta p_a$	2	Pa
陰極入口、出口壓力差值	$\Delta p_c$	4	Pa





多孔性介質孔隙率	$\varepsilon$	0.4	
多孔性介質彎曲度	$\tau$	1.5	
多孔性介質陽極滲透性	$\kappa_a$	$1 \times 10^{-13}$	$m^2$
多孔性介質陰極滲透性	$\kappa_c$	$1 \times 10^{-13}$	$m^2$
電解質導電率	$\sigma_e$	5	S/m
電流集電板導電率	$\sigma_s$	5000	S/m

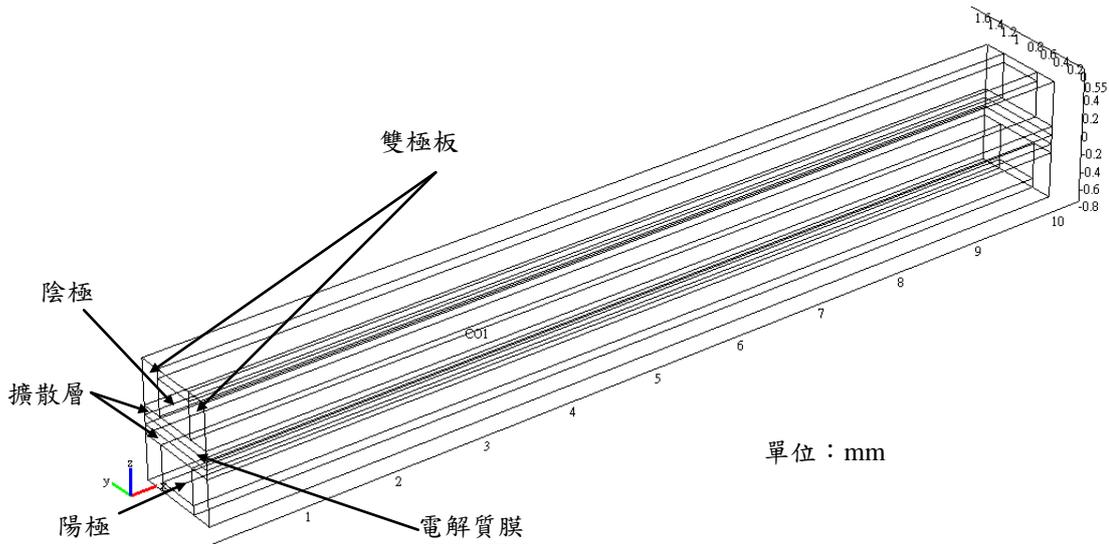


圖1 平板式固態氧化物燃料電池物理3D模型圖

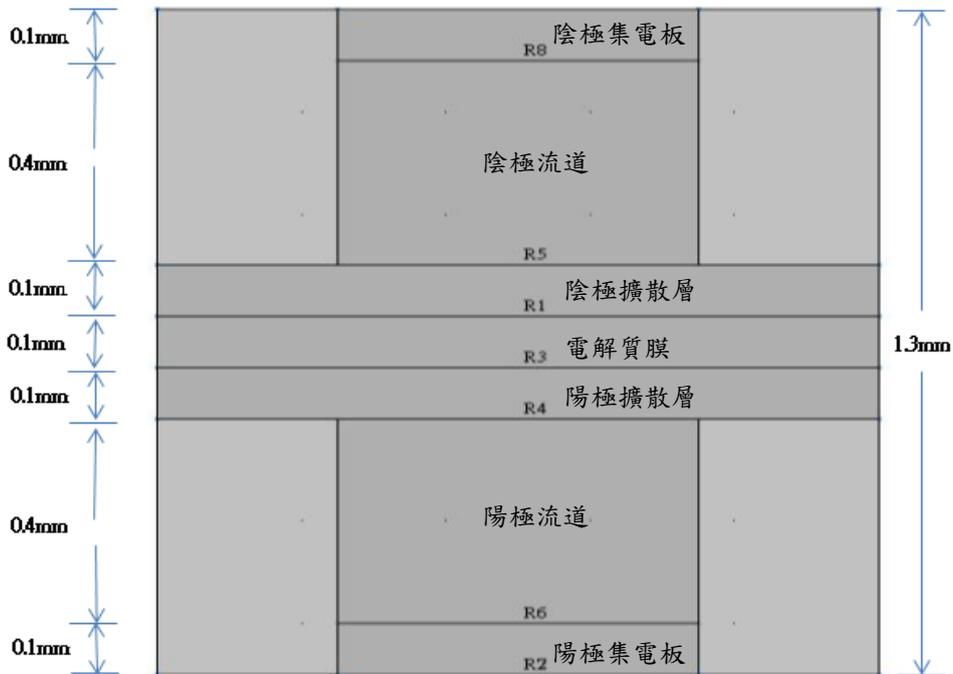


圖2 平板式固態氧化物燃料電池物理模型截面圖



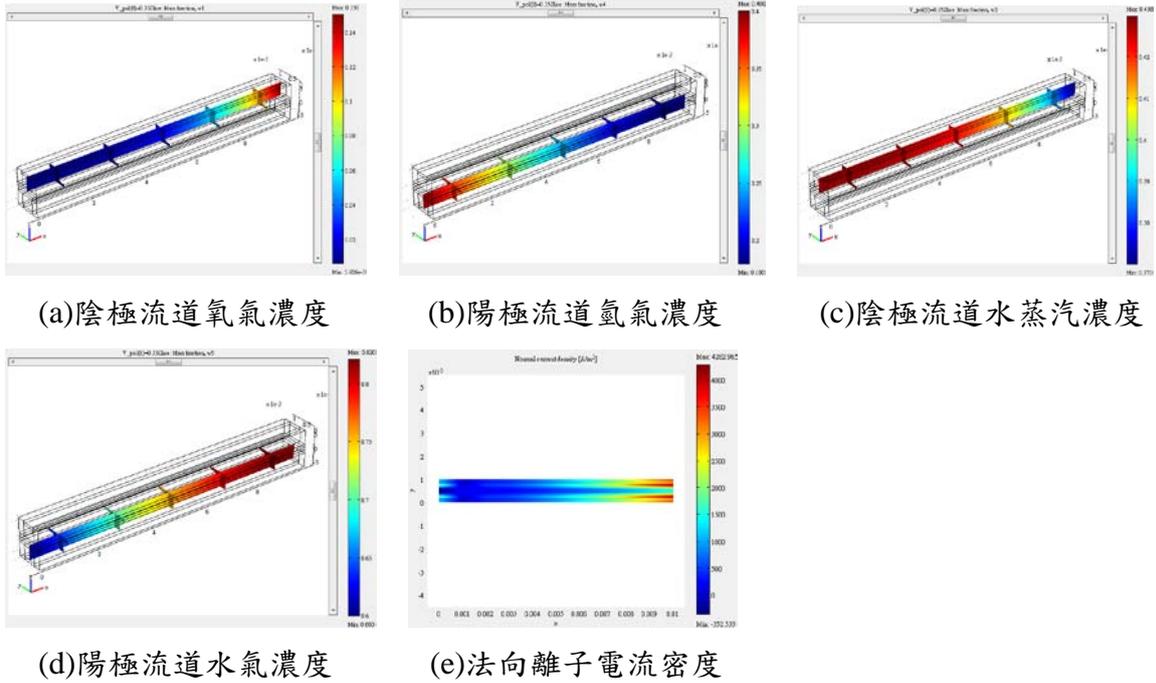
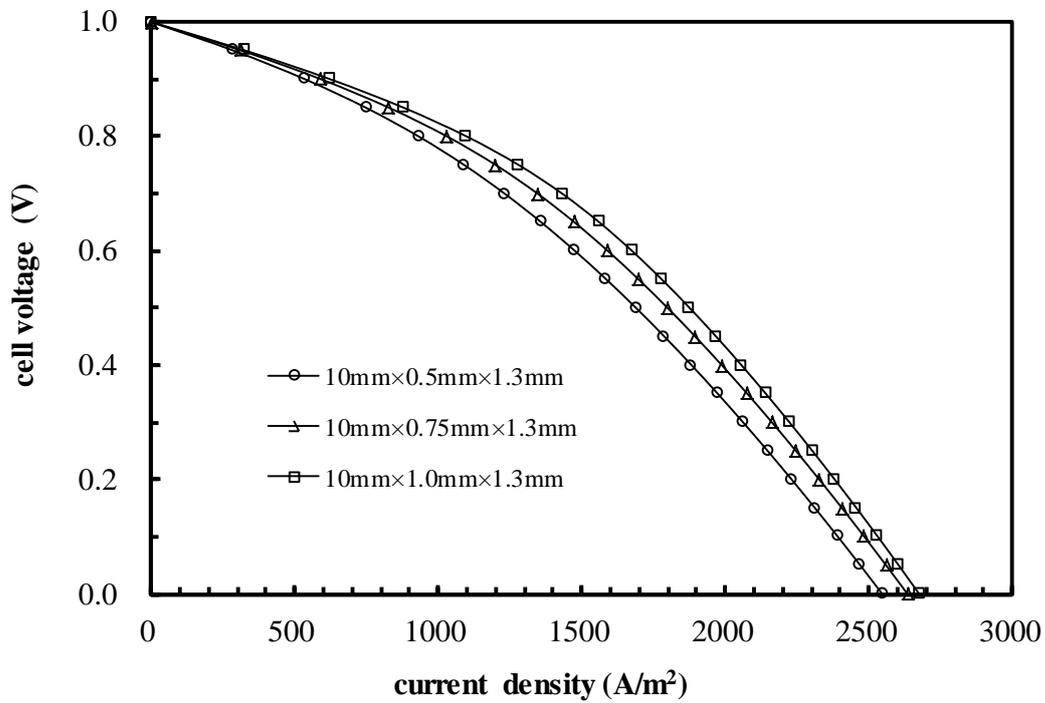
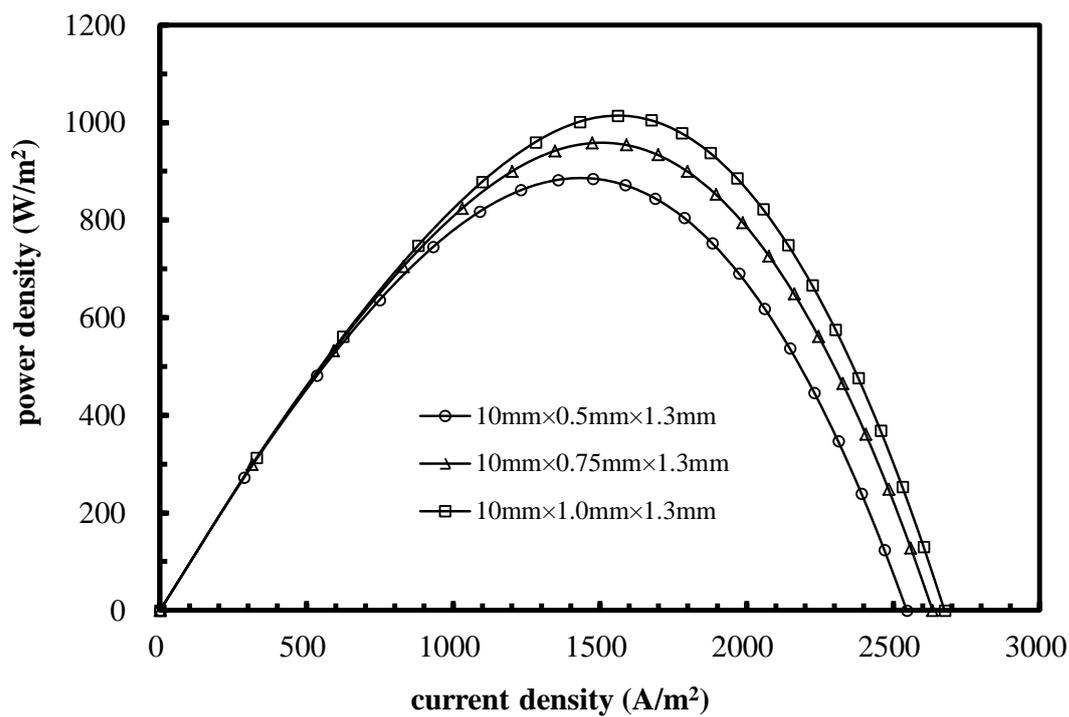


圖3 流道結構為10mm×1.0mm×1.3mm燃料流向為同向流之平板式固態氧化物燃料電池擴散層反應氣體及法向離子電流密度擴散層物質分佈圖



(a)極化曲線





(b) 功率密度及電流密度

圖4 流道結構對平板式固態氧化物燃料電池性能之影響

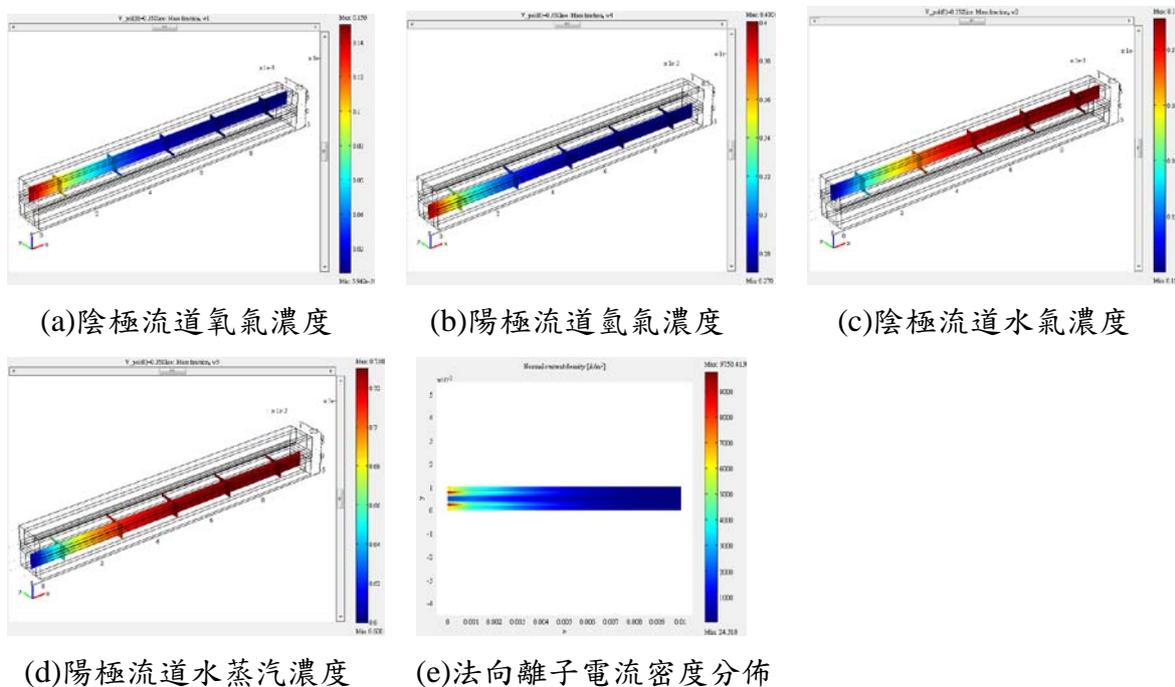
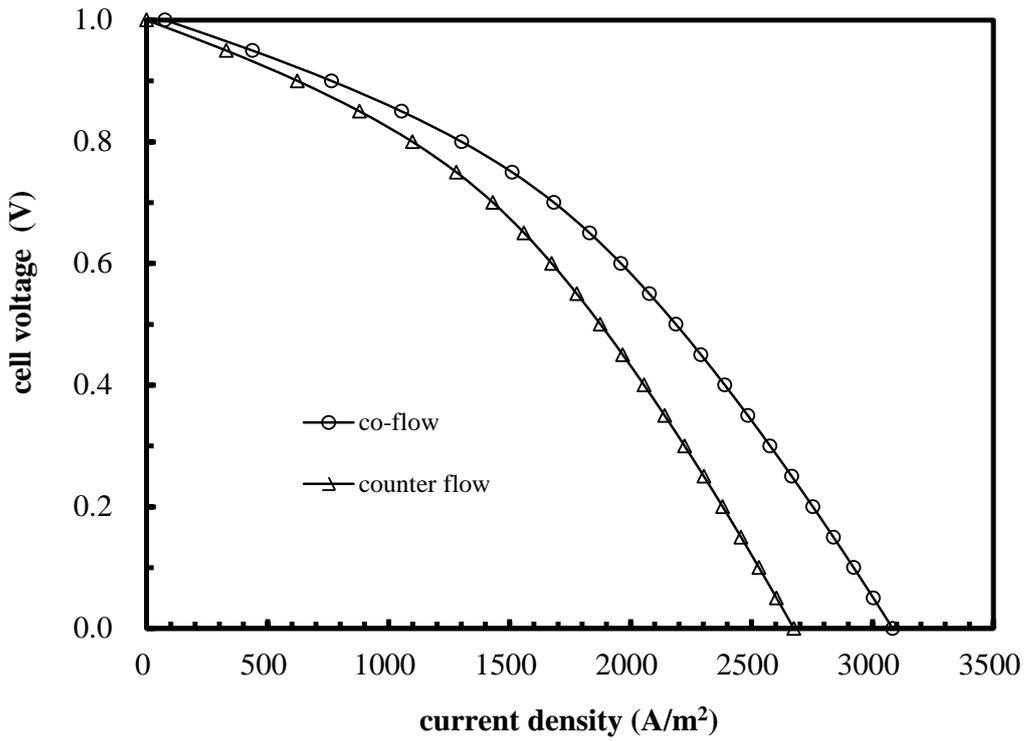
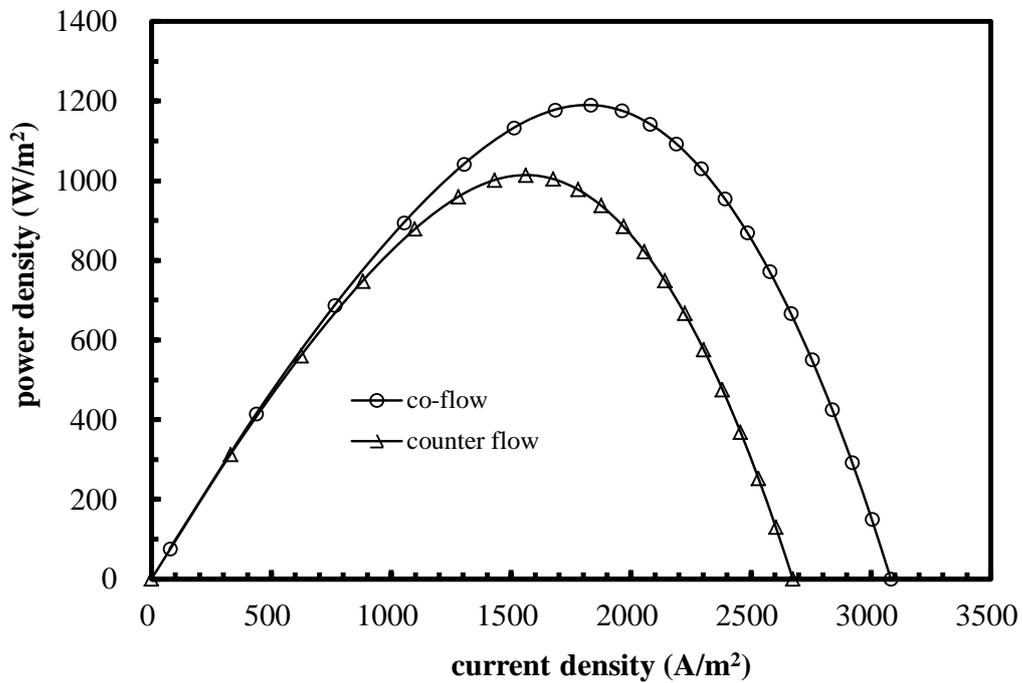


圖5 燃料流向為同向流之平板式固態氧化物燃料電池擴散層反應氣體及法向離子電流密度分佈圖





(a)極化曲線



(b)功率密度及電流密度

圖6 燃料流向對平板式固態氧化物燃料電池性能之影響

