



## 平板式固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場之數值模擬

# Numerical Simulation on the Electric Fields of the Anode Current Collector in the Planar Solid Oxide Fuel Cells

蔡錦山

Chin-Shan, Tsai

南榮科技大學工程科技研究所副教授

Associate Professor, 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，探討各參數對平板式固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場分佈情形之影響。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為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。經由數值模擬之結果發現，在低電流密度時各參數對燃料電池陽極電流集電板電位場分佈之影響並不大；在高電流密度時，降低燃料電池操作溫度、增加多孔性材質孔隙率及減少彎曲度皆會增加燃料電池陽極電流集電板電位場之電壓降；而陽極及陰極入口處之氣體過壓差，對陽極電流集電板電位場之分佈並無明顯之影響。

關鍵字：三維多物種傳輸、平板式固態氧化物燃料電池、陽極電流集電板、孔隙率

### 一、前言

隨著科技的進步，提升了人類生活的便利性，也促使經濟活動蓬勃發展、人口增加，使得人類對於能源的需求日益增加。由於現今所使用的能源，無論是使用核能、煤或是石油等，均會對於環境造成嚴重的污染，甚至導致全球所矚目的溫室效應及能源短缺等重大問題，因此再生能源之應用更顯重要。環觀今日所使用之風力、太陽能、水力、海洋能等再生能源，各有其發展利用上的限制，且上述之再生能源大都為集中式的發電系統，在其輸配電力上易造電力的大量損失。若此集中式發電系統一旦故障、無法正常運作時，其所影響的層面將會很大，因此，積極研究發展諸如燃料電池(fuel cell)之新能源是刻不容緩的目標。

燃料電池是一種電化學的發電裝置，與一般的傳統電池不同。燃料電池依電化學作用方式直接將化學能轉化為電能，因不用經過熱機過程，所以不受卡諾循環(Carnot





cycle)之限制，能量轉化效率可高達40~60%，對環境污染的衝擊小，在整個發電過程中，幾乎沒有排放氮氧化物和硫氧化物；二氧化碳的排放量也比傳統發電廠減少40%以上。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)，其中以固態氧化物燃料電池的能量轉換效率最高（60%以上），若配合氣電共生系統更可達到80%以上（Kordesch and Simader, 1996；鄭煜騰、鄭耀宗，1997；吳千舜、諸柏仁，2004；黃鎮江，2005）。

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SOFC之溫度場及電場分佈情形。結果顯示，逆向流之內部溫度梯度最大、同向流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SOFC模組，模擬反應氣體、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 ( $\sim 1000^{\circ}\text{C}$ )，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 ( $600\sim 800^{\circ}\text{C}$ ) 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，因而成為 SOFC 的發展趨勢，因此在本研究中將以平板式 SOFC 作為研究對象。

## 二、平板式固態氧化物燃料電池物理模型

由於電流集電板電位場之分佈情形對於燃料電池之性能有很大的影響、且相關研究較為少見，因此在本研究中將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，因受限於篇幅之限制，將僅探討各參數對平板式固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場分佈情形之影響。

### (一) 幾何形狀與尺寸

本文所研究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，直通型流道之長度、寬度及肋部寬度尺寸分別為 $10\text{mm}\times 1.0\text{mm}\times 1.3\text{mm}$ 。

### (二) 基本假設

本文利用數值模擬之計算結果，探討探討各參數對平板式固態氧化物燃料電池性





能及陽極電流集電板電位場分佈情形之影響，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(kg/m<sup>3</sup>)、 $\bar{u}$  為速度向量(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(kg/m<sup>3</sup>-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(m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>)、 $i_{cr}$  為局部轉移電流密度(A/m<sup>2</sup>)、 $M$  為莫耳質量(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：

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

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

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)， $\phi_{ionuc}$ 、 $\phi_{elec}$  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：

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

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

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  $\Delta\phi_{eq,a} = 0\text{ V}$ 、 $\Delta\phi_{eq,c} = 1\text{ V}$ 。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

一般燃料電池隨著其操作溫度提高，會造成較高的反應速率與較低之內電阻，因此可改善燃料電池之性能；然而過高之燃料電池操作溫度，將會使陰極端發生含水量不足、無法使電解質膜充分濕潤、提高內電阻，進而使燃料電池之性能下降，但溫度愈低電池整體熱能不足以讓電池內部純水完全轉換為水蒸氣，而造成電池內部發生泛濫現象，進而減低其效能，因此燃料電池之操作溫度需保持在適當值，不可過低。

本文模擬操作溫度分別為600°C、800°C及1000°C時，其對平板式固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場分佈之影響，結果發現在低電流密度時，燃料電池操作溫度之影響差異不大；但在高電流密度時，燃料電池陽極電流集電板電位場將隨操作溫度之增加而減少電壓降，進而降低燃料電池之性能，如圖2所示。

提高燃料電池陽極及陰極入口處之氣體過壓差，除可增加反應氣體之濃度，亦可提昇對流效應，使更多之反應氣體進入觸媒層，當壓力愈大時所形成之流速愈快，燃料在流道內分佈愈為均勻、擴散至觸媒層之氧氣質量分率含量將愈多，因而其電化學反應將更為完全，由於電流密度與質量分率成正比之關係，因此生成之電流密度將隨之增加、提昇燃料電池性能。

在本研究中陽極進氣過壓差  $\Delta p_a$  分別為2、4及8Pa，而陰極之進氣過壓差  $\Delta p_c$  則分別為4、7及10Pa時模擬其燃料電池性能，結果發現陽極進氣過壓差及陰極進氣過壓差對陽極電流集電板電位場之分佈並無明顯的影響，如圖3及圖4所示。

燃料電池內部除了流道及擋板之外，其他結構如電解膜、觸媒層及氣體擴散層皆具有孔隙率，使得空孔串連起來使反應氣體可在電極內部游動。一般而言，孔隙率愈小時，燃料愈難擴散至觸媒層，再加上其燃料在觸媒層內之反應面積縮小，此時將減





緩電化學反應速率；增加多孔性材質的孔隙率，可使更多的氫氣及氧氣進入催化層參與反應，因此可提高燃料電池之功率密度。雖然增加多孔性材質的孔隙率，可提高燃料電池之功率密度，但當孔隙率值過大時，反而使觸媒層及氣體擴散層之反應面積減少、進而降低燃料電池之功率密度。

本文模擬當孔隙率分別為0.2、0.4及0.6時燃料電池之性能，結果發現在低電流密度時，孔隙率對燃料電池之陽極電流集電板電位場分佈之影響並不大；但在高電流密度時，則隨孔隙率之增加，將會增加陽極電流集電板電位場之電壓降，如圖5所示。

多孔性材質彎曲度之定義為曲線之弧長與弦長比(arc-chord ratio)，即曲線之弧長與弧兩端點距離之比值。在本文中以Bruggeman修正模式計算多孔性介質的等效擴散係數，因此其值將受彎曲度的影響。藉由較大的彎曲度，可模擬出燃料電池在高電流密度時，陰極觸媒層因氧氣供應不及所產生的質傳阻抗現象，即濃度過電位。在本研究中彎曲度分別取1.5、2.0及2.5時模擬燃料電池之性能，結果發現隨著彎曲度的增加，將會減少燃料電池陽極電流集電板之電壓降，如圖6所示。

#### 四、結論

本研究以三維多物種傳輸數值模型，利用有限元素軟體COMSOL Multiphysics，配合質量守恆方程式、動量守恆方程式、物種守恆方程式、電荷守恆方程式及適當的邊界條件，探討各參數對平板式固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場分佈情形之影響。經由分析模擬結果，可得到以下之結論：

1. 在低電流密度時，各參數對平板式固態氧化物燃料之陽極電流集電板電位場分佈情形之影響並不大。
2. 在高電流密度時，燃料電池之陽極電流集電板電位場將隨操作溫度 $T$ 之增加而減少電壓降。
3. 陽極及陰極入口處之氣體過壓差 $\Delta p$ ，對陽極電流集電板電位場之分佈並無明顯之影響。
4. 在高電流密度時發現隨著孔隙率 $\varepsilon$ 的增加及彎曲度 $\tau$ 的減少，將會增加陽極電流集電板電位場之電壓降。





## 參考文獻

1. 黃鎮江 (2005)。綠色能源。新北市：全華。
2. 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。
3. 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。
4. 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。
5. Achenbach, E. (1994). Three-dimensional and time-dependent simulation of a planar solid oxide fuel cell stack, *Journal of Power Sources*, 49, 333-348.
6. Brinkman, H. W., Briels, W. J. and Verweij, H. (1995). Molecular dynamics simulations of yttria-stabilized zirconia, *Chemical Physics Letters*, 247, 386-390.
7. Grujicic, M. and Chittajallu, K. M. (2004). Design and optimization of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells, *Applied Surface Science*, 227, 56-72.
8. 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.
9. Kordesch, K. and Simader, G. (1996). *Fuel cells and their applications*, VCH, New York, 51-179.
10. 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.
11. Yamamoto, O. (2000). Solid oxide fuel cell: fundamental aspect and prospect, *Electrochimica Acta*, 45, 2423-2435.
12. 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.





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>2</sup> /m <sup>3</sup>
陰極單位體積的反應表面積	$S_{a\_c}$	$1 \times 10^9$	m <sup>2</sup> /m <sup>3</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		同向流	
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 <sup>2</sup>
多孔性介質陰極滲透性	$\kappa_c$	$1 \times 10^{-13}$	m <sup>2</sup>
電解質導電率	$\sigma_e$	5	S/m





電流集電板導電率	$\sigma_s$	5000	S/m
----------	------------	------	-----

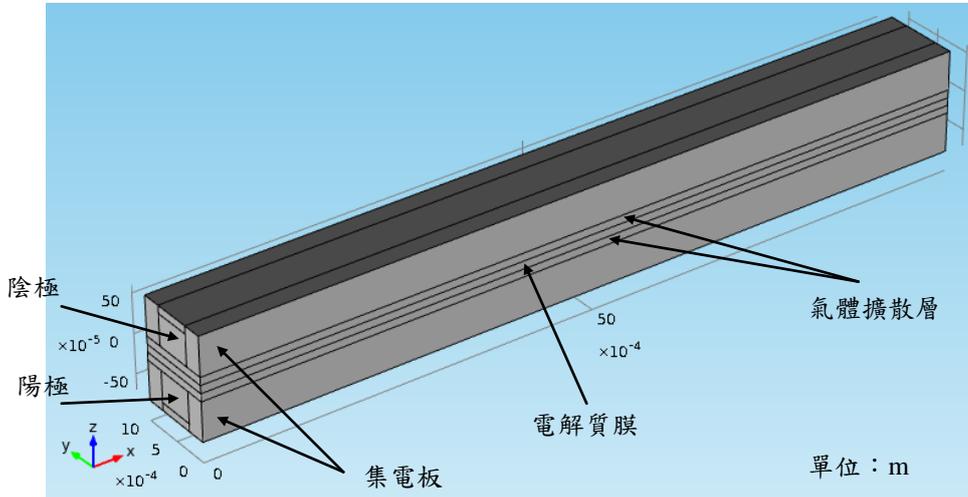


圖1 平板式固態氧化物燃料電池物理3D模型圖

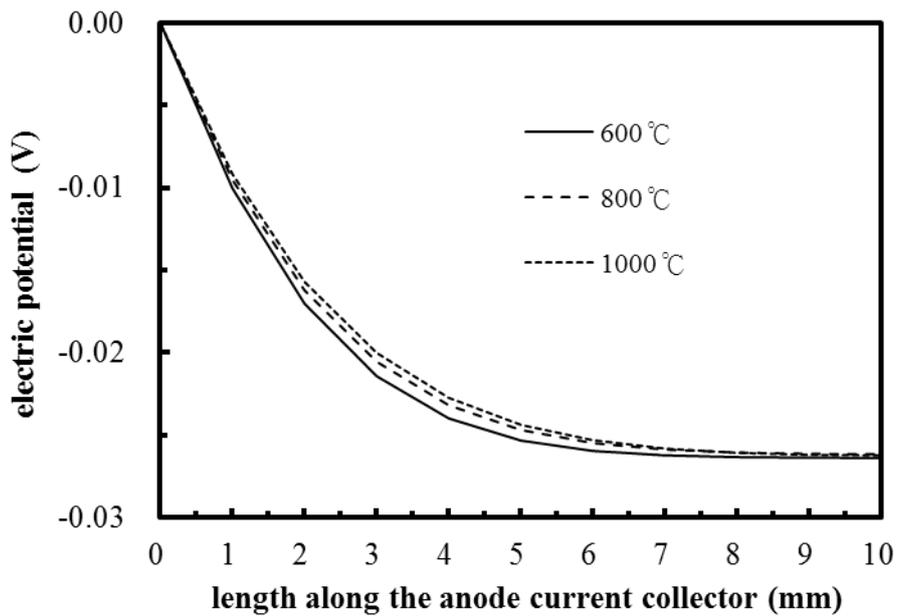


圖2 操作溫度對固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場之影響



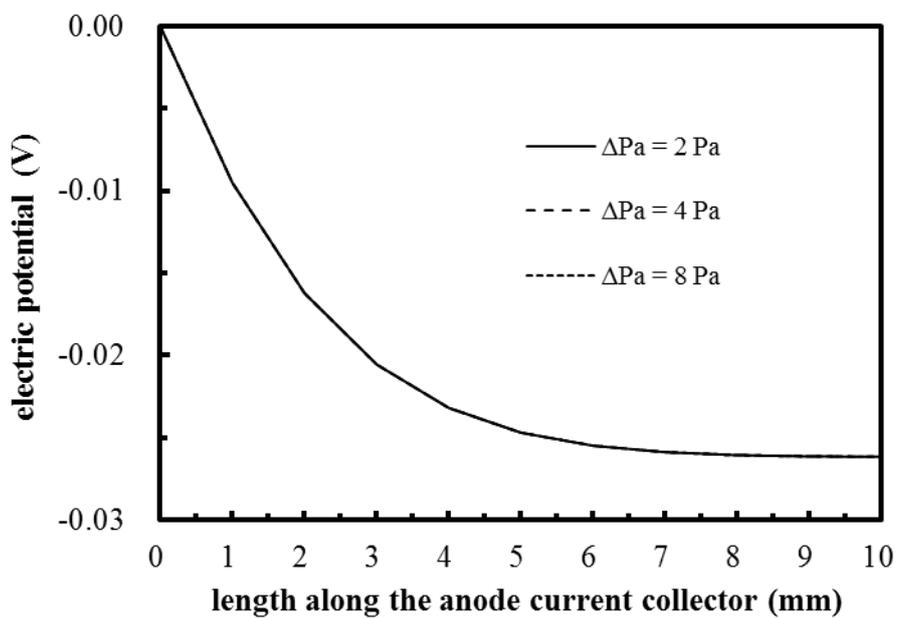


圖3 陽極進氣差壓對固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場之影響

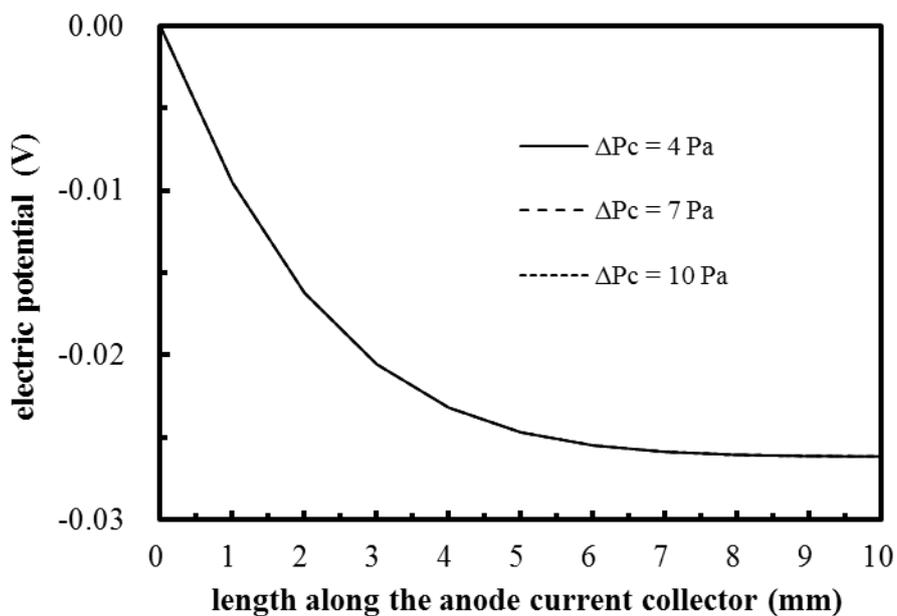


圖4 陰極進氣差壓對固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場之影響



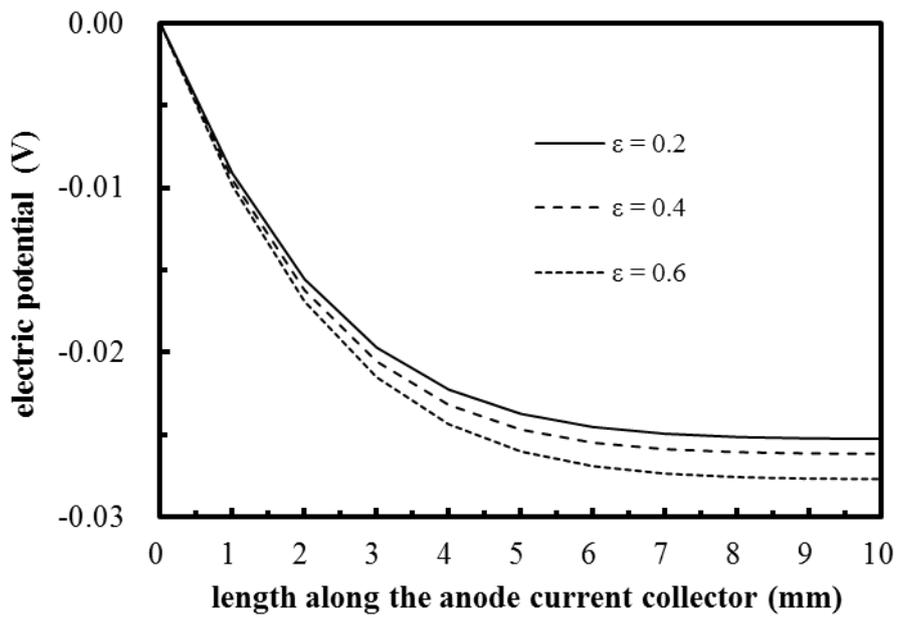


圖5 孔隙率對固態氧化物燃料電池陽極集電流電板電位場之影響

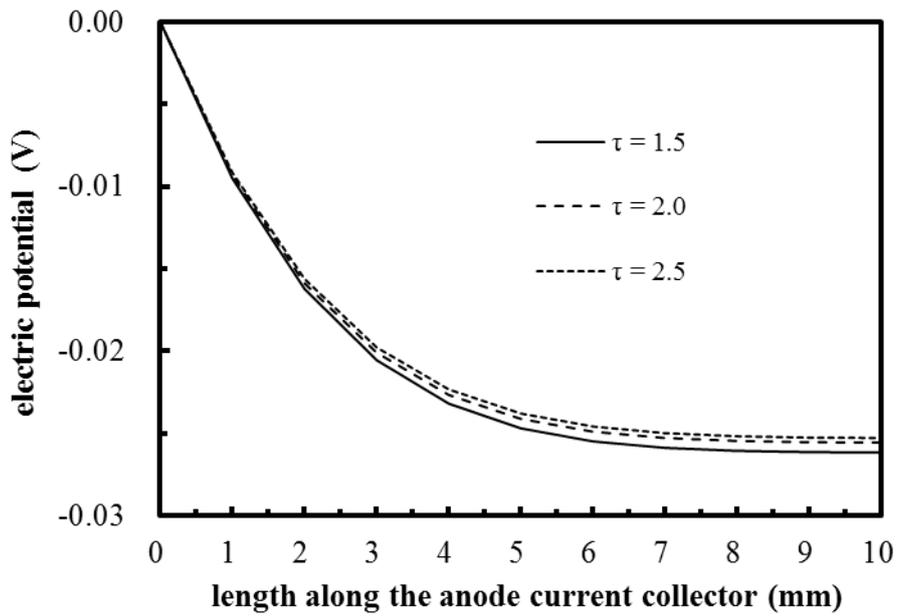


圖6 彎曲度對固態氧化物燃料電池陽極電流集電板電位場之影響

