

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

以電漿噴塗技術研製金屬支撐中低溫 SOFC 單片電池
**Development of intermediate temperature SOFC single cell on
metal support by plasma spraying technique**

計畫編號：992001INER052

受委託機關(構)：國立台北科技大學

計畫主持人：楊永欽 副教授

核研所聯絡人員：黃振興 蔡俊煌

聯絡電話：02-27712171 ext. 2762

E-mail address：ycyang@ntut.edu.tw

報告日期：99. 11. 30

目 錄

目 錄.....	I
中文摘要.....	1
英文摘要.....	3
壹、計畫緣起與目的.....	4
計畫背景及重要性.....	4
計畫目的.....	5
貳、研究方法與過程.....	6
一、試片製備.....	6
二、塗層殘留應力的量測.....	7
參、結果與討論.....	9
肆、總結論.....	14
伍、參考文獻.....	12

中文摘要

電漿熔射噴塗技術製備固態氧化物燃料電池(SOFC)的元件可避免傳統生產 SOFC 組件流程過於繁雜的缺點，同時，只需要經過中低溫結晶化處理的特點更可取代傳統需經過高溫燒結的製程，避免陽極基材因高溫燒結損失孔隙度及燒結過程中因收縮率不一致，造成電解質薄膜出現微裂縫或造成陽極基材彎曲變形。但是，利用電漿熔射噴塗將電解質與陽極及陰極材料結合後，將面臨元件當中塗層間彼此因熱膨脹係數差異而造成內應力，影響層間結合力，甚至造成 SOFC 的層間破壞或是結構扭曲。電漿熔射噴塗鍍層的製程中，塗層經由急速凝固後，由於本身收縮或因基材與塗層熱膨脹係數之不同，會於塗層中或是塗層與基材界面附近產生殘留應力，對於塗層與基材的結合強度可能都有負面的影響。

本計畫為 98 年度計畫之延續性計畫，計畫目的在探討使用電漿熔射噴塗法所製作的固態氧化物燃料電池元件，經過循環氧化與還原處理過程，各元件膜層中的殘留應力狀態。研究的目的是希望瞭解 SOFC 在實際操作過程中會遭遇到的循環氧化還原過程對於電池膜層元件的影響。在本研究中，利用電漿熔射噴塗技術依序將各元件膜層披覆於金屬版上，除了量測噴塗完成時各膜層表面之殘留應變外，也針對各膜層在複合塗層依序累積披覆時的應力改變做探討。藉由上一年度計畫的執行，瞭解到塗層中不同的殘留應力值對

於塗層與基材結合強度的影響。而在本年度計畫中則是模擬實際 SOFC 在操作過程的循環氧化還原程序，針對膜層元件的應力應變進行量測分析。

本研究中，使用金屬支撐之固態氧化物燃料電池可以有效改善電池之機械性質，對於使用電漿熔射噴塗製備大面積 SOFC 有很大的幫助。本研究結果顯示，噴塗完成之各膜層試片(LSCM buffer, NiO/LDC, LDC buffer, LSGM, LSCF)均呈現壓縮狀態之殘留應變，這現象是與噴塗機制有關，一般面層在經過試片冷卻過程都會呈現壓縮應變。將各噴塗後之膜層經氫氣還原、空氣氧化以及再次還原處理後，各膜層的應變狀態就會變的十分複雜。原本表現出壓縮應變狀態的 LSCM buffer 在噴塗上陽極塗層後可以反轉為拉伸應變狀態，而陽極塗層本身的應變狀態也會出現上半部表層與下半部界面層不同的情況，應變狀態為不連續的。所以當膜層一層層堆積時，對於底層之試片也會產生不同的應變作用，甚至造成單一膜層內部出現拉伸及壓縮狀態分層表現的情形。

Abstract

The advantage of porous metallic supported fuel cell produced by APS process is to have a SOFC cell applied in the harsh environment with large cell area and effective production cost. However, through the spraying process, residual stresses are unavoidably developed in coatings due to the differences in thermal expansion coefficients, and different cooling conditions between the coating and the substrate. In this project, we investigated the residual strain of each component in SOFC, which under the cyclic redox treatments. The results show that all of the components of MSC (LSCM buffer, NiO/LDC, LDC buffer, LSGM, LSCF) reveal compressive residual strain after plasma spraying. However, the strain states of these components become complicated and irregular after the redox treatments. For example, the strain state of LSCM buffer layer was changed from compressive to tensile. Therefore, the redox treatments indeed affect the strain state of the MSC components and the influence of the cell durability should be investigated further.

壹、計畫緣起與目的

1. 計畫背景及重要性

電漿熔射噴塗法(Plasma-spraying method)製造固態氧化物燃料電池(SOFC)之電極以及固態電解質，較一般傳統之 Sol-Gel、磁控管或雷射濺鍍之效果不同。電漿熔射噴塗法可以在常壓下直接塗佈氧化物薄膜，相較於一般離子濺射需在低壓且氣氛控制下作業，電漿熔射噴塗法直接噴塗出所需之氧化物薄膜，因此具有相當大的優勢。為了避免電池的使用產生濃度極化的現象，陰陽電極結構需具有連通的孔洞結構，讓空氣、燃料及生成物可順利進出，但電解質層需完全緻密隔絕燃料與氧氣，使用電漿熔射噴塗技術搭配適當的熔射變數則是輕易的製作出具多孔結構陰、陽塗層及緻密的電解質層。除此之外，電漿火焰具有極高的溫度，適用於各種材料的熔融與披覆，同時熔射製程能夠在不超過 500°C 的狀態下披覆陶瓷材料或是陶瓷金屬複合材料，因此可以避免高溫燒結製程對於 SOFC 所產生的缺點。

電漿熔射噴塗技術是一簡便且快速之製程，廣泛使用於將陶瓷薄膜鍍於金屬基材上，藉由改變電漿融射的噴塗變數、粉末粒徑、粉末型態等條件，便可獲得不同結構、不同緻密性之鍍層。然而經由電漿熔射噴塗鍍層的製程中，塗層經由急速凝固後，由於本身收

縮或因基材與塗層熱膨脹係數之不同，會於塗層中或是塗層與基材界面附近產生殘留應力，對於塗層本身性質、塗層與基材的結合強度都可能都有負面的影響 [1,2]。當塗層中所承受的壓縮應力超過塗層剝離基材所需的臨界力量後，在金屬基材表面上的塗層就非常有可能脫落，甚至在 SOFC 的使用過程因為高低溫差的循環條件下，因熱應力的作用而使得電池遭到破壞。有關於熱熔射塗層中殘留應力可能的產生來源歸因於以下四點：(1) 熔融狀態的粉末噴塗到基材後，由於急速的冷卻凝固使得熔融平板收縮。(2) 塗層及基材中由於溫度梯度不同因而產生不同程度的熱收縮。(3) 塗層與基材間熱膨脹係數的差異。(4) 塗層內部所產生的固體相變化有可能會造成塗層中應變的改變。

2. 計畫目的

計畫目的在探討使用電漿熔射噴塗法所製作的固態氧化物燃料電池元件，經過循環氧化與還原處理過程，各元件膜層中的殘留應力狀態。研究的目的是希望瞭解 SOFC 在實際操作過程中會遭遇到循環氧化還原過程對於電池膜層元件的影響。在本研究中，利用電漿熔射噴塗技術依序將各元件膜層披覆於金屬版上，除了量測噴塗完成時各膜層表面之殘留應變外，也針對各膜層在複合塗層依序累積披覆時的應力改變做探討。藉由上一年度計畫的執行，瞭解到

塗層中不同的殘留應力值對於塗層與基材結合強度的影響。而在本年度計畫中則是模擬實際 SOFC 在操作過程的循環氧化還原程序，針對膜層元件的應力應變進行量測分析。

本計畫重點工作如下：

- (1) 電漿熔射 SOFC 各膜層元件殘留應變之量測。
- (2) 循環氧化及還原處理程序對膜層殘留應變之影響探討。

成果報告內容依據殘留應變量測技術之不同分為兩大部分，以下即針對此兩部分分別敘述：

第一部份：以同步輻射技術量測膜層元件內應變

貳、研究方法與過程

本計畫將與核能研究所研究團隊合作分工進行，利用電漿熔射噴塗技術合成固態氧化物燃料電池。製作完成的 SOFC 層狀結構將進行塗層熱應力分析。相關研究方法以及步驟敘述如下：

1. 試片製備

圖 1 所示為大氣電漿噴塗設備示意圖(Praxair SG-100)，包括了

電漿火炬、冷卻系統、送粉系統以及基材加熱持溫系統。在本研究中，基材使用具有多孔狀結構的長條形鎳基板，尺寸為 100mm (l) \times 10mm (w) \times 1mm (t)。至於噴塗用的粉末如圖 2 所示則是採用商用的鎳摻雜氧化鈾與氧化鎳複合粉末(NiO/LDC, LDC: $\text{La}_{0.45}\text{Ce}_{0.55}\text{O}_2$)做為製備陽極的原料，電解質材料則是使用商用的 LSGM ($\text{La}_{0.8}\text{Sr}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{Mg}_{0.2}\text{O}_3$)粉末，陰極材料則是使用商用 LSCF/C 粉末 ($\text{La}_{0.58}\text{Sr}_{0.4}\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.8}\text{O}_3$)。此外，在多孔基板與陽極間製備一層 LSCM buffer，陽極與電解質之間則是製備一層 LDC buffer。在電漿熔射噴塗過程當中，為了製備出機械強度較高、孔隙度高的陽極，因此 NiO/LDC 粉末將被輸送到距離電漿火焰中心較遠的部分進行噴塗，同樣的，為了製備具有高孔隙度的陰極，LSCF 粉末則是會被輸送到較外部的電漿火焰中進行噴塗，而 LSGM 粉末輸送至電漿電弧的中心也就是電漿火焰最高溫的部分，藉由完全的熔融的粉末來製備高緻密性的電解質層。本研究的五種試片如圖 3 及表 1 所呈現。全電池(SBABEC)的膜層結構如圖 4 所示，各膜層堆積良好，陽極與陰極具有多孔結構，而 LSGM 電解質則相對十分緻密。

2. 塗層殘留應力的量測

利用 X 光繞射的方法來量測殘留應力，最主要是因為材料受到殘留應力作用時，晶格大小會產生變化，因此利用 X 光繞射法可以

量測到因為晶格變化所造成的繞射峰($\Delta 2\theta$)偏移，進而求得殘留應力。殘留應力的量測是採用 XRD $\sin^2 \psi$ 的方法，實驗是在國家同步輻射中心 13A1 及 17A1 光束線進行。為量測塗層在殘留應力作用下晶格平面間距之變化(d spacing)。在進行量測之前，試片表面需先經由 1500 號砂紙拋光以減少因表面粗糙所造成的誤差，塗層殘留應力的量測原理及計算方法請參考前人研究[2,5]。本部份研究中，試片殘留應力的量測方向將量測與電漿熔射噴塗方向平行之應力值。量測過程試片分別傾斜六個角度進行量測，以求得不同之 $\sin^2 \psi$ 值的晶格應變。量測塗層殘留應力時，在殘留應力的計算上，使用公式如下：

$$\sigma_{\phi} = \frac{E}{(1+\nu)} \cdot \frac{\cot \theta \cdot \Delta \theta}{\sin^2 \psi} \quad (1)$$

為簡化及方便殘留應力的計算，可將上式改寫如下：

$$\sigma_{\phi} = \frac{\Delta d / d}{\sin^2 \psi} \cdot \frac{E}{(1+\nu)} = m \frac{E}{(1+\nu)} \quad m = \frac{\Delta d / d}{\sin^2 \psi} \quad (2)$$

其中， E ：Young's modulus、 ν ：Poisson ratio、 θ ：繞射角、 ψ ：試片傾斜角、 d ：為晶格平面間距。殘留應變 (ϵ_{ϕ}) 可以由(2)式得到，因為 $E/(1+\nu)$ 是材料常數，因此方程式(2)中的斜率 m 便可視為殘留應變， m 可由 $\Delta d/d$ 與 $\sin^2 \psi$ 的關係曲線斜率求得。

參、結果與討論

【SB, substrate+LSCM buffe 試片之殘留應變】 XRD 量測之圖譜如圖 5 所示，數據整理如表 2 所示，剛噴塗完成之 LSCM 塗層壓縮應變約為 0.48%，經氫氣還原後，塗層壓縮應變增加為 0.78%，將試片再氧化後的壓縮應變為 0.47%與剛噴塗後的接近，經第二次氫氣還原後，塗層之壓縮應變則加大為 0.95%。在 SB 試片中，由於試片只有兩層，因此 LSCM 塗層在熱循環測試中的應變變化可視為直接與多孔基材的熱膨脹係數差異有關。多孔 Ni 基材在電漿噴塗及氧化處理過程中會在孔洞周遭產生 NiO (如圖 6 所示)，而經還原過程後 NiO 又變回 Ni，這樣的過程將使的基材熱膨脹係數產生變化。

【SBA, SB + anode 試片之殘留應變】 XRD 量測之圖譜如圖 7 所示，數據整理如表 2 所示，數據量測是選擇陽極材料中的 NiO 作為量測標的，但因為經氫氣還原後 NiO 會消失，所以沒有還原後的應變數據。此外，為了瞭解噴塗上陽極後，原本 LSCM buffer 層的應變改變狀態，也針對 LSCM 塗層進行再一次量測。從數據可以看到 LSCM 層在陽極披覆於其上時，其應變狀態變的很複雜，量測數據點如圖 8 所示，以分段斜率解析，經過第一次還原處理後，大致上可以看出 LSCM 上側靠近陽極的區域會受到壓縮應變，應變值隨著深度而降低，經過中間應變狀態反轉後，隨著越靠近基材端，拉伸應變隨之增大。經過第二次還原處理後的 LSCM 層靠近陽極端表

現出稍微的拉伸應變，而靠近基材端的拉伸應變則變的更大。至於陽極塗層本身的應變狀態則與以往量測一致呈現壓縮狀態的應變，然而進一步解析數據(如圖 9 所示)可以看出陽極塗層的壓縮應變由表面逐漸向 LSCM buffer 介面遞增，這主要應該是受到 buffer 層牽制的影響。

【SBAB, SBA + LDC buffer 試片之殘留應變】 XRD 量測之圖譜如圖 10 所示，從圖 11 及表 2 數據可以看到 LDC buffer 噴塗完畢後，數據的不規則性變高，這主要是因為多層結構使得應變狀態複雜，另一原因則是使用同步輻射量測 LDC buffer 時，由於 x 光穿透深度較深，XRD 訊號來源不止 LDC buffer 還包括底下陽極塗層中的 LDC 訊號，尤其當試片傾斜角越大時 X 光穿透深度越深，陽極訊號的影響越大。從表 2 看出，剛噴塗好之 LDC buffer 表面範圍表現出約 0.32%的殘留壓縮應變，而隨著深度增加則壓縮應變會變大。經過氫氣還原後的 LDC buffer 則呈現不連續的拉伸狀態應變，上半部塗層約為 0.40%拉伸應變下半部約為 0.12%拉伸應變，但是如同前面提過 0.12%的數值還包括陽極中 LDC 應變狀態所貢獻的，因此實際的應變狀態仍須更多數據才有辦法解析。當試片再次氧化時，LDC buffer 則表現出與剛噴塗完後塗層相類似的數值。從表 2 中也可以發現，陽極塗層披覆 LDC buffer 後對於陽極的應變狀態影響不大，陽極塗層依舊為壓縮殘留應變，數值約為 0.4~0.7%之間。

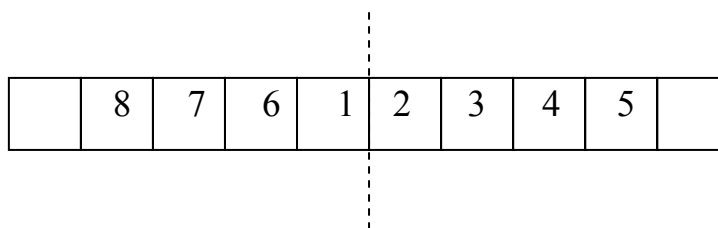
【SBABE, SBABEC 試片之殘留應變】 XRD 量測之圖譜如圖 12 所示，從表 2 顯示噴塗完成的 LSGM 電解質層表現出壓縮狀態的殘留應變 0.72%，至於噴塗完成的陰極 LSCF 則為壓縮狀態的殘留應變其值為 0.59%。LSGM 電解質層經循環氧化還原處理後，其殘留應變量測的數據並沒有一致的規律性，數據跳動過大因此無法經由統計分析計算其值。

第二部份：以低掠角 X 光繞射儀量測膜層元件內應變

貳、研究方法與過程

1. 試片製備

電漿噴塗製備試片方法如第一部份所敘述，不同的是在此部分的實驗試片尺寸為 10mm (l) \times 10mm (w) \times 1mm (t)。試片是將第一部份的長條型試片依圖示小心切割而得。試片長 10cm 切成十片，以中間線為基準往左右兩邊各切五片並依序編號，切的時候要預留刀片厚度所以最旁邊兩片將不足 1cm。



試片編號及處理步驟如下，以 SB 為例(6、7、8 號當備用)

【No. 1】SB-1 原始塗層 【No. 2】SB-2 第一次還原

【No. 3】SB-3 第一次氧化 【No. 4】SB-4 第二次還原

處理試片時，先將 2、3、4 號試片，一起進行還原後，取出 2 號，再將 3、4 號進行氧化後，再取出 3 號，最後將 4 號進行還原。所得到的試片將進行殘留應變量測。

2. 塗層殘留應力的量測

使用低掠角入射 X 光繞射 (Grazing Incident X-ray Diffraction ,GIXD)量測薄膜殘留應力[6]，有別於傳統 X 光量測法，GIXD 量測量測薄膜殘留應力，以一極小之入射角度(Incidence Angle, γ)射入，透過偵測器在不同角度的掃瞄而取得訊號，如圖 13 所示。

在 GIXD 量測法中，圖 13 之入射角(γ)為固定之角度，沿 S_1 方向射入， S_1 為試片座標之 X 軸， L_1 、 L_3 分別為繞射平面之 X 軸以及 Z 軸(法線)， α 為一對應角只與 θ_0 以及 γ 有關。

而量測的方法是將試片先用線光源之 XRD 打出全譜圖，接著從全譜圖中挑出繞射峰值最強的一根繞射峰值作為量測殘留應力的樣本，而之所以會挑最強的一根根據文獻[6]解釋是因為最強的繞射峰值對於應力較為敏感，變化會較為明顯，故以此為依據，但是若第一根即為最強之繞射峰值因易出現誤差故不予採用，則改採第二強

之繞射峰值。找出最強之繞射峰值後，找出其繞射峰值強度最高之 2θ 值，使用GIXD法量測時， 2θ 值掃描範圍通常為最強之繞射峰值中強度最高之 2θ 值的正負3度，接著，設定參數，藉由改變其 ψ 角來量測晶格間距，如圖14所示，最後再藉由數學公式之轉換來計算殘留應力。通常傾轉的 ψ 角為 0 、 ± 23 、 ± 33 、 ± 42 、 ± 50 度，而在數學公式的轉換中，我們所需要的數值有 2θ 、 θ 、 d 值、 α 值、 d_0 值、 $(d-d_0)/d_0$ 。 2θ 值可藉由使GIXD法量測出來的繞射峰值使用Fit Gaussian計算出來， d 值可藉由布拉格公式： $2d\sin\theta = n\lambda$ 計算出， α 值由 $\theta - \gamma = \alpha$ 得出， d 值以及斜率Slope都可藉由Fit Linear求出。計算是以 $\cos^2\alpha\sin^2\psi$ 為X軸， d 值為Y軸做Fit Linear，求出Y軸截距 d_0 值，最後再以 $\cos^2\alpha\sin^2\psi$ 為X軸， $(d-d_0)/d_0$ 為Y軸做Fit Linear，最後可得斜率slope。最後再代入 $\sigma = \text{slope} * E / (1 + \nu)$ 即可求出殘留應力，其中slope即視為材料之應變。

參、結果與討論

以 GIXD 方法量測之 XRD 圖譜如圖 15~圖 18 所示，數據整理如表 3 所示。以 GIXD 法量測 $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ 試片的結果，所有試片均呈現壓縮狀態的應變，以 SB 試片中 LSCM 塗層所受到的壓縮應變為最大，這是因為 LSCM 塗層與多孔 Ni 基材接合受到彼此熱膨脹量差異的影響最大。SBA 試片經不同階段 redox 處理後其應變狀態差異並不大，若與表 2 之數據比較，不同處理條件之 SBA 之殘留壓

縮應變量約在 0.4%~0.7%之間。至於 LDC buffer 及 LSGM 電解質層之殘留應變同樣也是存在壓縮狀態之應變，其呈現之趨勢為還原後之塗層表面壓縮應變會大於還原之前，但是差異並不是太大，主要原因為還原過程對於 LDC 及 LSGM 並沒有產生變化，所以殘留應變之差異應該是底部陽極以及多孔鎳基板的體積變化所造成。

整體來說，使用 GIXD 法所得到之數據與利用同步輻射 $\sin^2\psi$ 方法所量到的數據大趨勢是相同的，但仍有許多之差異，這可以歸因於使用 GIXD 法因為是低掠角，所以 X 光入射深度很淺，所量測到的應變可以說是很表層之現象，但是利用同步輻射分析因為穿透深度很深，所以數值之呈現可視同為整個塗層之平均狀態。然而不管怎樣，這仍然是有必要加以確認，所以待顯微組織之分析結果出來後，應該有較好之說明。

肆、總 結 論

總結來說，針對各塗層試片經過循環氧化處理後的應變狀態量測其殘留應變得到的數據來觀察，塗層的原始狀態以及經過氫氣還原或是再氧化過程都會影響其應變狀態，但是並不具有一致之規則性。噴塗完成之各膜層試片均呈現壓縮狀態之殘留應變，這現象是與噴塗機制有關，一般面層在經過試片冷卻過程都會呈現壓縮應

變。將各噴塗後之膜層經氫氣還原、空氣氧化以及再次還原處理後，各膜層的應變狀態就會變的十分複雜。原本表現出壓縮應變狀態的 LSCM buffer 在噴塗上陽極塗層後可以反轉為拉伸應變狀態，而陽極塗層本身的應變狀態也會出現上半部表層與下半部界面層不同的情況，應變狀態為不連續的。所以當膜層一層層堆積時，對於底層之試片也會產生不同的應變作用，甚至造成單一膜層內部出現拉伸及壓縮狀態分層表現的情形。

伍、參考文獻

- [1] Yung-Chin Yang, E. Chang. “The bonding of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings to titanium: effect of processing, porosity and residual stress”. *Thin solid films* 2003;444:260-275.
- [2] Yung-Chin Yang, Chang E. “Influence of residual stress on bonding strength and fracture of plasma-sprayed hydroxyapatite coatings on Ti-6Al-4V substrate”. *Biomaterials* 2001;22:1827-1836.
- [3] B. D. Cullity, “Element of X-ray diffraction”, 2nd ed. Reading, MA: Addison-Wesley, 1980. p. 447-78.
- [4] Chang-Sing Hwang, Chun-Huang Tsai, Chih-Hung Lo, Cha-Hong Sun, “Plasma sprayed metal supported YSZ/Ni-LSGM-LSCF ITSOFC with nanostructured anode”, *Journal of Power source* 2008;180:132-142.
- [5] Yung-Chin Yang, E. Chang. “Measurements of residual stresses in

- plasma-sprayed hydroxyapatite coatings on titanium alloy”, Surf. Coat. Tech. 2004;190/191:122-131.
- [6] C. H. Ma, J. H. Huang, Haydn Chen, “Residual stress measurement in textured thin film by grazing-incidence X-ray diffraction” , Thin Solid Films 2002;418:73-78.

表 1 各膜層試片說明

Specimens	Materials
SB : substrate + LSCM buffer	LSCM
SBA : SB + NiO/LDC anode	LDC NiO
SBAB : SBA + LDC buffer	LDC NiO
SBABE : SBAB + LSGM electrolyte	LSGM
SBABEC : SBABE + LSGM/LSCF cathode	LSCF

表 2 SOFC 各膜層在循環氧化還原條件下的殘留應變值

Specimens		Residual strain (%) *			
		as-sprayed	1st reduced	re-oxidized	2nd reduced
SB	LSCM	-0.48	-0.78	-0.47	-0.95
SBA	NiO	surface side -0.27	---	surface side -0.15	---
		buffer side -0.79	---	buffer side -0.50	---
	LSCM from SB	---	anode side -3.34	---	anode side 0.41
		---	matrix side 10.65	---	matrix side 14.98
SBAB	LDC	surface side -0.32	surface side 0.40	surface side -0.37	---
		anode side -1.48	anode side 0.12	anode side -2.65	---
	NiO from SBA	-0.46	---	-0.68	---
SBABE	LSGM	-0.72	---	---	---
SBABEC	LSCF	-0.59	---	---	---

* “-“ it means the compressive state

表 3 SOFC 各膜層在循環氧化還原條件下的殘留應變值

Specimens	Residual strain (%) *			
	as-sprayed	1st reduced	re-oxidized	2nd reduced
SB	-1.16	-1.22	-0.91	-0.88
SBA	-0.61	-0.60	-0.56	-0.59
SBAB	-0.72	-0.80	-0.58	-0.78
SBABE	-0.55	-0.82	-0.49	-0.64

* “-“ it means the compressive state

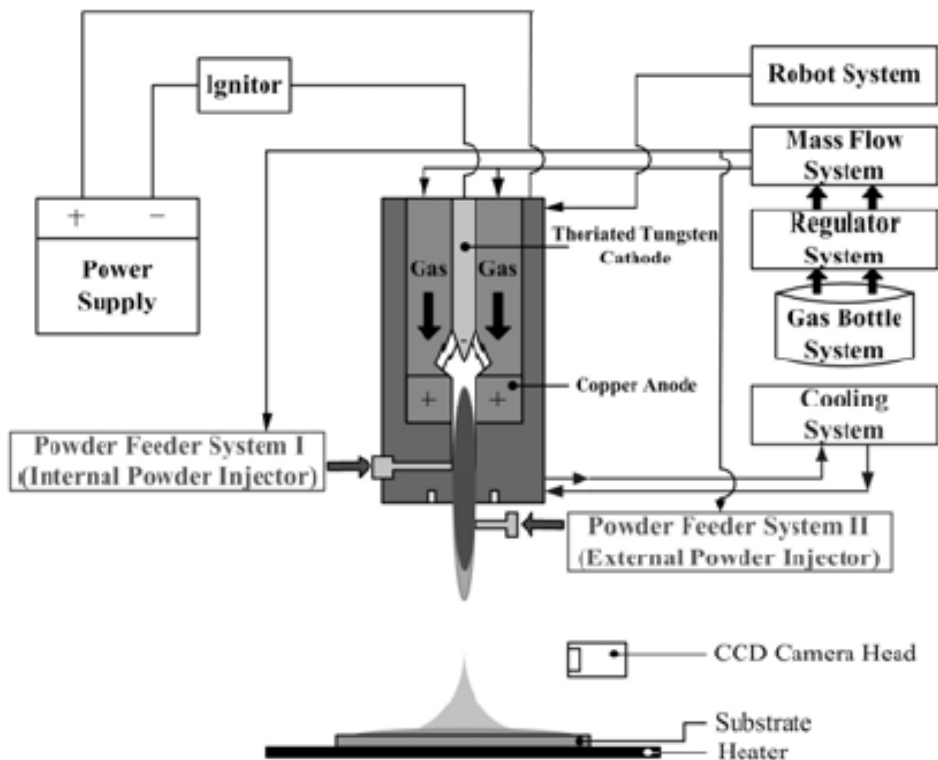


圖 1 電漿熔射噴塗裝置示意圖

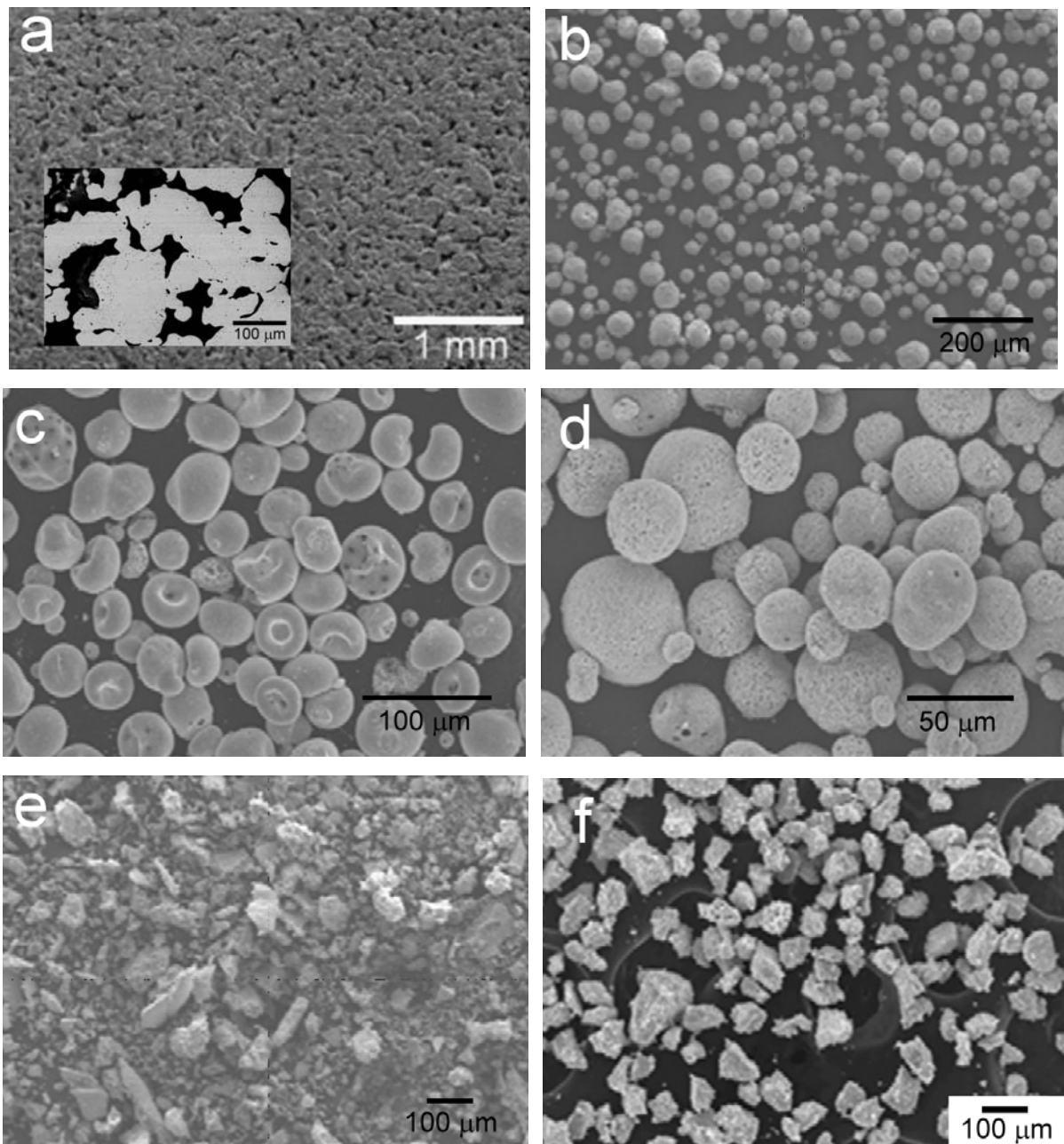


圖 2 本計畫所使用之基材與噴塗用粉末 (a)多孔狀純鎳基板，(b) LDC，(c) LDC/NiO/C，(c) LSCF/C，(e) LSGM and (f) LSCM。

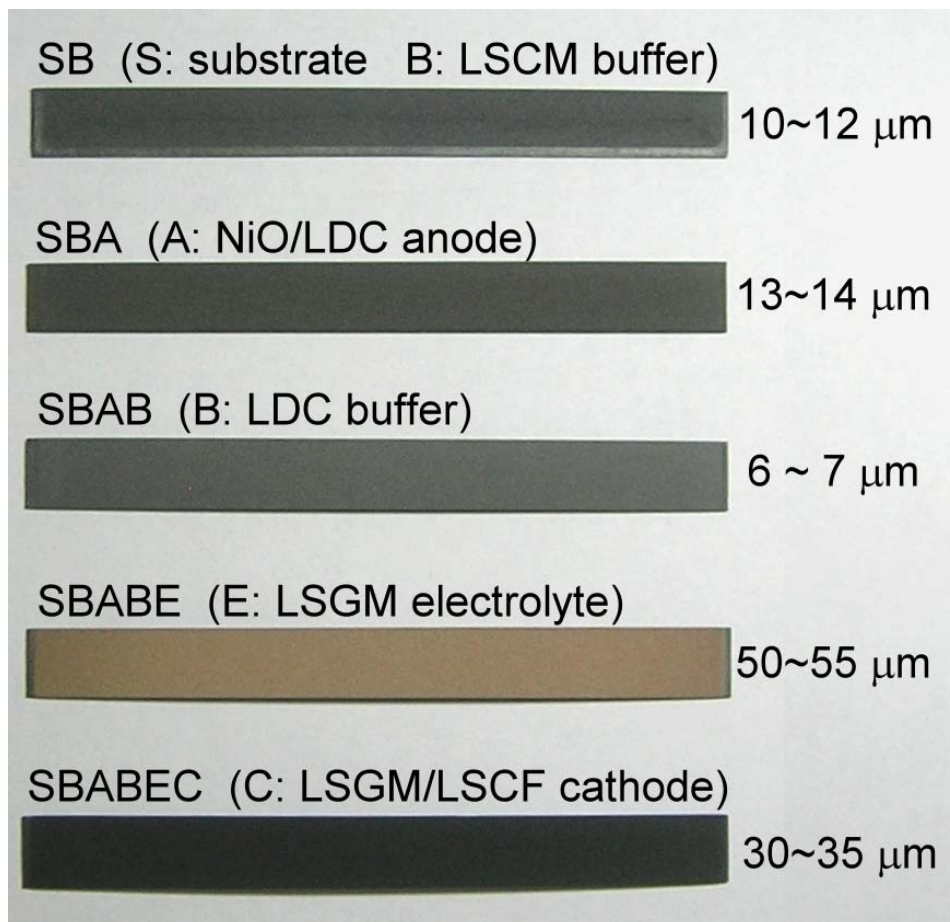


圖 3 各膜層試片種類及外觀圖

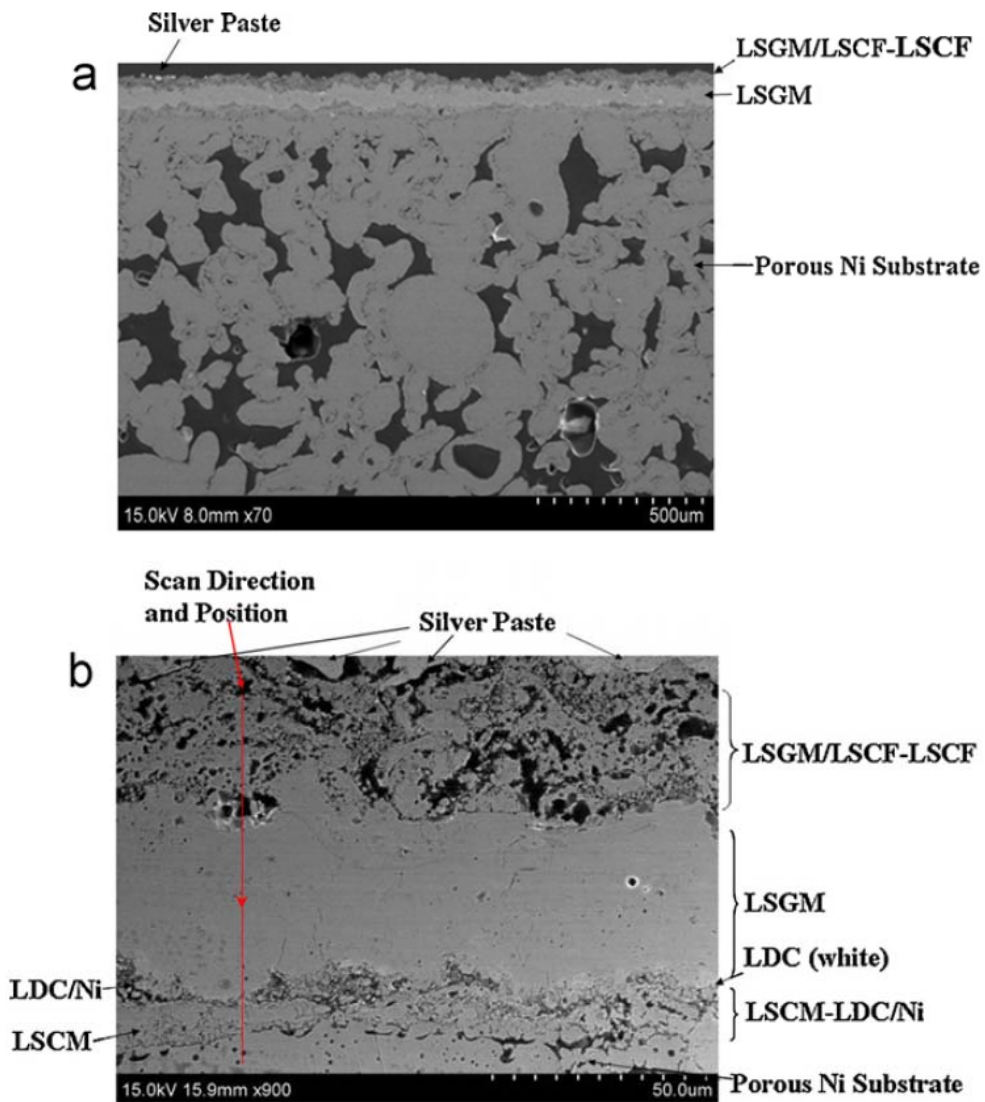


圖 4 SBABEC 全電池橫截面結構顯微組織

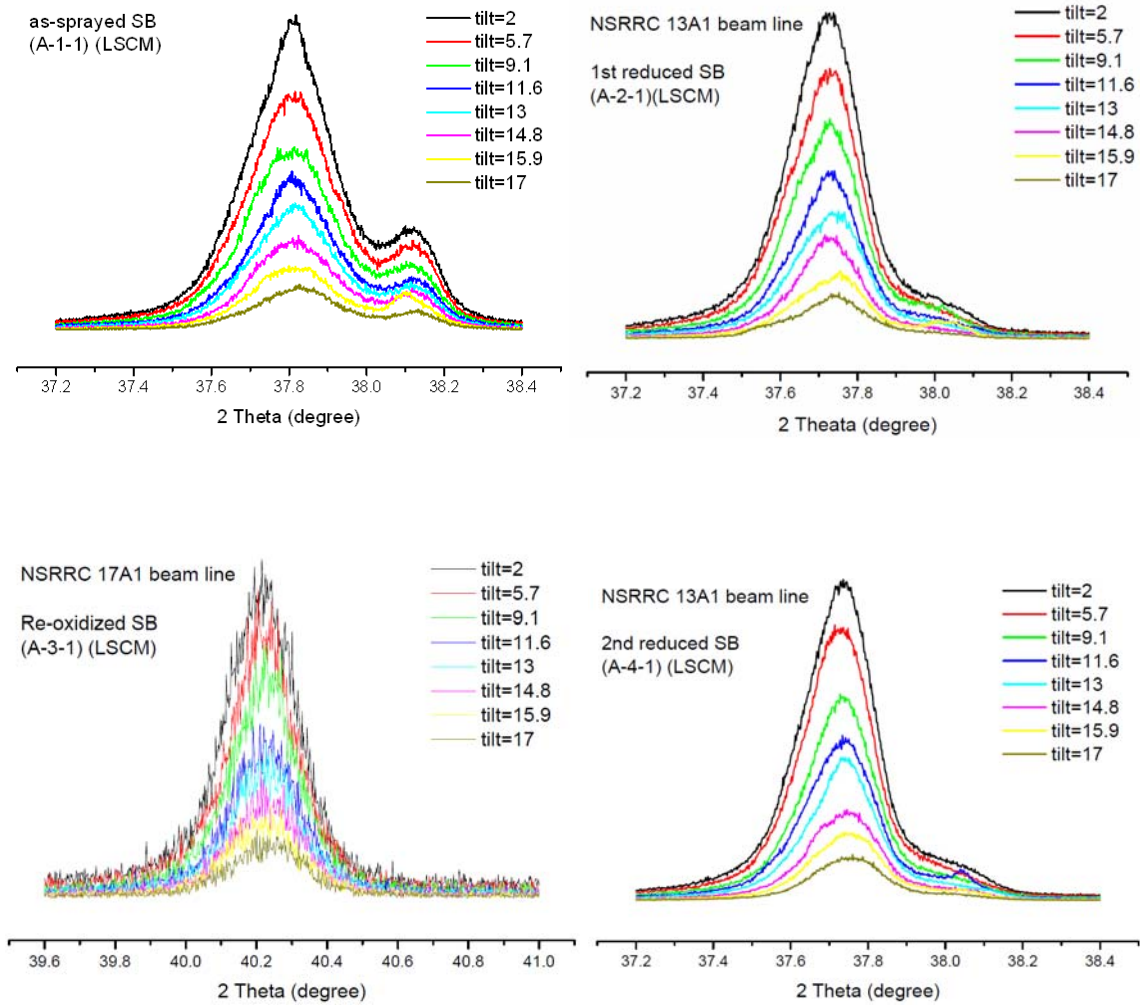


圖 5 SB 塗層經不同處理過程後沿試片長軸方向之殘留應力 XRD 分析

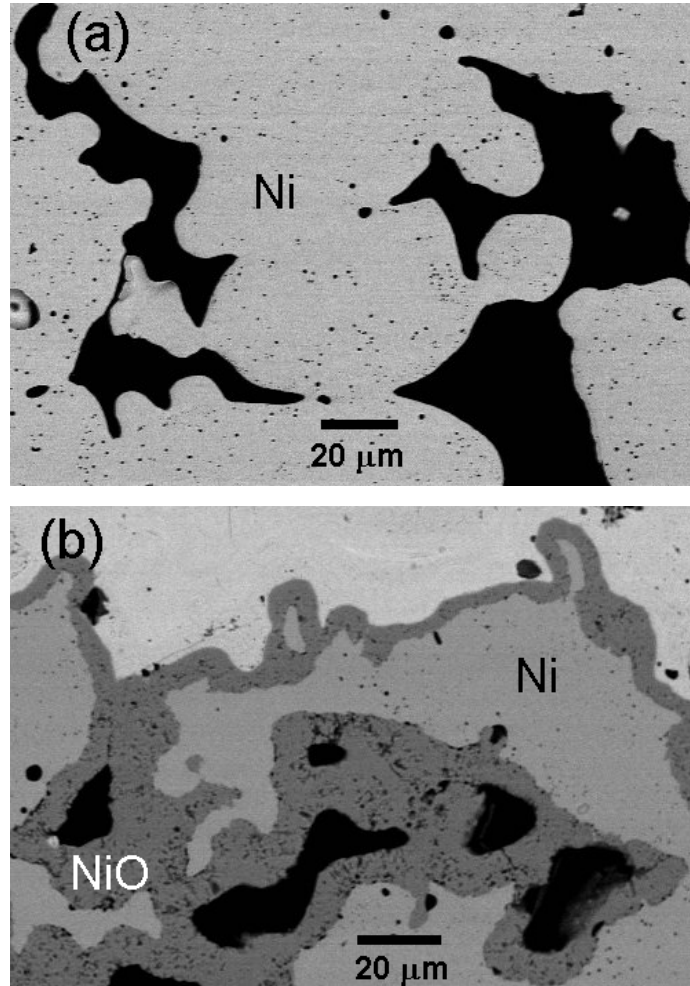


圖 6 (a)原始多孔 Ni 基板橫截面影像, (b)Ni 基板氧化為 NiO 之橫截面影像。

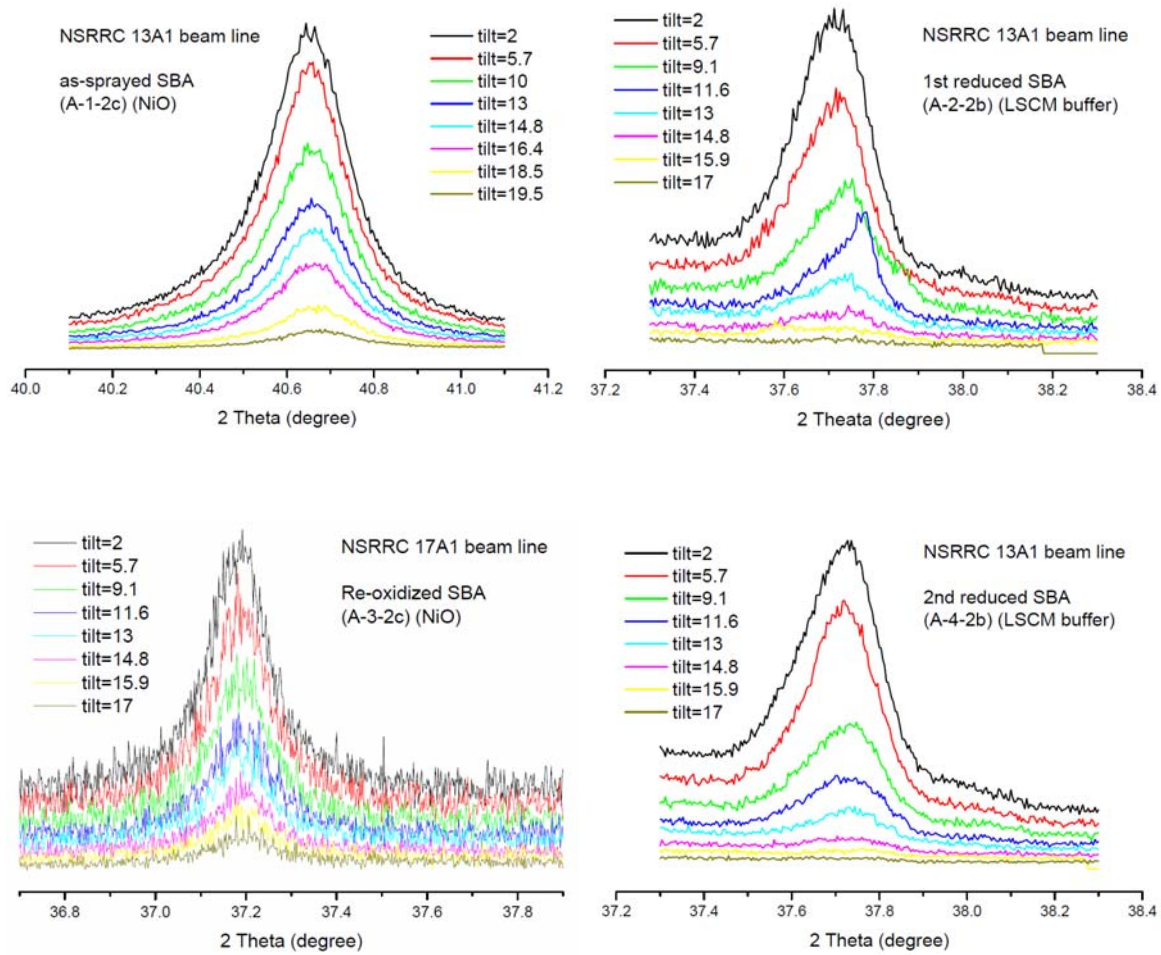


圖 7 SBA 塗層經不同處理過程後沿試片長軸方向之殘留應力 XRD 分析

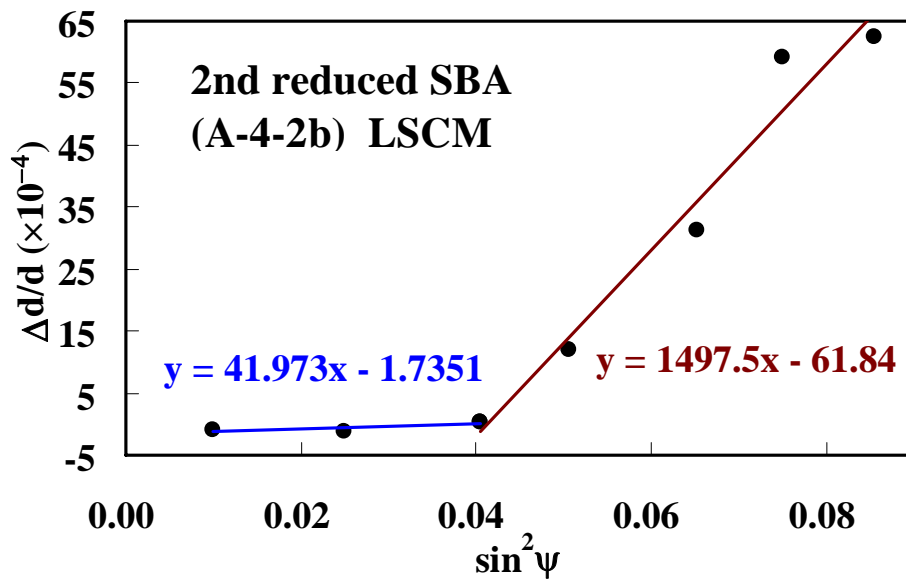
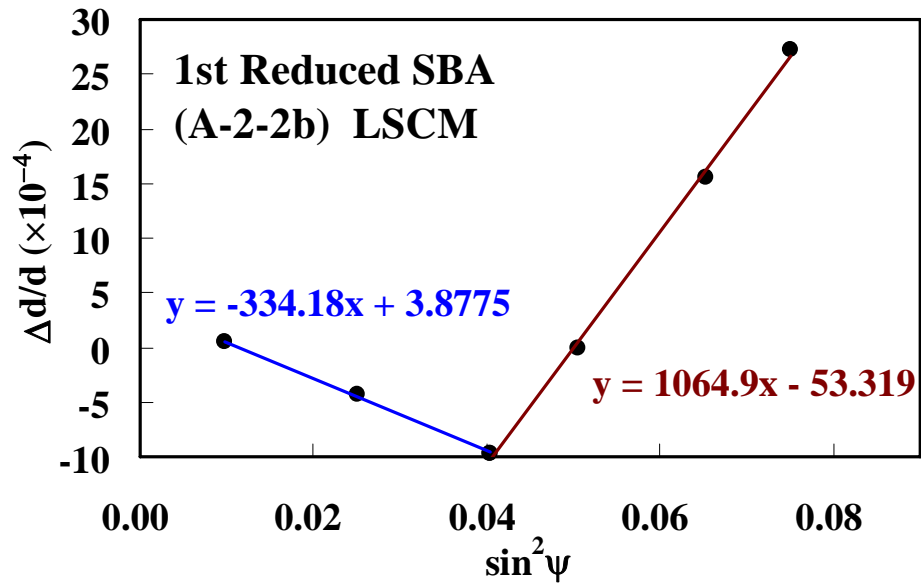


圖 8 在 SBA 試片中的 LSCM buffer 繞射峰值與傾斜角($\sin^2\psi$)之關係圖。

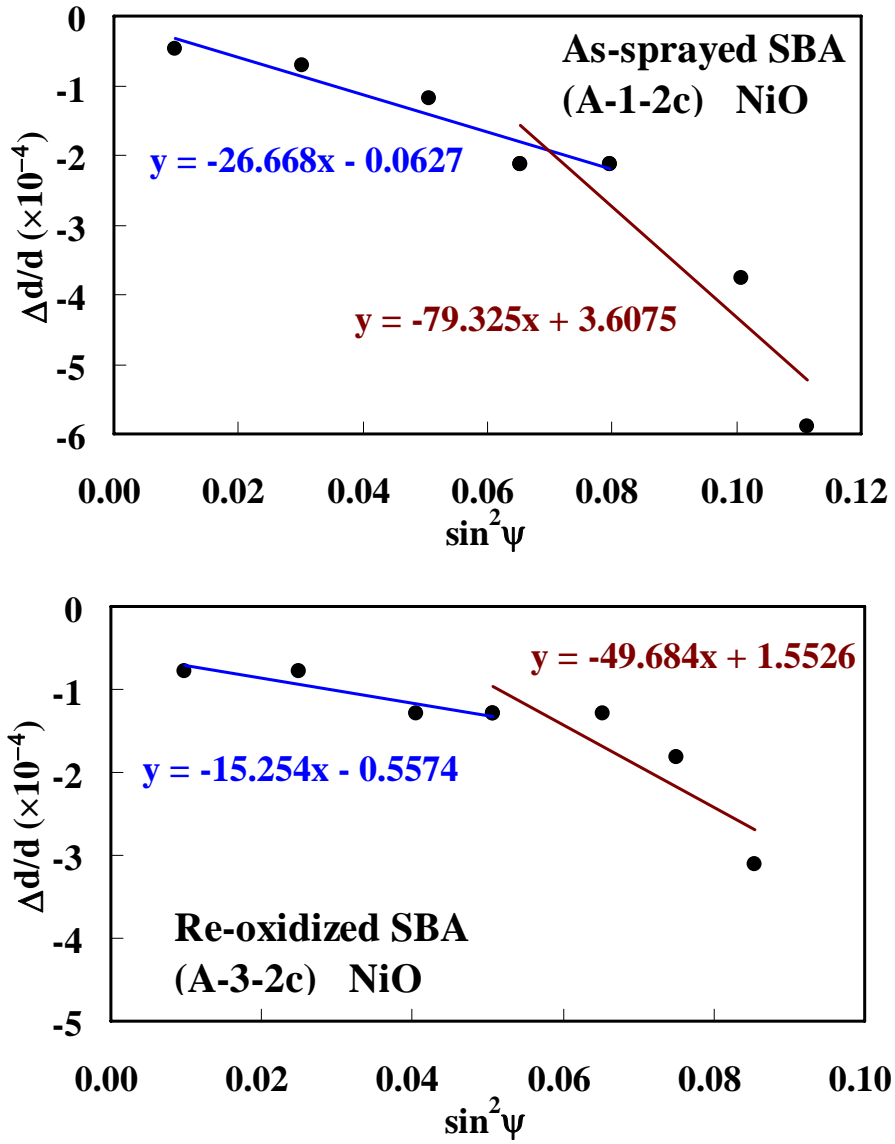


圖 9 在 SBA 試片中 anode NiO 繞射峰值與傾斜角($\sin^2 \psi$)之關係圖。

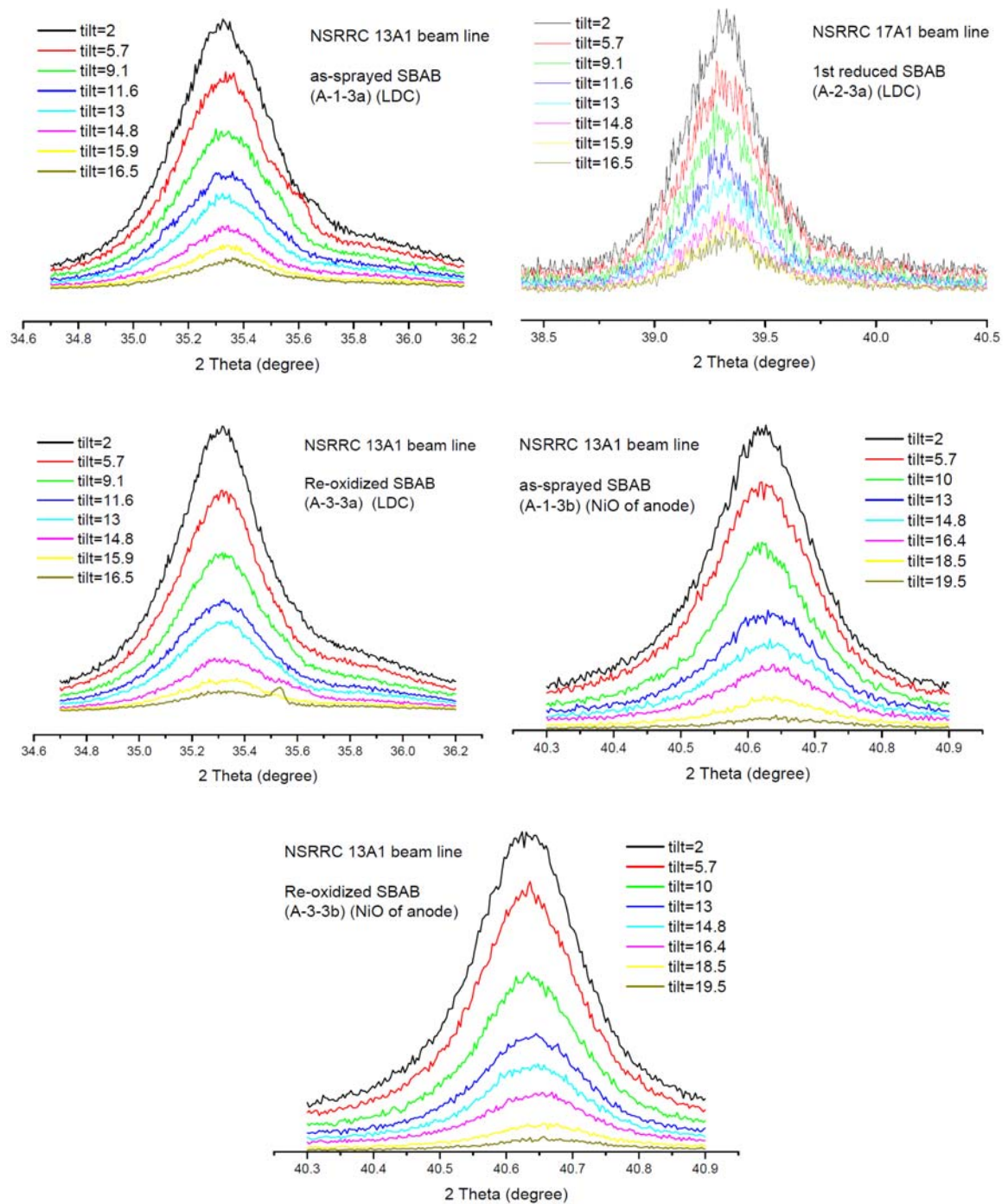


圖 10 SBAB 塗層經不同處理過程後沿試片長軸方向之殘留應力量 XRD 分析

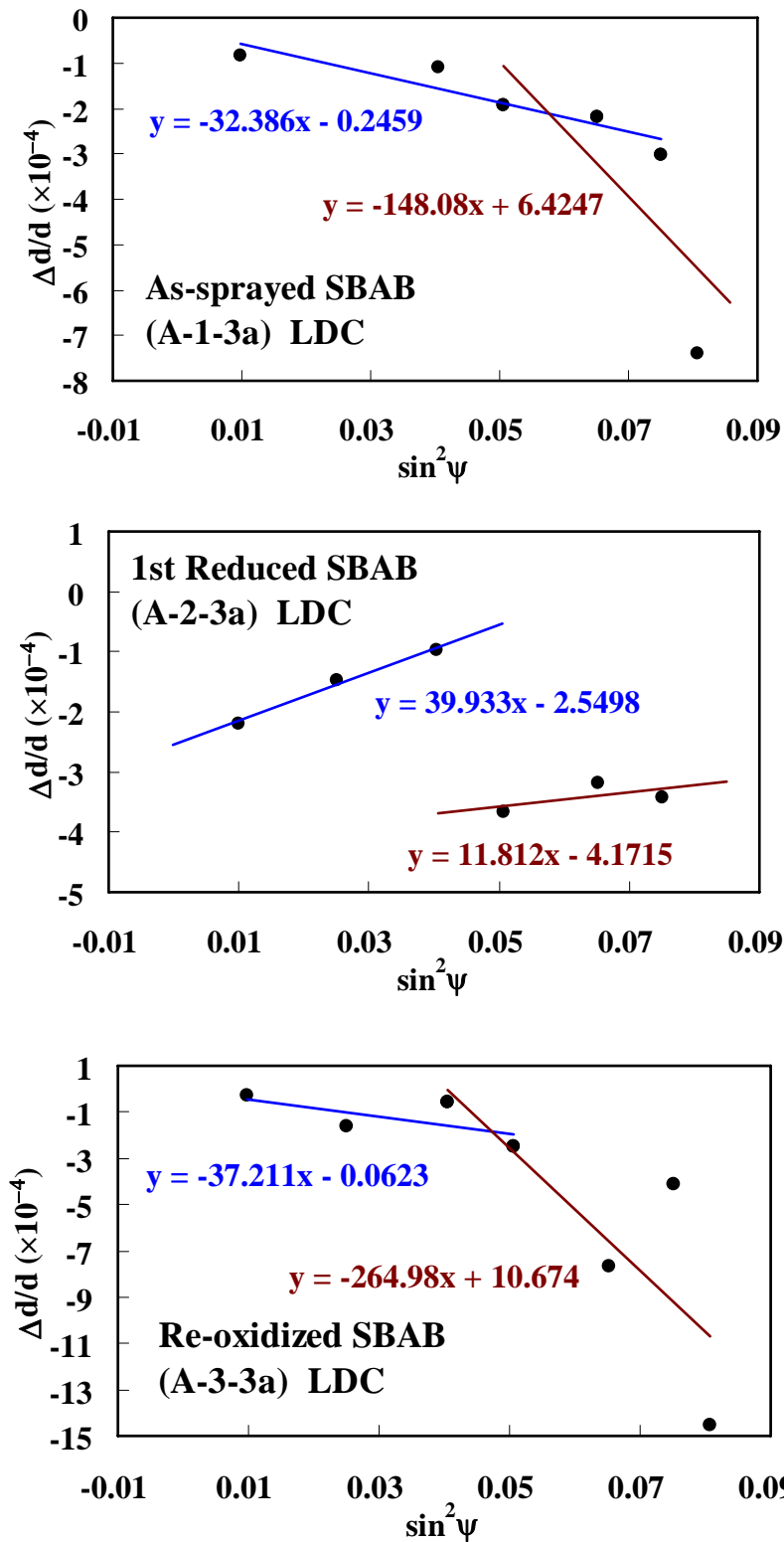


圖 11 在 SBAB 試片中 LDC 繞射峰值與傾斜角($\sin^2 \psi$)之關係圖。

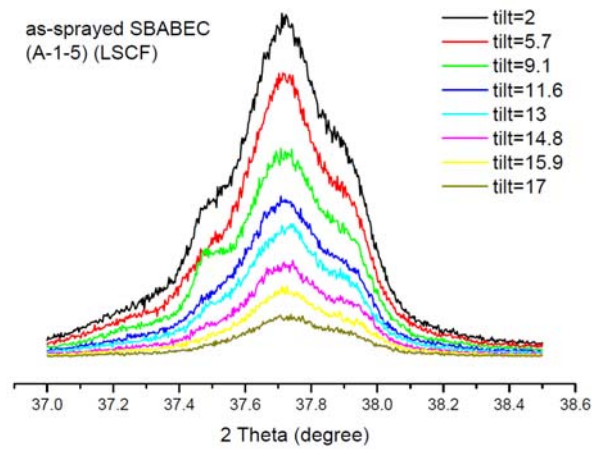
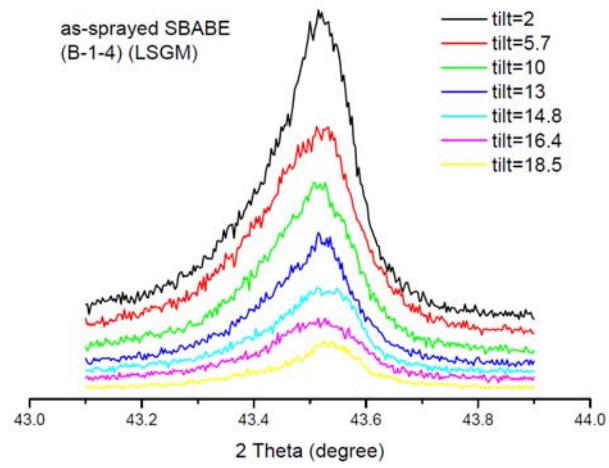


圖 12 SBABE 及 SBABEC 塗層沿試片長軸方向之殘留應力量 XRD 分析

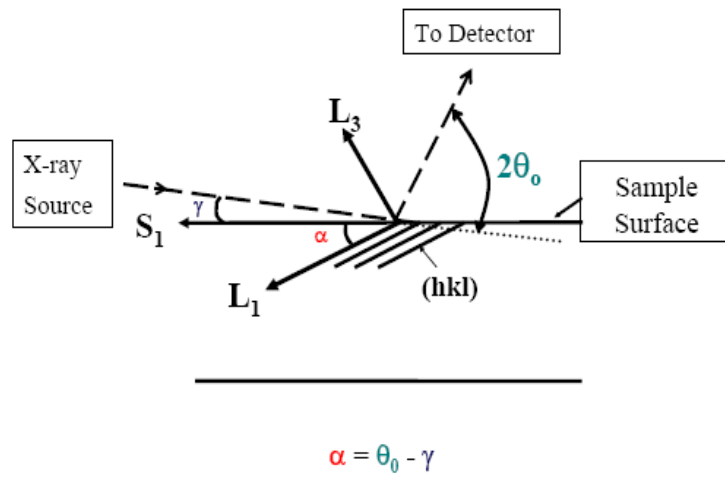


圖 13 GIXD 方法量測示意圖

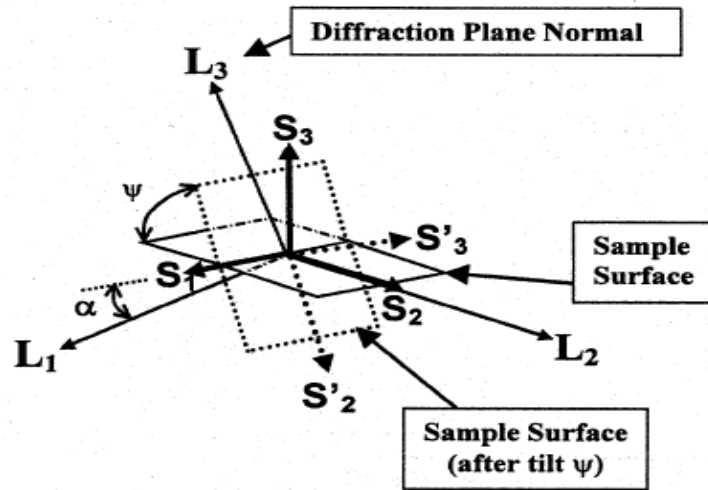


圖 14 ψ 角傾轉示意圖

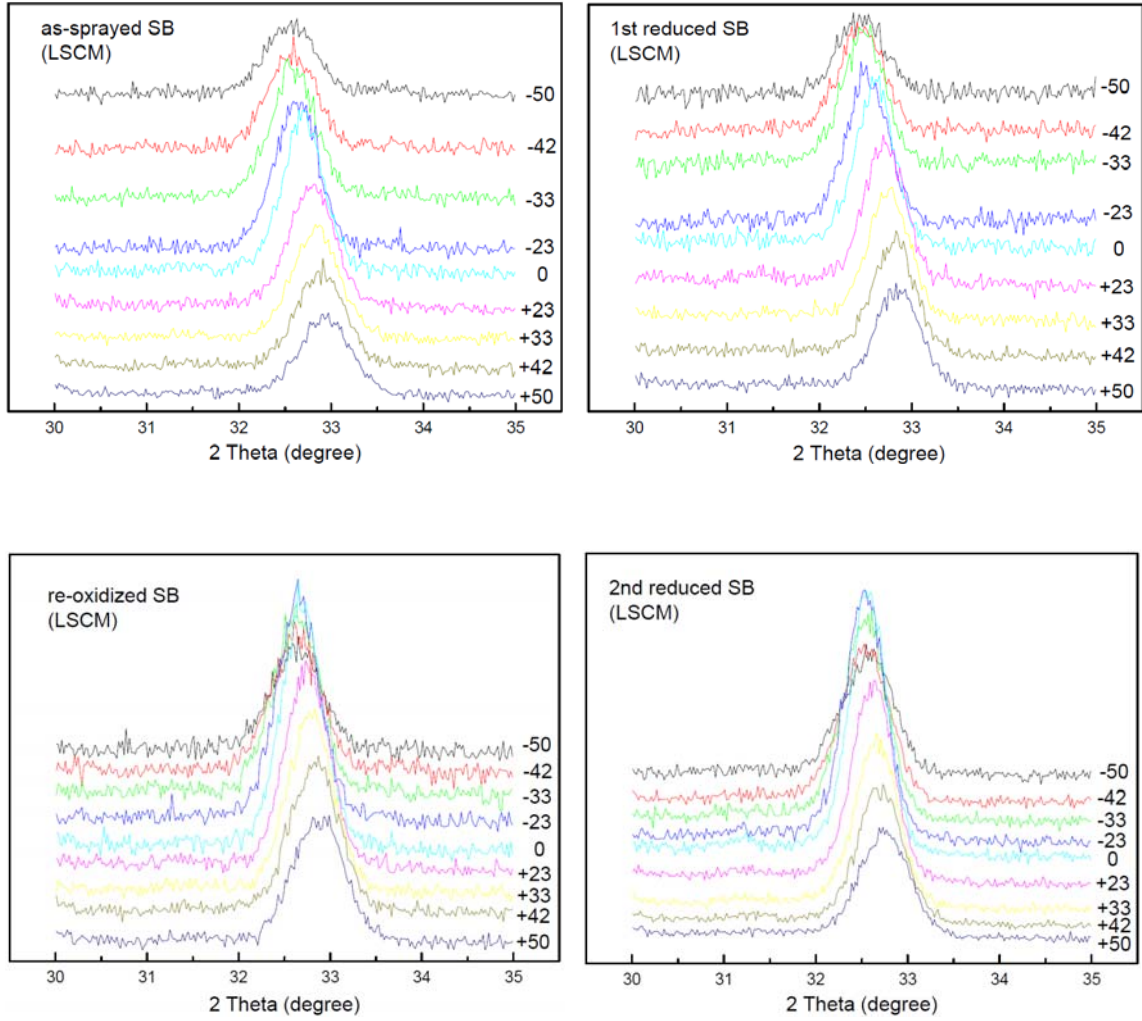


圖 15 SB 塗層經不同處理過程後沿試片長軸方向之殘留應力 XRD 分析

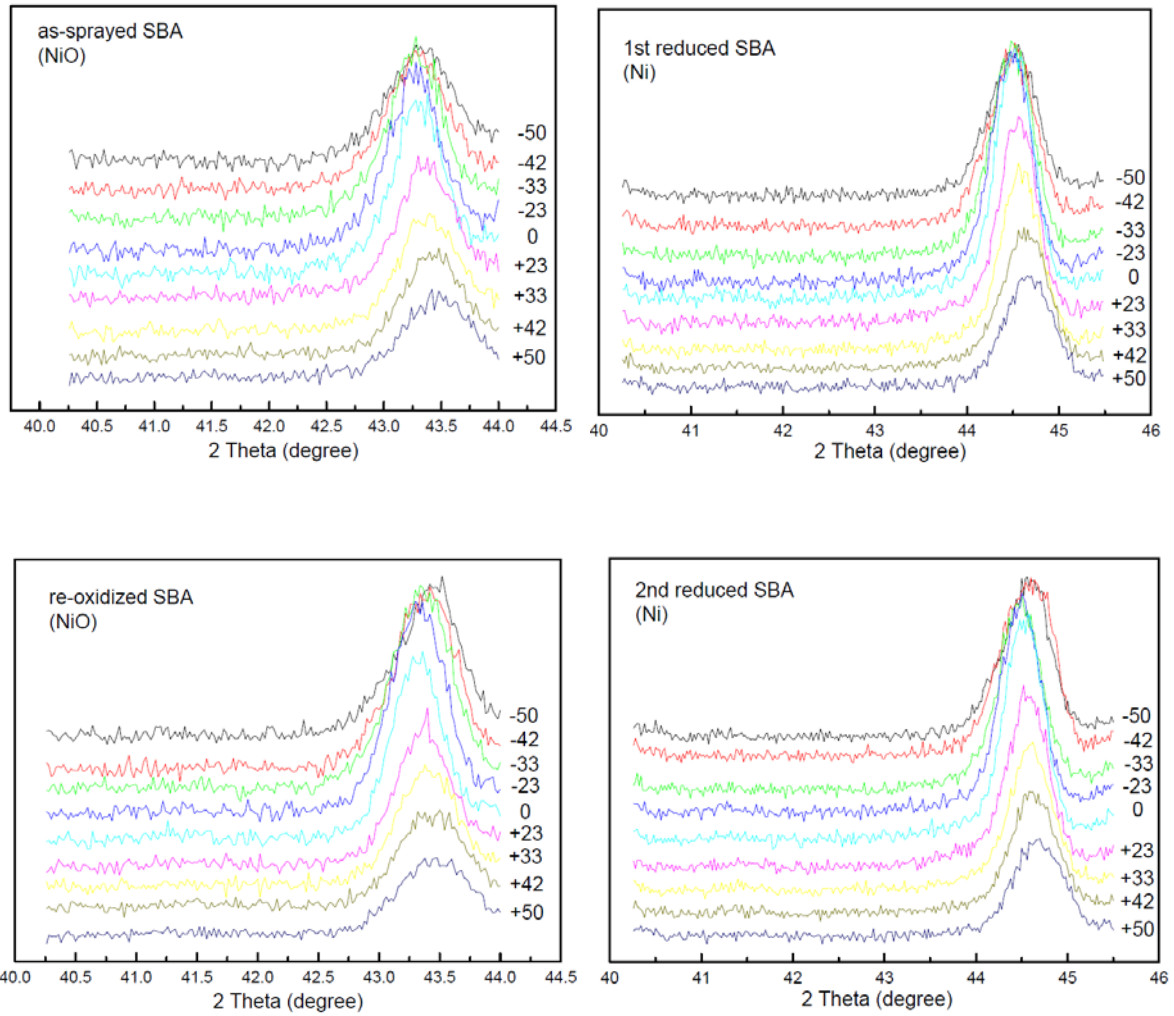


圖 16 SBA 塗層經不同處理過程後沿試片長軸方向之殘留應力 XRD 分析

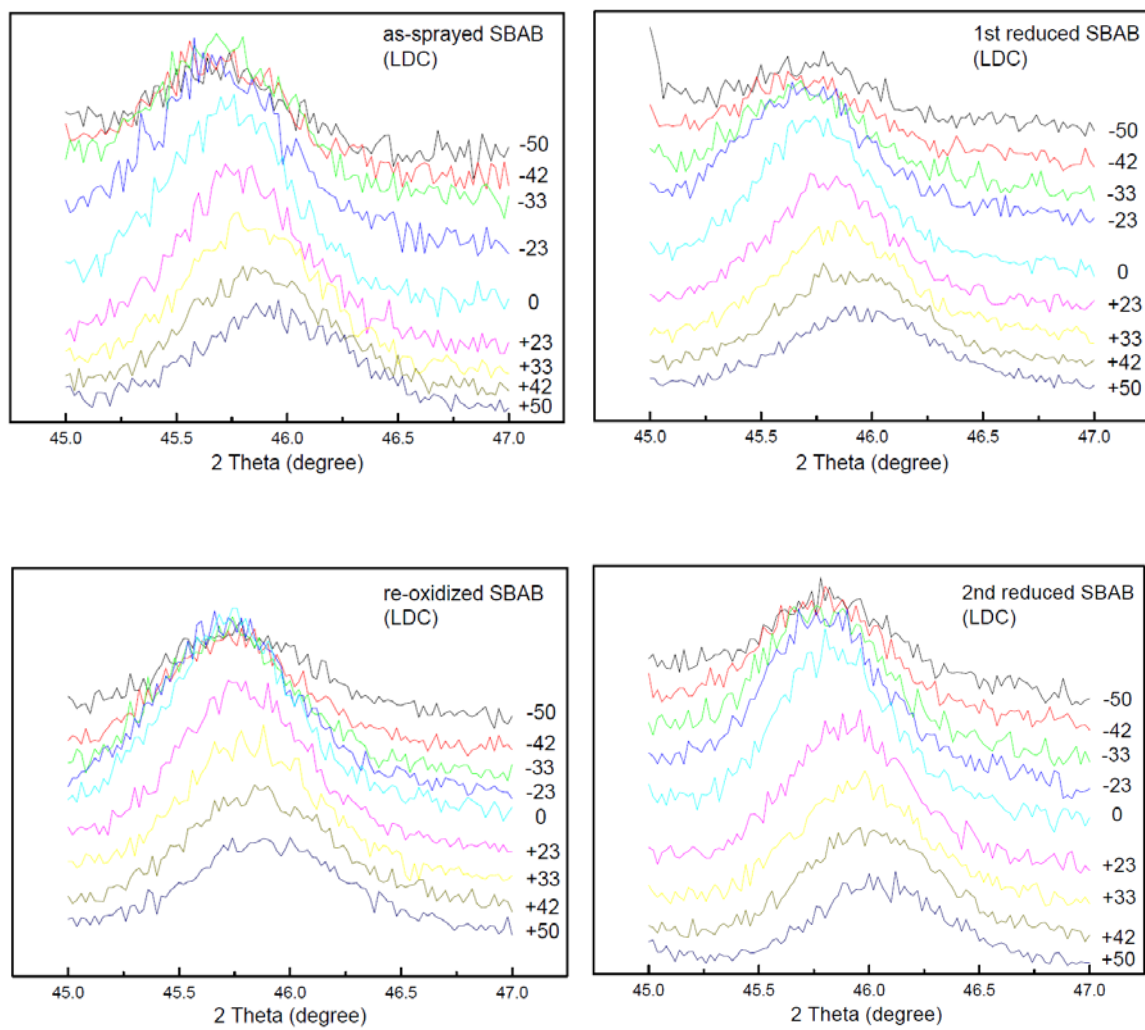


圖 17 SBAB 塗層經不同處理過程後沿試片長軸方向之殘留應力 XRD 分析

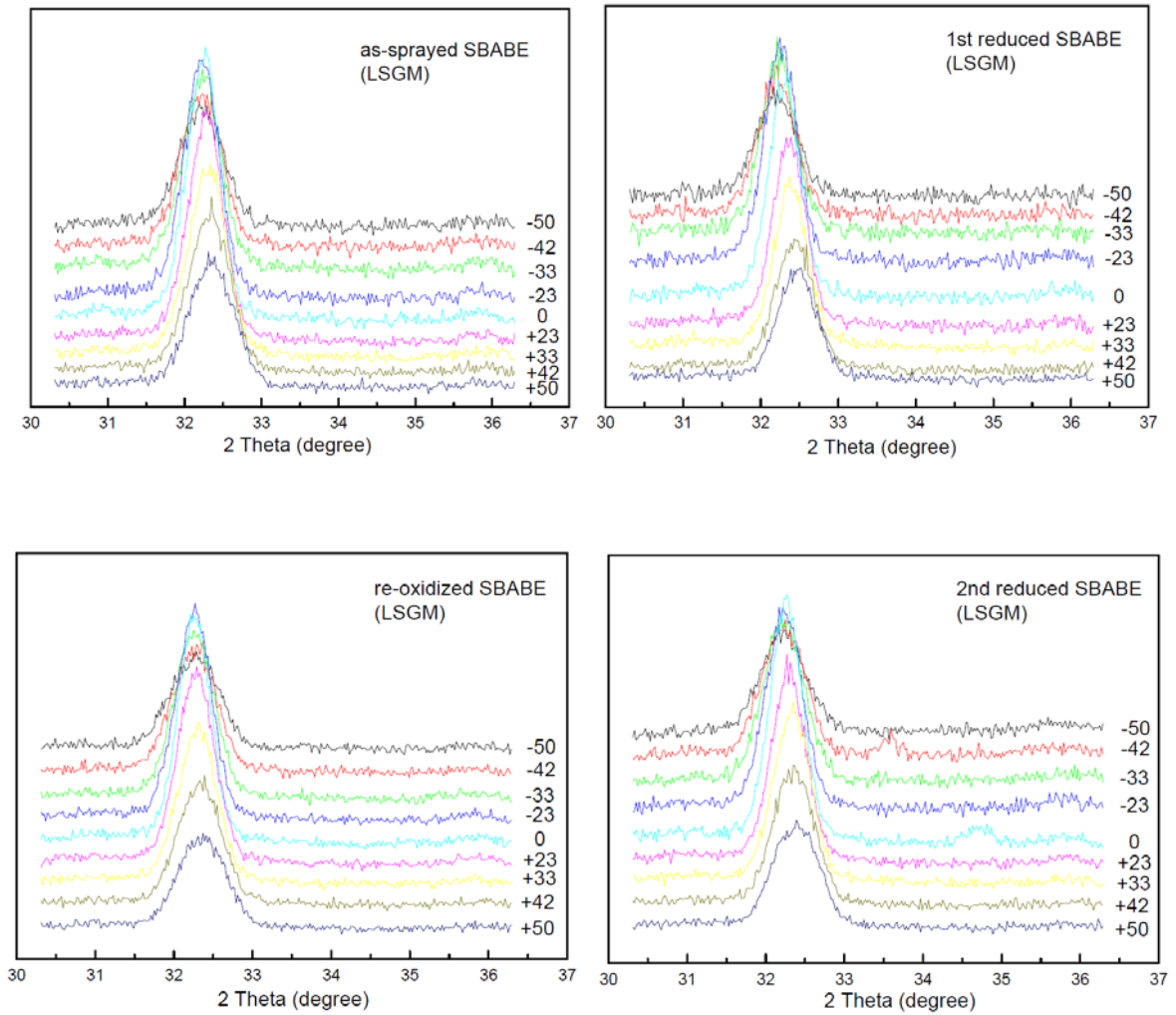


圖 18 SBABE 塗層經不同處理過程後沿試片長軸方向之殘留應力 XRD 分析