



## 二硫化鉬結合二氧化鈦光電極應用之催化特性探討 Application the Molybdenum Disulfide Combined with Titanium Dioxide Photoelectrode to Optimize Catalytic Performance in Cathodic System

王宜達\*<sup>1</sup>、王傑民<sup>1</sup>  
Yi-Ta Wang\*<sup>1</sup>, Jie-Min Wang<sup>1</sup>

### 中文摘要

燃料電池陰極結合電-芬頓系統，可提供陰極催化特性之優化機能暨自保持機制。二氧化鈦(TiO<sub>2</sub>)具良好光催化特性，惟其須以紫外光照射方可激發；二硫化鉬(MoS<sub>2</sub>)具窄能隙與 Mo 邊緣活性點，結合 TiO<sub>2</sub> 形成異質結可增強電子-電洞分離與傳導。本研究藉由控制電沉積時間參數將 MoS<sub>2</sub> 被覆於 TiO<sub>2</sub>/SS316L 電極表面，冀能優化陰極系統催化效能。實驗包含：(1) 掃描式電子顯微鏡(SEM)；(2) 紫外光-可見分光譜(UV-vis)；(3) 線性掃描伏安法(LSV)；(4) 動電位極化法(Potentiodynamic)；(5) 陰極電-芬頓場域分析(EF)。

研究結果顯示，沉積時間 25 分鐘所製備 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L 電極，於吸收光譜中觀察到明顯紅移現象，電化學響應電流相較 TiO<sub>2</sub>/SS316L 提升 2.21 倍，陰極系統反應速率則為 TiO<sub>2</sub>/SS316L 電極之 1.45 倍。證實 MoS<sub>2</sub> 與 TiO<sub>2</sub> 可建構良好效益，使陰極運行效率獲得顯著優化。

**關鍵詞：**電-芬頓、異質結、二硫化鉬、電沉積、二氧化鈦、SS316L。

### Abstract

The cathode of the fuel cell combined with the Electro-Fenton system has the optimized function and self-sustaining mechanism of cathode catalytic properties. Titanium dioxide (TiO<sub>2</sub>) exhibits favorable photocatalytic characteristics, although it primarily responds to UV light irradiation. On the other hand, MoS<sub>2</sub> displays a limited energy gap and active sites near the Mo edge. The combination of MoS<sub>2</sub> with TiO<sub>2</sub> to create a heterojunction can improve the separation of electron-hole, as well as promote conduction. This study manipulates the

收到日期：112 年 02 月 25 日

修訂日期：112 年 07 月 14 日

接受日期：112 年 08 月 28 日

<sup>1</sup> 國立宜蘭大學機械與機電工程學系

<sup>1</sup> Department of Mechanical and Electro-Mechanical Engineering, National Ilan University

\*聯絡作者：ytwang@niu.edu.tw

electrodeposition time parameters to coat the surface of the TiO<sub>2</sub>/SS316L electrode with MoS<sub>2</sub>, aiming to improve the catalytic performance of the cathode system. The studies comprise the following techniques: (1) Scanning electron microscope (SEM); (2) Ultraviolet-visible spectroscopy (UV-vis); (3) Linear scanning voltammetry (LSV); (4) Potentiodynamic polarization (Potentiodynamic); (5) Cathode Electro-Fenton Field Analysis (EF).

The results shown that the MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L electrode with an electrodeposition time of 25 min has an obvious red shift in the absorption spectrum. Additionally, the response current of the electrode is 3.21 times greater than TiO<sub>2</sub>/SS316L, and the reaction rate of the cathode system is 1.74 times higher than TiO<sub>2</sub>/SS316L. It is confirmed that MoS<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> can construct a good benefit, and the cathode operating efficiency can be significantly optimized.

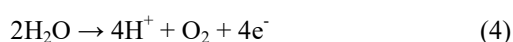
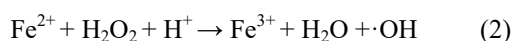
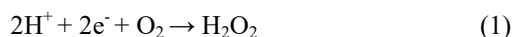
**Keywords:** Electro-Fenton; Heterojunction; Molybdenum Disulfide; Electrodeposition; Titanium Dioxide; SS316L.

## 1. 前言

### 1.1 研究背景與目的

近年工業及社會快速發展，能源及污染議題愈發受到重視。高級氧化程序電-芬頓系統可透過外部供電，使亞鐵離子與過氧化氫於陰極發生反應，產生氫氧自由基，藉氫氧自由基的強氧化能力，降解染料脫色。將電-芬頓系統與燃料電池陰極結合，可使系統達到自我保持機能<sup>[1]</sup>；而燃料電池陰極為影響電-芬頓系統的關鍵因素，因此改善陰極使電-芬頓系統達到高效率為本次議題。

高級氧化程序(Advanced Oxidation Process, AOPs)近年被應用於廢水處理<sup>[2]</sup>，其化學反應產生的氫氧自由基(·OH)具極強化學活性、完全氧化及高去除效率。電-芬頓為一種 AOPs，於反應過程中可提供具強氧化能力·OH，達到降解目的，式(1)~(4)為電-芬頓反應方程式。



### 1.2 研究動機

電-芬頓系統電極特性為影響系統重要因素，理想電極應有：(1) 良好導電性；(2) 耐蝕性；(3) 化學穩定性；(4) 高比表面積等特性<sup>[3]</sup>。近年金屬基材逐漸受到重視，其相對於碳質材料有良好導電性，其中不銹鋼相比其它金屬材料，擁有更好化學穩定性，成本也相對低廉。

二氧化鈦(Titanium dioxide, TiO<sub>2</sub>)為 n-type 寬能隙半導體，具良好光催化活性、化學穩定性、低成本、無毒、耐腐蝕等優點<sup>[4]</sup>，其為應用廣泛的光觸媒材料，據其特性應用於芬頓系統具有吸引力。二硫化鉬(Molybdenum disulfide, MoS<sub>2</sub>)則與石墨烯結構類似的二維材料，其結晶結構在導電性、化學穩定性、機械性、熱穩定上具非等向性<sup>[5]</sup>，是優秀的助催化劑，且為 1.8 eV 直接能隙半導體，具吸收可見光反應析氫與防止電子-電洞對快速復合。層狀 MoS<sub>2</sub> 作為近年的新興材料，發展出發光二極體、積體電路、光電探測器、鋰電池或超級電容器等產物。

本研究透過固定電泳沉積時間將 TiO<sub>2</sub> 製備 SS316L 不銹鋼電極表面(TiO<sub>2</sub>/SS316L)，再經由控制不同電沉積時間製備 MoS<sub>2</sub> 於 TiO<sub>2</sub>/SS316L 表面，藉此探討 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L 複合材料陰極對電-芬頓系統降解效率影響。

## 2. 實驗方法

### 2.1 實驗架構

本研究先透過電泳沉積  $\text{TiO}_2$  形成  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$ ，再以電沉積  $\text{MoS}_2$  於  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$ ，完成  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  複合電極。實驗包含：(1) 掃描式電子顯微鏡-鍍層表面

形貌觀察；(2) 紫外光-可見分光譜-複合電極光響應特性分析；(3) 線性掃描伏安法-檢測複合電極電催化性能；(4) 動電位極化法-複合電極腐蝕性能評估；(5) 電-芬頓系統-複合電極於系統效能測試及驗證；實驗流程如圖 1 所示。

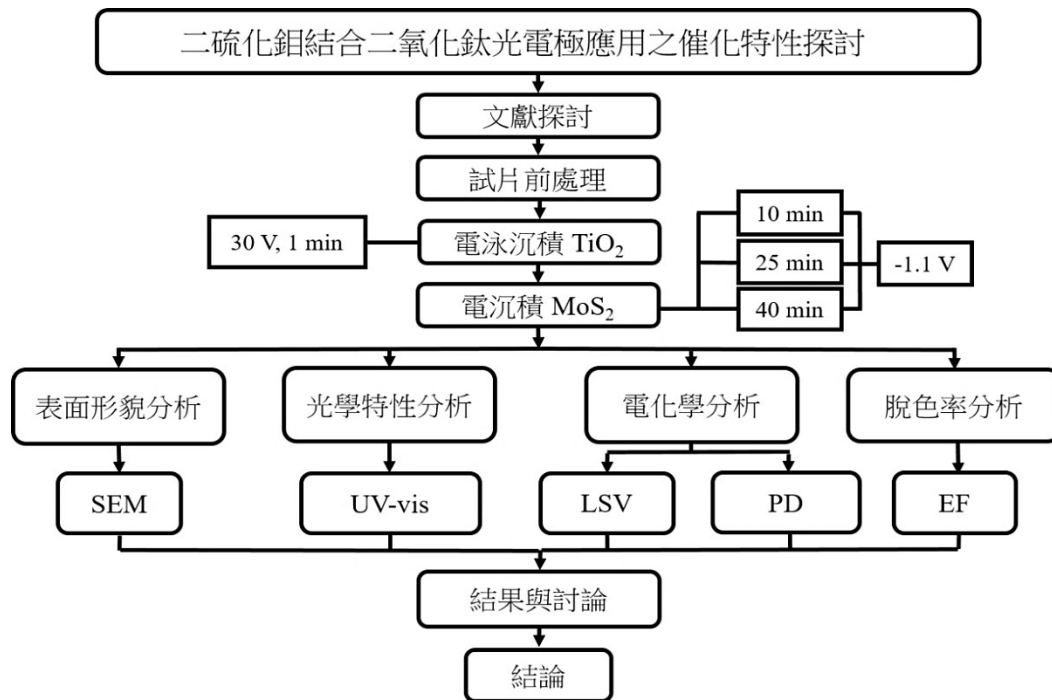


圖 1 實驗架構圖。  
Figure 1 Experimental flow diagram.

### 2.2 電極前處理

本實驗使用尺寸為  $80 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  的 SS316L 不銹鋼作為電極基材，先依序用 #100 ~ #1000 號水砂紙將 SS316L 表面施以研磨，再遞次採用丙酮、蒸餾水清洗，以此去除基材表面污漬。

電、電源輸入 30 V，進行 1 min 電泳沉積，製成  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  複合電極。

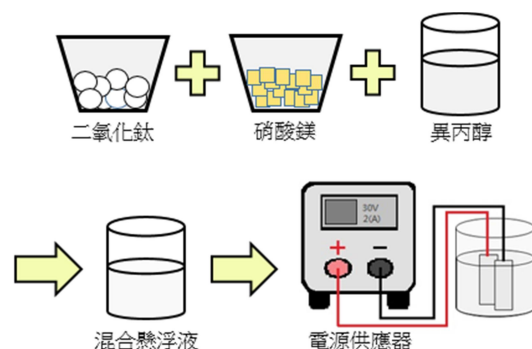


圖 2 電泳沉積電極製備示意圖。  
Figure 2 Schematic diagram of electrophoretic deposition electrode plate preparation.

### 2.3 二氧化鈦電泳沉積

圖 2 為電泳沉積二氧化鈦電極製備示意圖，電泳沉積複合二氧化鈦( $\text{TiO}_2$ )所使用之懸浮液為二氧化鈦、硝酸鎂( $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )、異丙醇以重量 1 : 1 : 1 均勻混合形成。使用二電極電化學系統，陽極/陰極皆為 SS316L 電極，透過直流

## 2.4 二硫化鉬電沉積

圖 3 為電沉積電極製備示意圖，實驗使用氯化鉀(KCl)和四硫代鉬酸銨 $((\text{NH}_4)_2\text{MoS}_4)$ 混和水溶液作為電解液，預熱至  $90^\circ\text{C}$  後，使用三電極電化學系統，參考電極(Ag/AgCl)，對電極(Pt)，工作電極 SS316L，設定輸入  $-1.1\text{ V}$  定電位條件，以此進行不同時間參數的  $\text{MoS}_2$  薄膜沉積。

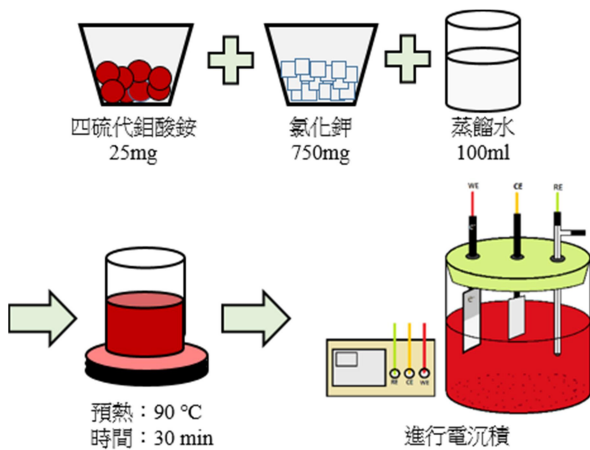


圖 3 電沉積電極製備示意圖。  
Figure 3 Schematic diagram of electrodeposition electrode plate preparation.

## 2.5 電-芬頓場域設置

實驗場域採用容量 250 mL 之玻璃容器，並設置三電極電化學系統，其中不同電沉積時間參數的  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  為工作電極，擇取 Pt 為系統之對電極，兩電極間距控制為 1.5 cm，另以 Ag/AgCl 為系統之參考電極。容器內為 0.1 M  $\text{KNO}_3$  與硫酸亞鐵( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )混合液，並滴定 5 ppm 之 Rh B 染劑為檢測試劑，再使用硝酸( $\text{HNO}_3$ )將 pH 值調降至 3.0；使用空氣幫浦將空氣打入至溶液中，並使用磁石攪拌器均勻攪拌。實驗以可見光分光光度計針對染料降解成效施以評估，以吸收波長 550 nm 檢驗 Rh B 染料之吸光值變化，實驗時間為 30 分鐘，並每 3 分鐘記錄一次，共計 10 筆數據。電-芬頓系統架構示意圖，如圖 4 所示。

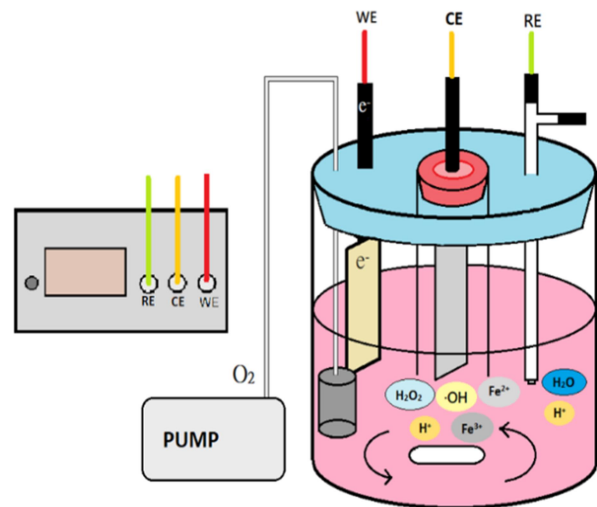


圖 4 電-芬頓系統架構示意圖。  
Figure 4 Schematic diagram of the operation of the Electro-Fenton system.

## 3. 結果與討論

### 3.1 複合電極表面形貌觀察

本研究將  $\text{MoS}_2$  沉積於  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  表面，並設置電沉積時間參數為 10、25 及 40 min 進行  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  複合電極製備。實驗藉由掃描式電子顯微鏡(SEM)觀察分析電極表面微觀結構，結果依序如圖 5(a) ~ (d) 所示。圖 5(a) 為  $\text{TiO}_2$  顆粒沉積形貌，高  $\text{TiO}_2$  奈米顆粒間孔隙可提升實驗染料吸附能力<sup>[6]</sup>。圖 5(b)  $\text{MoS}_2$  沉積 10 min 之形貌， $\text{MoS}_2$  堆疊成塊狀且開始遮蓋部分位於低處之  $\text{TiO}_2$ 。圖 5(c)  $\text{MoS}_2$  沉積 25 min，觀察到更加明顯之  $\text{MoS}_2$  塊狀被覆，部分於表面高處遮蓋  $\text{TiO}_2$  後產生塊狀團聚情形。圖 5(d)  $\text{MoS}_2$  沉積 40 min，相較前者極度明顯覆蓋  $\text{TiO}_2$ ，形成大塊團聚且部分塊狀間產生明顯分裂痕；已有過往研究指出，過量  $\text{MoS}_2$  堆積造成遮蓋硫原子表面活性點，降低催化活性<sup>[7]</sup>。

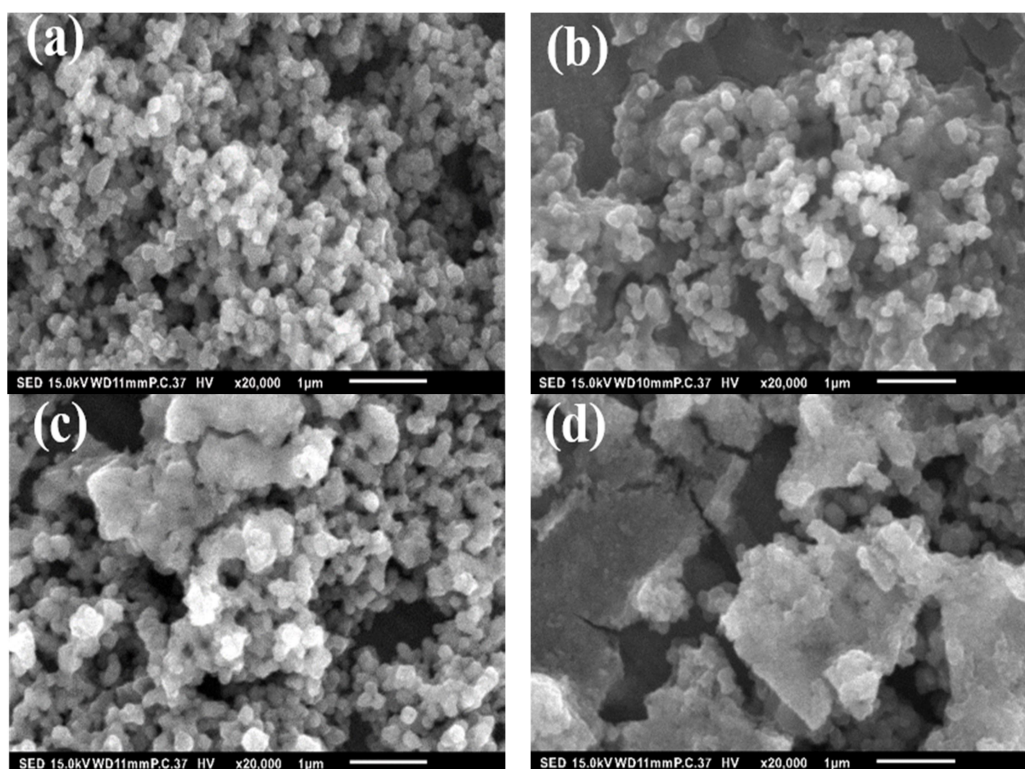


圖 5 不同沉積時間製備之複合電極 SEM 圖像 (a)  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  ; (b)  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  (10 min) ; (c)  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  (25 min) ; (d)  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  (40 min) 。  
 Figure 5 SEM images of composite electrode plates with different deposition times (a)  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$ ; (b)  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  (10 min); (c)  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  (25 min); (d)  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  (40 min).

### 3.2 複合電極光學特性

本研究將  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  與三種沉積時間參數 (10/25/40 min) 製備之  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  進行紫外光-可見光吸收光譜量測，以此應證複合材料之光吸收特性。不同沉積時間複合電極之 UV-vis 光吸收曲線結果，如圖 6 所示。顯示， $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  電極於 385 nm 波段開始顯著吸收，於波段 385 nm 以上則未有光響應，亦即  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  須於紫外光照射條件方可驅動光催化反應。不同電沉積時間製備  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  電極，於波段 385 nm 以上皆可發現光響應；並隨著  $\text{MoS}_2$  沉積量上升，觀察到明顯紅移 (Redshift) 現象，且光吸收強度相較  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  皆明顯提升，表示  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  電極於可見光照射下便可產生光催化行為。Xu 等人<sup>[8]</sup>指出，隨著  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$  複合材料之  $\text{MoS}_2$  沉積量提升，光吸收強度亦愈高。應證本研究電沉積被覆

之複合材料為  $\text{MoS}_2$  與確認光吸收特性。

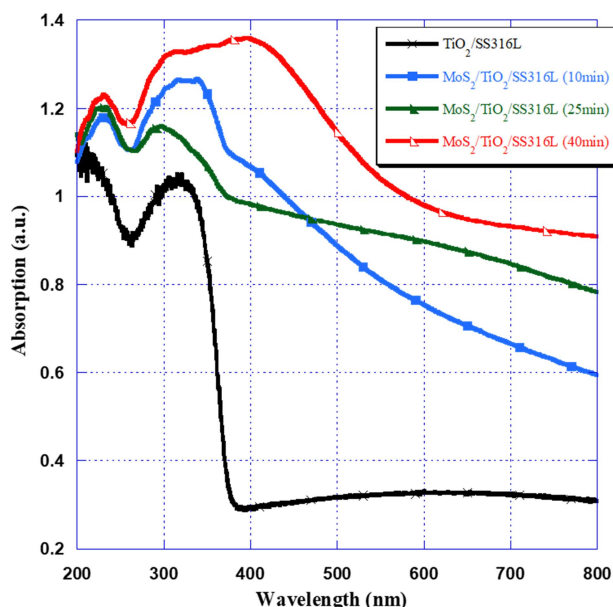


圖 6 不同沉積時間製備複合電極之 UV-vis 光吸收曲線。  
 Figure 6 UV-vis absorption curves of composite electrodes with different deposition times.

### 3.3 複合電極電催化性能

本研究將以線性掃描伏安法針對不同沉積時間之複合電極予以電催化性能評估，比較電極於電-芬頓系統中之氧氣還原反應(Oxidation reduction reaction, ORR)活性。李育漢<sup>[9]</sup>研究指出，SS316L 電極於電位-0.9 V (vs. Ag/AgCl)時反應具最佳響應電流與電-芬頓脫色效益。因此，本研究以電位-0.9 V 為判讀依據，針對各電極於此電位下所呈現之電化學響應電流進行檢測。

不同沉積時間複合電極之電位(V)-電流(A)關係曲線，如圖 7 所示。實驗結果顯示，SS316L、TiO<sub>2</sub>/SS316L、MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (10 min)、MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (25 min) 及 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (40 min)電極，於-0.9 V 操作電位區間其響應電流依序為 2.11、5.79、14.3、18.6、16.7 (mA/cm<sup>2</sup>)。亦即藉由 MoS<sub>2</sub> 複合 TiO<sub>2</sub> 對 SS316L 進行修飾，電化學響應電流獲致顯著提升；其中，MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (25 min)複合電極具較高響應。Zhang 等人<sup>[10]</sup>於過往研究中指出，陰極電極響應電流與過氧化氫產率呈正相關，電極若具較高響應電流，則可相應提升 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 產率。

當電沉積時間從 25 min 延長至 40 min 時，響應電流呈現下降趨勢；於 3.1 章節中，觀察到電沉積時間達 40 min 時，MoS<sub>2</sub> 被覆量上升並明顯覆蓋 TiO<sub>2</sub>，雖可促進可見光波段吸收，然而，表面沉積過量之 MoS<sub>2</sub> 因遮蔽邊緣 S 原子表面活性點，使其催化反應受到抑制<sup>[7]</sup>。另由於 MoS<sub>2</sub> 二維結構層間存在凡得瓦力，使其產生團聚現象，進而導致氧氣還原反應(ORR)活性反應點數量降低<sup>[11]</sup>。亦即較高電沉積時間使 MoS<sub>2</sub> 大面積被覆於表面 TiO<sub>2</sub>/SS316L 表面，其伴隨 MoS<sub>2</sub> 團聚現象趨於明顯，進而使電催化成效降低。

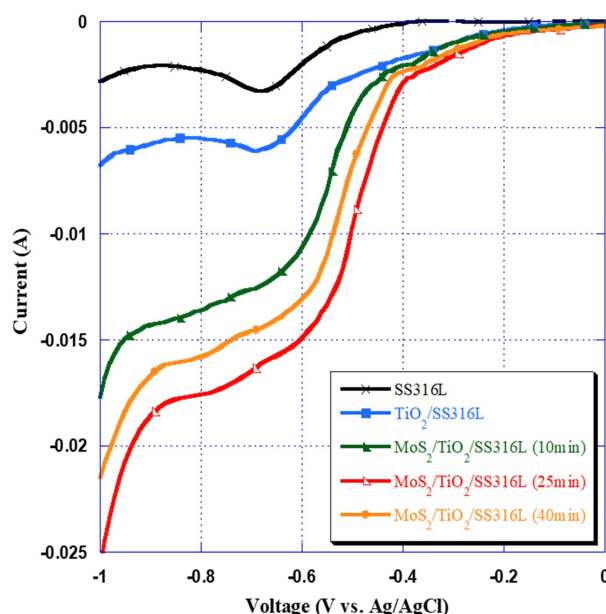


圖 7 不同沉積時間製備複合電極之 LSV 電壓(V)-電流(A)關係曲線。

Figure 7 The LSV Current (A) – Potential (V) relationship curves of composite electrode plates with different deposition times.

### 3.4 複合電極抗腐蝕性能檢測

本研究將 pH 值為 3.0 之模擬電-芬頓系統溶液作為試驗溶液，模擬金屬複合電極於該溶液下腐蝕情形，實驗採取塔弗(Tafel)腐蝕檢測各電極於電-芬頓場域中之抗腐蝕性質差異。

各電極經動電位極化後，經塔弗外插法所量測得腐蝕電位及腐蝕電流值，詳列於表 1。其中，當腐蝕電位愈趨正值，電極於電-芬頓系統酸性環境中較不易發生腐蝕；腐蝕電流為發生腐蝕後之腐蝕速率，電流愈高腐蝕愈快。結果顯示，經複合之 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L 腐蝕電位皆有所上升，但隨著 MoS<sub>2</sub> 沉積量增加，腐蝕電位開始有所下降，且腐蝕電流具明顯增高。Hao 等人<sup>[12]</sup>研究指出，鍍層表面之 MoS<sub>2</sub> 二維結構雖可減緩腐蝕物質滲透，然而於電化學反應過程活性表面易發生析氫反應(Hydrogen evolution reaction, HER)，會促進陰極電流上升而使腐蝕電流密度增大。綜上，MoS<sub>2</sub> 複合電極略降低腐蝕發生，

然而當發生腐蝕反應則大幅加速腐蝕速度。深入了解其腐蝕性優劣與應用權衡為未來值得探討的議題。

表 1 不同沉積時間 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L 之塔弗腐蝕數據表。

Table 1 The data of Tafel corrosion of composite electrode with different deposition times.

複合時間(min)	腐蝕電位 (mV)	腐蝕電流 (nA/cm <sup>2</sup> )
SS316L	-178.33	119.64
TiO <sub>2</sub> /SS316L	-199.39	54.91
MoS <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> /SS316L (10 min)	18.42	407.94
MoS <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> /SS316L (25 min)	-18.89	454.10
MoS <sub>2</sub> /TiO <sub>2</sub> /SS316L (40 min)	-28.85	492.82

### 3.5 電-芬頓場域脫色分析

本研究將不同沉積時間製備之 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L 複合電極於 pH 值為 3.0 之酸性 Rh B 溶液進行電-芬頓場域染料脫色分析，電-芬頓試驗使用之電極為 SS316L、TiO<sub>2</sub>/SS316L、MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (10/25/40 min) 複合電極，實驗時間 30 分鐘，以可見光分光光度計測量光吸收值變化，並以式(5)計算取得脫色率。

$$\text{Decolorization rate} = \left(1 - \frac{A_t}{A_0}\right) \times 100\% \quad (5)$$

圖 8 為不同沉積時間複合電極之電-芬頓場域脫色率曲線，各試驗電極最終脫色率如表 2 所示。結果顯示，最終脫色率最高為 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (25 min) 複合電極 62.25%，為單 SS316L 電極與 TiO<sub>2</sub>/SS316L 複合電極之脫色率的 2.01 倍與 1.45 倍。MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (40 min) 複合電極脫色率相較並無進一步提升，反呈現下降趨勢，亦即延長沉積時間無法對電-芬頓

系統降解形成進一步提升，實驗結果與 3.3 章節結果相呼應。結果證實，經由 MoS<sub>2</sub> 複合 TiO<sub>2</sub> 後，透過 MoS<sub>2</sub> 活性點提升陰極電極催化活性，同時 MoS<sub>2</sub> 可促進可見光波段吸收，與 TiO<sub>2</sub> 間形成異質結以驅動光催化反應並輔助電-芬頓系統運行，提升·OH 生成來加速 Rh B 染料降解。然而過量 MoS<sub>2</sub> 雖可提升可見光吸收能力，惟其 MoS<sub>2</sub> 間因團聚現象發生使活性點位降低，不利與電-芬頓反應進行。亦即，於整體反應過程中，電-芬頓偕同光催過程中以電催化反應為主導，光催化為輔助功能，因此適量電沉積之 MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SS316L (25 min) 複合電極具良好表面活性、最大響應電流，同時可於催化過程吸收可見光以導入光催化反應，藉此提供良好電化學性提升電-芬頓系統運行效率。

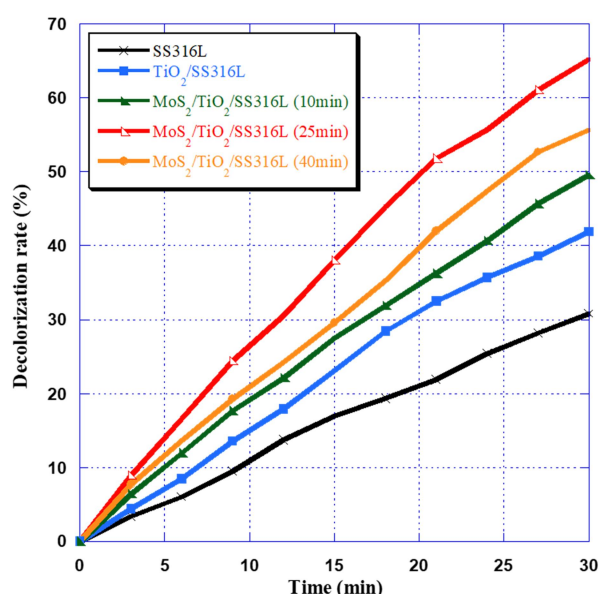


圖 8 不同沉積時間製備複合電極之電-芬頓場域脫色率曲線。

Figure 8 Electro-Fenton decolorization rate curves of composite electrodes with different deposition times.

## 4. 結論

本研究探討不同沉積時間參數之 MoS<sub>2</sub> 電沉積 TiO<sub>2</sub>/SS316L 製備複合電極，獲得如下結論：

1. 沉積時間 25 分鐘所製備  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  觀察到  $\text{MoS}_2$  均勻沉積，而沉積時間過長會造成  $\text{MoS}_2$  團聚並遮蓋  $\text{TiO}_2$  與表面疏活性點。
2.  $\text{MoS}_2$  沉積量時間愈長， $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  電極吸收光譜觀察到紅移現象，可見光區吸收強度亦愈高。而沉積時間 25 分鐘所製備  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  複合電極具最高響應電流  $18.6 \text{ mA/cm}^2$ ，相較單  $\text{SS316L}$  與  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  電極，分別提升 7.81 與 2.21 倍，電催化活性更佳。
3. 不同沉積時間複合電極之腐蝕電位相較  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  有提升，但隨著  $\text{MoS}_2$  沉積量增加，腐蝕電位呈現下降趨勢；腐蝕電流於  $\text{MoS}_2$  沉積後則呈現上升趨勢， $\text{MoS}_2$  複合電極之析氫反應可能促進腐蝕進程。
4. 沉積時間 25 分鐘所製備  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  複合電極具最高脫色率 62.25 %，為  $\text{SS316L}$  基材與  $\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  複合電極之脫色率的 2.01 倍與 1.45 倍。

綜上，不同二硫化鉬電沉積時間參數之  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  複合電極於 SEM 表面形貌、紫外光-可見光吸收度、LSV 響應電流、Tafel 電腐蝕、電-芬頓場域脫色進行分析。綜合結果顯示，電沉積時間 25 分鐘製備  $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2/\text{SS316L}$  具較佳整體效能；研究結果可供作燃料電池與電-芬頓系統其電極材料應用參考。

## 致謝

本文為科技部計畫編號：MOST 110-2221-E-197-026 編列計畫，於科技部支持使本計畫順利進行，特以致謝。

## 參考文獻

- [1] “Comparison of UV-mediated advanced oxidation”, E. Rosenfeldt, A. K. Boal, J.

Springer, B. Stanford, S. Rivera, R. D. Kashinkunti, and D. H. Metz, *Journal-American Water Works Association*, 105 (2013) pp. 29-33.

- [2] “Catalytic performance of nanostructured materials recently used for developing fuel cells’ electrodes”, N. Hassan, *International Journal of Hydrogen Energy*, 46 (2021) pp. 39315-39368.
- [3] “Progress in material selection for solid oxide fuel cell technology: A review”, N. Mahato, A. Banerjee, A. Gupta, S. Omar, and K. Balani, *Progress in Materials Science*, 72 (2015) pp. 141-337.
- [4] “ $\text{TiO}_2$  nanobelts—Effect of calcination temperature on optical, photoelectrochemical and photocatalytic properties”, Q. Chen, H. Liu, Y. Xin, and X. Cheng, *Electrochimica acta*, 111 (2013) pp. 284-291.
- [5] “Molybdenum disulfide nanomaterials: structures, properties, synthesis and recent progress on hydrogen evolution reaction”, Z. He and W. Que, *Applied Materials Today*, 3 (2016) pp. 23-56.
- [6] “Fabrication of dye-sensitized solar cells based on the composite  $\text{TiO}_2$  nanoparticles/ $\text{ZnO}$  nanorods: Investigating the role of photoanode porosity”, A. Zatirostami, *Materials Today Communications*, 26 (2021) p. 102033.
- [7] “Effects of excess sulfur source on the formation and photocatalytic properties of flower-like  $\text{MoS}_2$  spheres by hydrothermal synthesis”, B. Sheng, J. Liu, Z. Li, M. Wang, K. Zhu, J. Qiu, and J. Wang, *Materials Letters*, 144 (2015) pp. 153-156.



- [8] “Growth of MoS<sub>2</sub> nanoflakes and the photoelectric response properties of MoS<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> NRs compositions”, J. Xu, Y. Gao, S. Shi, L. Kong, R. Cao, J. Chen, Y. Bu, X. Zhang, and L. Li, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30 (2019) pp. 1-12.
- [9] 李育漢，「應用二氧化錫複合奈米碳管於 316 不銹鋼電極進行電芬頓系統性能研究」，國立宜蘭大學機械與機電工程學系所碩士論文，2017。
- [10] “Design of a novel and efficient electro-Fenton cathode with skeleton of melamine foams”, Y. Zhang, Z. Chen, P. Wu, Y. Duan, Y. Zhao, L. Zhou, Y. Lai, and F. Wang, *Materials Letters*, 239 (2019) pp. 196-199.
- [11] “Engineering Mo-O-C interface in MoS<sub>2</sub>@rGO via charge transfer boosts hydrogen evolution”, Y. Wang, F. Lu, K. Su, N. Zhang, Y. Zhang, M. Wang, and X. Wang, *Chemical Engineering Journal*, 399 (2020) p. 126018.
- [12] “Electrochemical catalysis and corrosion of defective MoS<sub>2</sub>: Microscopic behaviors and density-functional-theory calculations”, Y. Hao, T. Y. Sun, and L. F. Huang, *Current Opinion in Electrochemistry*, 34 (2022) p. 101008.