

逢甲大學學生報告 ePaper

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

Ni-MOF-derived NiPt dual atoms self-supporting electrode by inkjet printing for hydrogen evolution reaction

作者：楊千嬉

系級：材料三甲

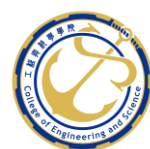
學號：D1127874

開課老師：駱榮富

課程名稱：專題討論

開課系所：材料科學與工程學系

開課學年：113 學年度 第 2 學期



摘要

有機金屬框架 (Metal Organic Framework, MOF) 是為金屬離子/金屬簇結合有機配體所組成的一種新穎的孔洞材料，因其具有高比表面積、高孔隙率、結構可調節性，常被應用於催化劑、電容材料、氣體儲存等等...

本研究旨在探索使用單原子金屬電催化劑與雙原子電催化劑的差別，以及使用噴墨技術，將基材與 MOF 材料緊密結合，減少使用黏著劑，避免活性位點被遮蔽，目的是希望可以創建出穩定且有效的電催化劑。實驗通過在三聚氰胺海綿上噴墨列印 *NiPt-MOF* 前驅體，並進行高溫熱解和進行酸洗處理，製造出了一種負載在海綿碳上的 *NiPt* 雙原子自支撐電極又稱 *NiPt DAs/CMS*。通過像差校正透射電子顯微鏡證實了均勻且隨機分佈的雙原子型態。並用來進行一系列的電化學產氫，以及研究機制。*NiPt DAs/CMS* 在電流密度為 10 mA/cm^2 的酸性和鹼性介質中分別具有 91 和 71 mV 的低過電位，相應的塔弗斜率值為 48 和 76 mV/dec，其表現於酸性介質中保持恆定的析氫過電位長達 27 小時而不衰減。

關鍵字：自支撐基材、金屬有機框架、產氫、雙原子電催化劑、穩定性。

Abstract

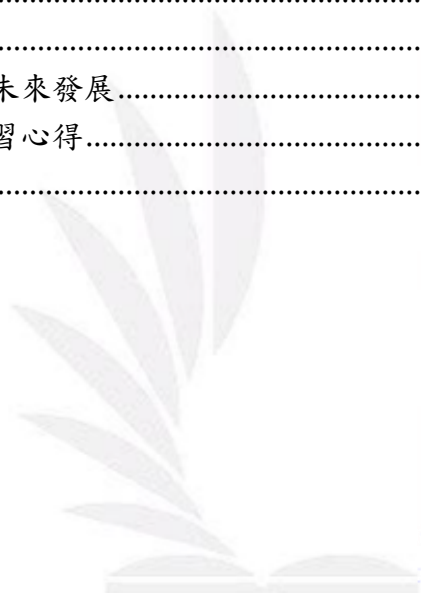
Metal Organic Framework (MOF) is a novel porous material composed of metal ions/metal clusters bound to organic ligands, which is often used in catalysts, capacitive materials, gas storage, etc., due to its high specific surface area, high porosity, and structural stability.

The purpose of this study was to explore the differences between the use of single-atomic metal electrocatalysts and diatomic electrocatalysts, as well as the use of inkjet technology to tightly combine the substrate with the MOF material, reduce the use of adhesives, and avoid the occlusion of the active site, with the aim of creating a stable and effective electrocatalyst. In this experiment, a NiPt diatomic self-supporting electrode, also known as NiPt DAs/CMS, was fabricated by inkjet printing of NiPt-MOF precursor on melamine sponge, high-temperature pyrolysis and pickling treatment. The uniform and randomly distributed diatomic pattern was confirmed by aberration-corrected transmission electron microscopy. It is also used to carry out a series of electrochemical hydrogen production, as well as to study the mechanism. NiPt DAs/CMS have low overpotentials of 91 and 71 mV in acidic and alkaline media with current densities of 10 mA/cm², respectively, and corresponding Tarver slope values of 48 and 76 mV/dec, which are manifested by maintaining a constant hydrogen evolution overpotential in acidic media for up to 27 hours without attenuation.

Keyword : diatomic electrocatalysts, hydrogen production, metal-organic frameworks (MOFs), self-supporting substrates, stability

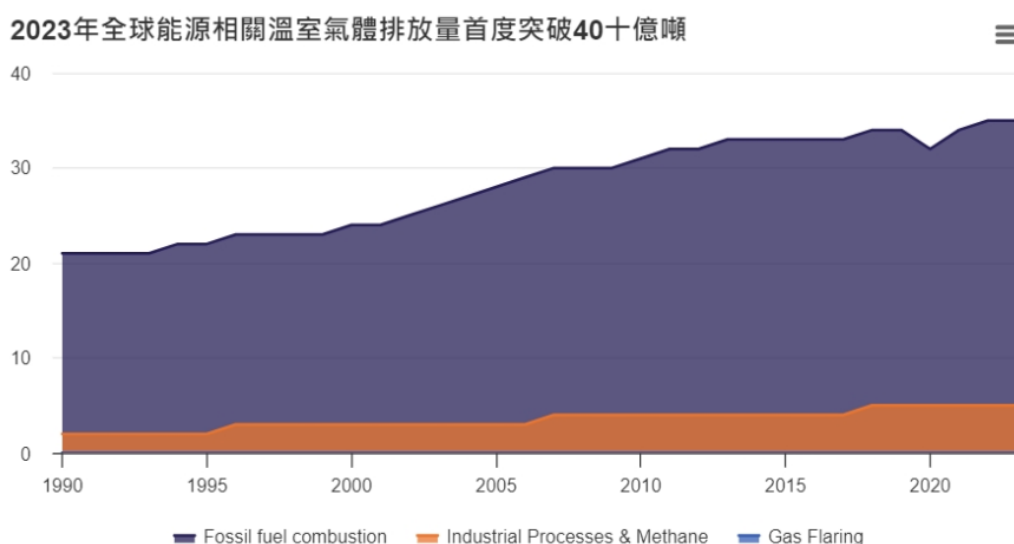
目次

摘要.....	1
Abstract	2
1. 研究背景和現況.....	4
2. 實驗方法.....	6
2.1 構想：	6
2.2 相關理論：	7
2.3 實驗步驟：	8
3. 結果與討論.....	9
3.1 進行表徵分析.....	9
3.2 電化學分析.....	13
4. 結論.....	16
5. 本研究的應用潛力與未來發展.....	17
6. 本篇論文的觀察與學習心得.....	20
7. 參考文獻.....	22



1. 研究背景和現況

持續的經濟擴張與全球每年約 1.05% 的人口成長，導致人類對能源的需求持續攀升，傳統能源供應逐漸無法滿足現有需求。當前能源系統高度依賴化石燃料（石油與天然氣），對環境與氣候造成重大衝擊。



與能源相關的溫室氣體排放量也首次超越400億公噸，其中燃燒化石燃料所產生的二氧化碳，就佔總量的87%。圖片來源：能源研究院《世界能源統計回顧》

圖 1. 2023 年全球能源相關碳排量

特別是其燃燒過程中所釋放的溫室氣體，導致溫室效應並促使全球暖化加劇。（溫室效應：太陽所釋放的可見光與紫外光部分穿透大氣層並被地表吸收，地表再以紅外線形式釋放熱能，這些紅外線被溫室氣體吸收後使熱能困於大氣中，進而提升全球溫度。）因此，開

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

發潔淨、可再生和高穩定的能源作為替代能源成了迫在眉睫的問題。

永續能源通常是少量地產出能源，主要以儲存能源作為供用。許多研究學者都致力於使用氫 (H_2) 作為環境友善的能源載體。目前，人們普遍認為氫氣可能是解決疲勞、污染和氣候變遷後果三重威脅的最佳解決方案。

可以透過將水分解產生氫氣，也可以使用多種能源來裂解 H-O-H 鍵，包括電解、熱解和光解是水分解操作中最常見的能源類型，其中電解和熱解最為常見，反應式為： $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ 。水在陽極處分解成氣態氧以及質子和電子。陰極則是質子和電子重新結合形成氫氣。



圖 2. 氫氣製造方式

而本篇採用電解水製氫，水電解有著悠久的歷史，通常被認為是最有潛力和最方便的產生氫氣和氧氣的方法。目前，由於高成本和少量地球稀有金屬，使得水分解催化劑的大多數商業用途受到限制。找出長期運作穩定性的材料是一個重要的考慮因素，還需要能夠在急性條件（酸、鹼、光熱）下運作和有效地加速緩慢的動力學過程，在這方面，金屬有機框架（Metal-Organic Frameworks, MOF）具備高度孔隙度與可調控結構，是一類極具潛力的催化材料，能透過調控金屬節點與有機配體進一步優化其催化活性與穩定性。本研究以雙原子金屬摻雜方式（*NiPt*）改質 MOF 材料，並搭配噴墨列印技術將其沉積於三聚氰胺海綿（MS）基材上，製備出自支撐型氫氣析出反應電極（*NiPt* DAs/CMS）。此方法不僅可提升活性面積與電荷傳輸效率，亦證明具備良好附著性與熱穩定性。初步實驗顯示，*NiPt* 雙原子催化劑在酸性條件下展現優異的電催化表現，並優於對照組 *Ni* 單原子催化劑（*Ni* SAs/CMS）。

2. 實驗方法

2.1 構想：

1. 利用原先的鎳基有機金屬框架，添加性能較為良好且成本較高的鉑於實驗，看看是否可以提高性能？

2. 使用新型噴墨技術，用於自備樣本並進行電催化測試，目的是希望減少使用黏著劑塗覆基材，並觀察是否均勻分布和良好的複合於基材？
3. 運用此雙原子金屬電催化劑，是否可以有效地產生氫氣？

2.2 相關理論：

2.2.1 水熱法

水熱法是一種在高溫高壓條件下合成材料的技術，主要應用於製備奈米材料、晶體、氧化物等。在密閉的高壓容器（如水熱反應釜）中，將原料與水混合加熱至 100°C 以上，使其在亞臨界或超臨界水的環境中進行溶解、反應與結晶。這種方法模擬自然界礦物形成過程，具有反應溫度低、晶體品質高、粒徑可控等優點。水不僅作為溶劑，也參與反應，影響產物的形貌與結構。常見應用包括合成氧化鋅、鈦酸鹽、沸石等材料。

2.2.2 噴墨列印

噴墨列印是一種非接觸式的數位印刷技術，利用噴嘴將微小墨滴精確地噴灑到基材上，形成圖案或文字。具有解析度高、材料浪費少、可列印於各種柔性或不規則表面等優點。依墨滴生成原理分為連續式與按需式兩大類，其中按需式（如熱泡式、壓電式）應用最廣。此技術具備高精度、客製化與低成本潛力，是未來數位製造

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

的重要方向之一。

2.2.3 電化學

電化學是研究電能與化學反應之間轉換的科學，涵蓋了氧化還原反應、電池、電鍍、電解等技術。其核心概念是電子在電極與電解液間的轉移，藉由外加電壓或產生電流來驅動或探測化學反應。此實驗中使用電極系統包括參比電極、工作電極與對電極，搭配循環伏安、電化學阻抗等量測方式估算其材料應用潛力。

2.3 實驗步驟：

2.3.1 製備 *NiPt-MOF* 墨水

取 166 mg 的對苯二甲酸、9.6 mg 的硝酸鎳、3 mg 的乙酰丙酮鉑溶於 20 mL 的二甲基甲醯胺，均勻攪拌，之後再加入 2 mL 的氫氧化鈉 (0.4 M)。上述溶液倒入 40 mL 鐵氟龍，進行熱解 100°C，8 個小時。得到綠色粉末，並用二甲基甲醯胺和去離子水沖洗數次，於 80°C 隔夜烘乾，得到 *NiPt-MOF*。

將 20 mg 的 *NiPt-MOF* 以及 20 mg 的聚乙烯吡咯烷酮溶於 20 mL 的無水乙醇，並用超音波震盪機震盪 30 分鐘得到 *NiPt-MOF* 墨水。

2.3.2 基材前處理

三聚氰胺海綿 (MS, 3.5×2.5×0.3 cm³)，進行基材前處理，使用去離子水以及無水乙醇沖洗數次，以去除表面雜質。

2.3.3 製備 *NiPt* DAs/CMS

將清洗好的基材以及 *NiPt*-MOF 墨水使用噴墨列印的方式，進行電催化劑的製備。(噴墨印表機使用的參數為：運動模式為線性提升，空載電壓設定為 0 V。上升時間、下降時間、返回時間和保持時間設定分為 5 μ s、5 μ s、15 μ s 和 15 μ s。恆壓和返回電壓分別設定為 70 V 和 -70 V，噴孔直徑為 80 μ m。)透過噴墨印刷技術將 *NiPt*-MOF 墨水在三聚氰胺正反面上各沉積 10 層，得到 *NiPt*-MOF/MS。再次進行熱解 800 $^{\circ}$ C、1 小時(溫度上升時間為 5 $^{\circ}$ C/min，通入氫氣)得到 *NiPt* DAs/NPs/CMS，此目的是為了確保完美結合於基材上。

隨後進行 2 M 硫酸為期 48 小時的酸洗，目的是為了去除熱解所形成的鎳奈米顆粒，最終得到我們的 *NiPt* DAs/CMS 自支撐電極。

比較組為只添加硝酸鎳的單原子金屬電催化劑稱為 *Ni* SAs/CMS。

3. 結果與討論

3.1 進行表徵分析

3.1.1 SEM 分析

Ni-MOF 和 *NiPt*-MOF 的晶體結構呈現不規則層狀，這種層狀結構具有更大比表面積，有助於增加催化劑的電化學活性表面積，也證

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

實了上述提及的 XRD 證明兩者晶體結構相似。

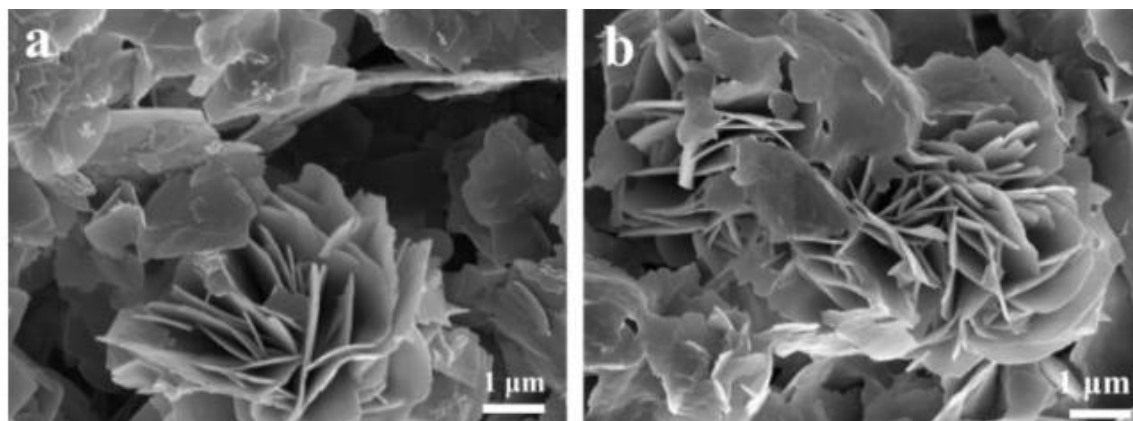


圖 3. (a) *Ni-MOF* 和 (b) *NiPt-MOF* 的 SEM

經過噴墨技術塗佈在基材並進行熱解的 *Ni SAs/NPs/CMS* 和 *NiPt DAS/NPs/CMS* 晶體結構仍為層狀結構，不過因為熱解所以上面有著奈米顆粒的形成。

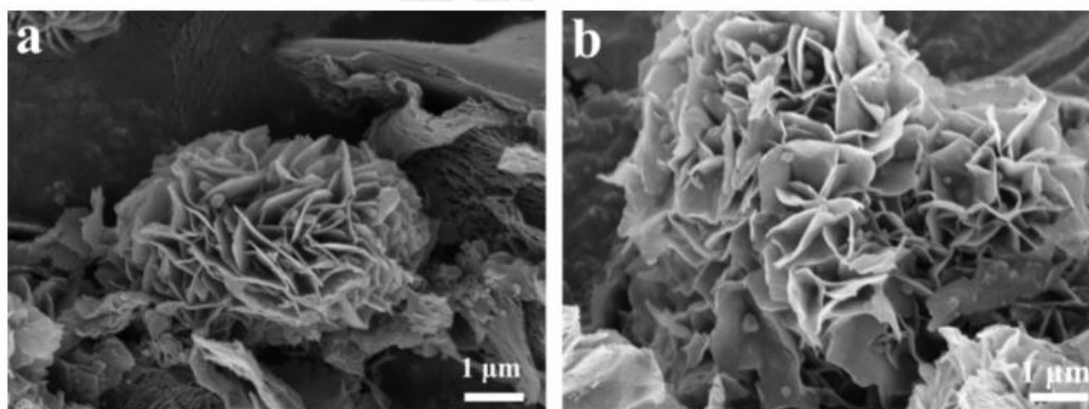


圖 4. (a) *Ni SAs/NPs/CMS* 和 (b) *NiPt DAS/NPs/CMS* 的 SEM

3.1.2 XRD 分析

由圖五可發現 *Ni-MOF* 和 *NiPt-MOF* 兩者前軀體的衍射峰，從 2θ 值對應兩者衍射峰，*Ni-MOF*： $2\theta=9.1^\circ(100)$ 、 $15.8^\circ(010)$ 、

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

$18.5^\circ(101)$ 、 $23.7^\circ(200)$ ；*NiPt-MOF*： $2\theta=9^\circ$ 、 15.7° 、 18.4° 、 23.7° ，

角度皆非常相近，證實儘管多添 Pt 引入並沒有改變 *Ni-MOF* 的晶體結構。

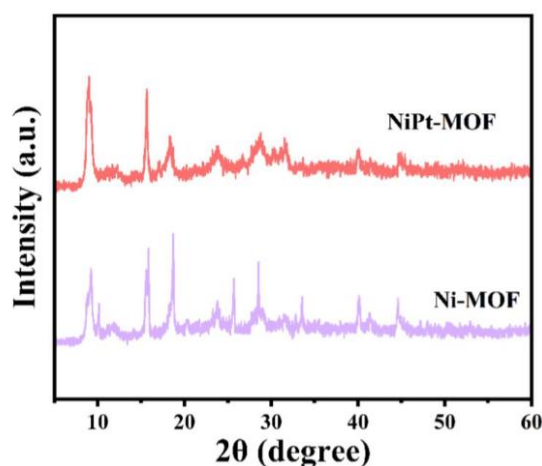


圖 5. *Ni-MOF* 和 *NiPt-MOF* 的 XRD 圖

經由熱解和酸洗過後的 *Ni SAs/CMS* 和 *NiPt DAs/CMS* 其衍射峰皆只有一個 $2\theta=21^\circ$ ，對應到無定形碳寬峰，無 Ni、Pt 金屬相對應繞射峰，證明酸洗成功去除了熱解所形成的鎳奈米顆粒。

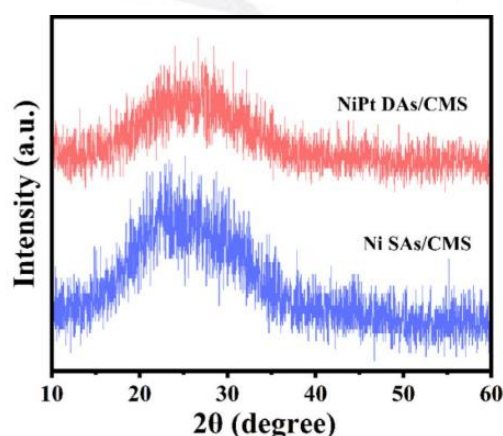


圖 6. *Ni SAs/CMS* 和 *NiPt DAs/CMS* 的 XRD 圖

3.1.3 TEM

從 TEM 可以清晰地看到金屬奈米顆粒被成功去除，且結構呈現高透明層狀結構，這有助於暴露更多活形位點。

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

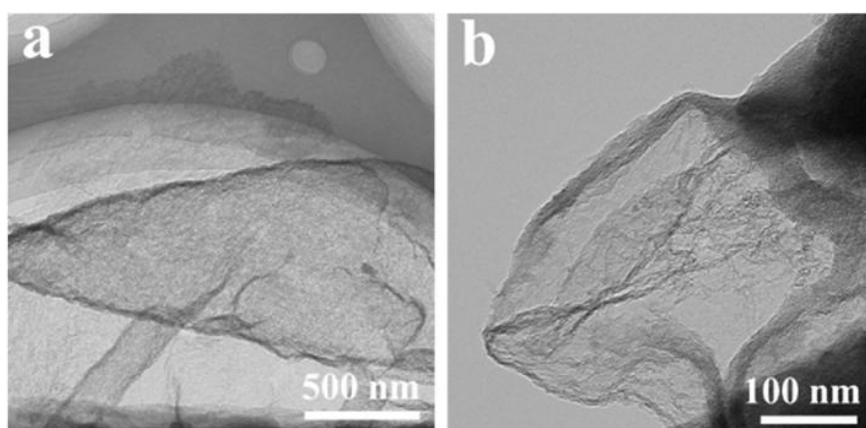


圖 7. (a,b) *NiPt* DAs/CMS 的 TEM

3.1.4 AC-HAADF-STEM

可以觀察試片上的分佈發現，從像差修正高角度環形暗場掃描透射電子顯微鏡中可以看到綠色框框分佈，分別一黑一白的量子點，這邊為了進一步推算進行了強度分佈發現 e1、e2 這兩組的原子間距對應 2.8 Å，證明兩者皆是一樣的元素，分別為鎳和鉑。

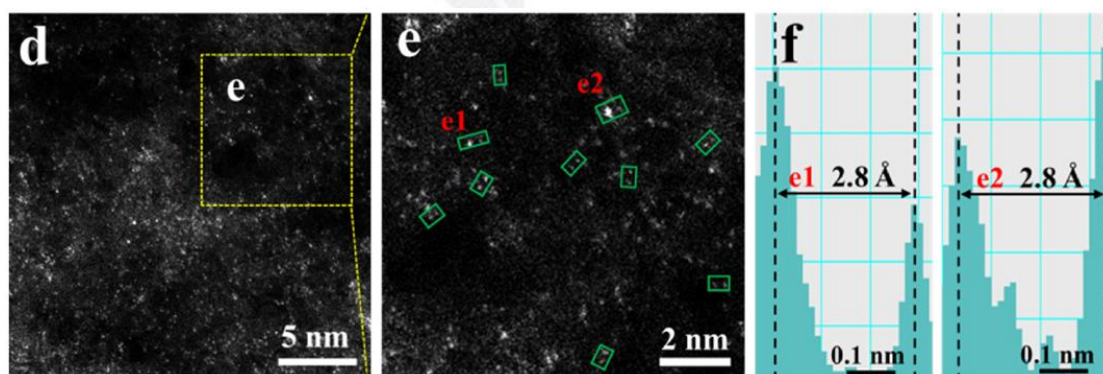


圖 8. (d,e) *NiPt* DAs/CMS 的 AC-HAADF-STEM (f) 強度分佈曲線

3.1.5 EDS

實驗引入了新型噴墨技術，可以使得溶液均勻噴灑在基材上，因此為了證實是否均勻分布，進行元素分佈，從圖九看出元素皆均勻分布於基材。

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

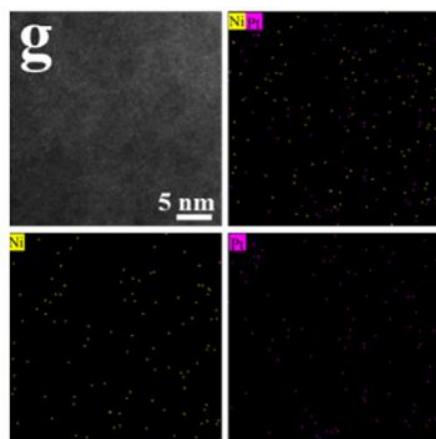


圖 9. *NiPt* DAs/CMS 的元素分析

3.1.6 XPS

從這張圖可以看到 *NiPt* DAs/CMS 和 *Ni* SAs/CMS 的 C 1s, N 1s, Ni 2p, Pt 4f，其鍵結能皆相似，但因鎳金屬在酸洗時被去除，因此在 Ni 2p 難以區分。

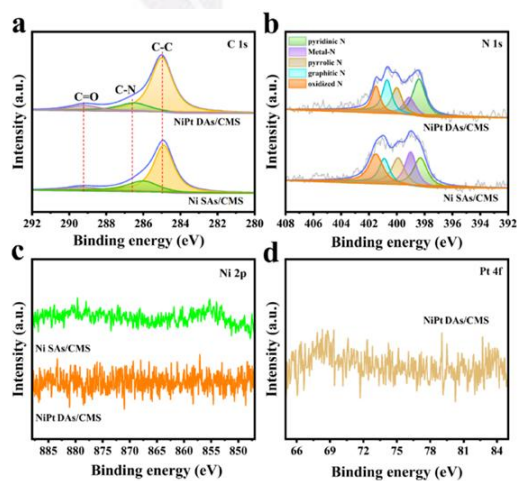


圖 10. *NiPt* DAs/CMS 和 *Ni* SAs/CMS 的 XPS 圖

3.2 電化學分析

3.2.1 *NiPt* DAs/CMS 於 1M KOH 表現

於 (a) 展現其所需電位相對於其他材料低，證明其有良好的催

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

化活性；(b)可以看出 *NiPt* DAs/CMS 在不同電流密度的情況其效能皆高於 *Ni* SAs/CMS；(c)塔弗斜率也展現其具有較小的析氫反應動力學；(d) 雖然 *Ni* SAs/CMS 電荷轉移電阻雖小於 *NiPt* DAs/CMS 但還是需要參考總體穩定性；(e) 雙層電容圖展現其電荷轉移電阻能力好；(f) 使用循環 2000 圈的活化方式，其與原先的差值不大，證明其材料穩定且具良好的氧化還原能力。

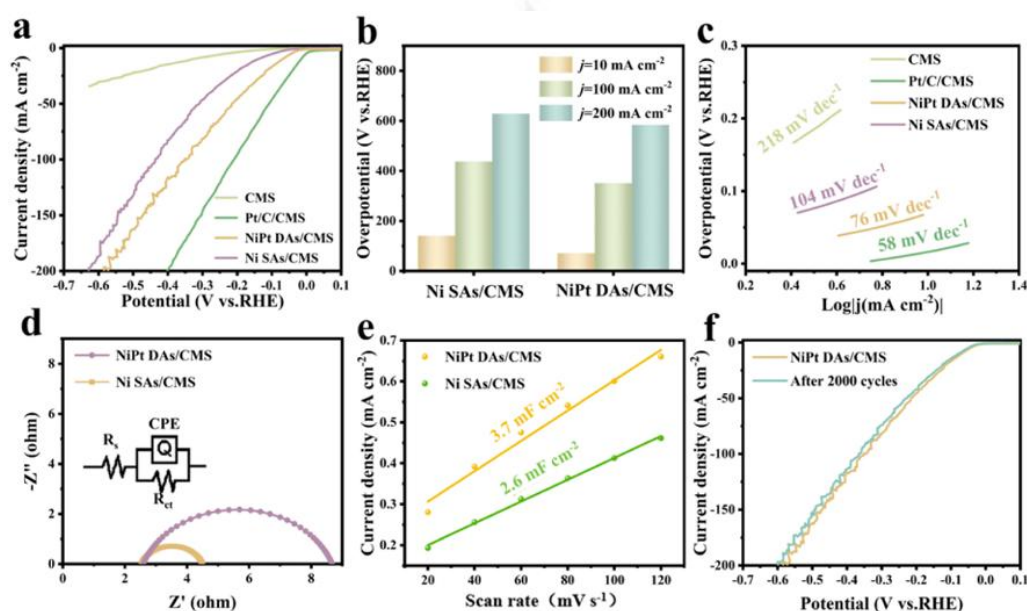


圖 11. (a) LSV (b)不同電流密度下過電位直方圖 (c)塔弗斜率 (d)奈奎斯特圖和等效電路圖 (e) C_{dl} (f) 穩定測試

3.2.2 *NiPt* DAs/CMS 於 0.5M H_2SO_4 表現

於 (a) 展現其所需電位相對於其他材料低，證明其有良好的催化活性；(b)可以看出 *NiPt* DAs/CMS 在不同電流密度的情況其效能皆高於 *Ni* SAs/CMS；(c)塔弗斜率也展現其具有較小的析氫反應動力學；(d) 在種種催化劑比較來看其電位也保持較高的水準；(e) *NiPt*

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

DAs/CMS 電荷轉移電阻很小，在溶液電子交換速率快；(f) 雙層電容圖展現其電荷轉移電阻能力好；(g) 使用循環 2000 圈的活化方式，其與原先的差值不大，證明其材料穩定且具有良好的氧化還原能力；(h) 其在電流密度為 10 mA/cm^2 和 200 mA/cm^2 皆保持 27 小時穩定電位。

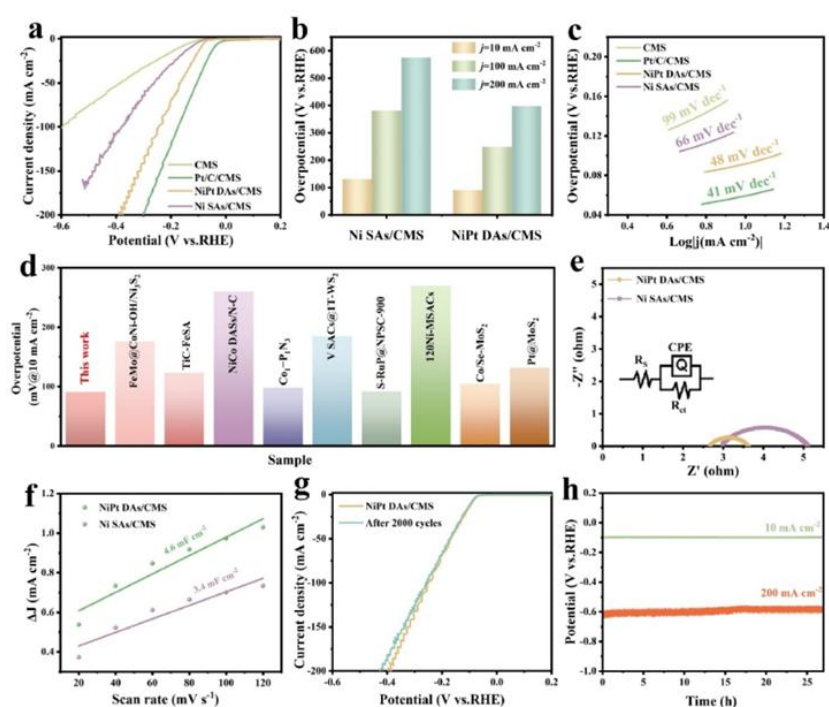


圖 12. (a) LSV (b)不同電流密度下過電位直方圖 (c)塔弗斜率 (d)不同催化劑之比較 (e)奈奎斯特圖和等效電路圖 (f) C_{dl} (g,h) 穩定測試

3.2.3 TOF

在給定溫度、壓力、反應物比率以及一定的反應程度下，單位時間內、活性位點上發生反應的次數，*NiPt* DAs/CMS 氫氣轉換頻率遠大於 *Ni SAs/CMS*。

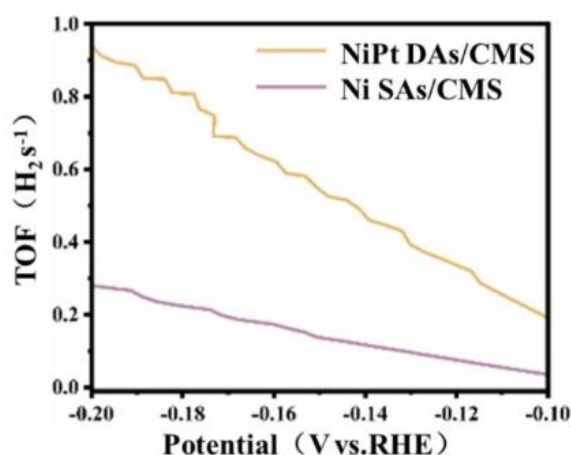


圖 13. NiPt DAs/CMS 和 Ni SAs/CMS 的 TOF 圖

4. 結論

本次研究研發出了一種摻雜少量貴金屬的雙原子金屬電催化劑，其中鎳跟鉑具有良好的協同效應於各項儀器分析皆展現其優點，於電流密度 10 mA/cm^2 的酸性和鹼性介質中分別具有 91 和 71 mV 的低過電位，對應的塔弗斜率值 48 和 76 mV/dec，在酸性介質中保持恆定的析氫過電位長達 27 小時而不衰減。實驗也使用了新型的噴墨技術進行材料的製備，展現良好的分散性跟緻密性。

未來的應用希望此類材料往商業化發展，因為目前固然有很多人開發不同種 MOF 材料，但是仍沒有被大量開發，在實驗的過程中可能就造成許多損耗，導致能源的損耗，若可以在低能耗或減少材料的使用量提升效能，則是最佳選擇！

5. 本研究的應用潛力與未來發展

本次研究主要是想解決目前綠能氫氣生產效率低、材料不穩定、成本過高的問題，從設計材料出發，搭配新穎的製程技術，實際製備出一種穩定、高效率又環境友善的雙原子電催化劑，並且成功應用於析氫反應中，這讓我覺得這個研究真的滿有未來性的。

最直接的就是研究氫能源的產氫技術。目前工業上使用的析氫電極大多依賴鉑等貴金屬，不只價格高，也存在資源匱乏的問題。本研究雖然還是用了鉑，但使用量非常少，是以 NiPt 雙原子分佈的形式存在，這樣的設計方式可以同時兼顧效能與成本，而且經過 AC HAADF-STEM 分析，也確實證實雙原子分佈均勻，代表材料利用率高。這讓我們有機會將鉑金屬從傳統「大面積塗佈」的方式轉型為「精準控制的雙原子設計」，是材料節省上非常重要的進展。材料本身是自支撐的結構，也就是說不需要另外用導電膠或其他黏著劑黏在基材上。這個特性在實際應用中其實滿重要的，因為一般使用黏著劑會把活性位點蓋住，反而讓材料性能打折扣，或在長時間電解時會脫落造成失效。但研究這邊是直接把 NiPt-MOF 噴在三聚氰胺海綿上，經過熱解後就固定成一個整體，經過 27 小時穩定性測試，電位都沒有明顯變化，表示耐久性非常高，非常適合拿來做連

使用噴墨技術用於製備 *Ni-MOF* 衍生的 *NiPt* 雙原子之自支撐電極於析氫反應

續長時間產氫反應。而在製程上，我們使用了噴墨列印技術，這對材料領域來說是相對創新的做法。傳統製備電極的方法大多是塗佈、電化學沉積，雖然成熟但很耗能，也不容易大面積製作。我們這邊用的是非接觸式、可精密控制、材料浪費極低的數位製程技術，這點對於未來要走商業化量產是非常有幫助的，因為只要優化噴墨參數，其實是有機會把整個過程做自動化，甚至直接在柔性基材上印刷，應用彈性很高。這類 *NiPt* 雙原子材料，其實除了產氫之外，也有可能應用在其他能源轉換反應上，例如：氧還原反應、氧析出反應甚至是二氧化碳還原反應。這些反應都是未來在燃料電池、鋰電池、 CO_2 轉換等領域的關鍵步驟。只要能進一步修改配體、金屬種類或調整孔洞結構，理論上這種 MOF 衍生的雙原子材料可以有很多延伸應用。也因此它不單只是「某一項技術」，更可能成為下一代催化劑設計的模板。另外也可以從永續與環境面來思考應用潛力。氫氣被視為未來乾淨能源的重要選項，能不能以低成本、低能耗的方式穩定產氫，是決定整個氫經濟能不能成功的關鍵。而我們這邊的 *NiPt* DAs/CMS 在酸性與鹼性環境下都有良好的表現，代表對電解液條件的包容度很高，這樣在面對實際水源（像是海水、工業廢水）時就不會太挑條件，能夠減少前處理或純水製備的

成本，這點對工業界來說相當關鍵。至於未來發展方向，我覺得可以從幾個面向來進一步推進：

1. 穩定性長時間測試：目前測了 27 小時沒衰退，如果能延長到幾百小時甚至幾千小時，對實際應用信心會更強，也能對商業端提供具體數據支持。
2. 貴金屬用量優化：目前是使用少量鉑，但未來可以考慮用更便宜的替代金屬，例如 Co、Fe 等，測試是否也能保持雙原子穩定分佈與協同效應。
3. 應用於不同水源：實驗目前都是使用純水或標準溶液，但工業上可能是海水、廢水等複雜來源，可以評估其抗雜質、抗腐蝕的能力。
4. 模組化與串接技術：如果未來可以將這類自支撐電極模組化、並聯起來，就能進行大規模產氫，甚至搭配太陽能電池、風電等再生能源做成完整系統。
5. 產學或業界合作：其實噴墨列印技術現在在柔性電子、感測器領域也開始使用，如果未來可以跨領域合作，將這類催化電極整合到可攜式能源模組上，會是最創新方向。

未來不僅是在材料設計上做出創新，更結合了環保意識、成本控制與製程優化，讓產氫變得更高效、更穩定，也更接近未來實際應用

的需求。雖然目前還在實驗室階段，但整體設計邏輯跟數據結果都展現出高度潛力。只要繼續優化並逐步放大應用範圍，相信未來在能源轉型與綠色製程方面，都能佔有一席之地。

6. 本篇論文的觀察與學習心得

這份研究報告對我來說，不僅僅是完成一項課業任務，更像是一段與材料科學深入對話的旅程。從最初讀文獻到設計實驗，再到實際動手操作與數據分析，我真實地感受到自己是站在學術與未來科技之間的交會點，一步步學著成為能獨立思考、實驗與反思的研究者。

起初在接觸「雙原子催化劑」這個主題時，我其實是充滿疑惑的。為什麼要選擇雙原子？和單原子相比到底有什麼實質差異？而「噴墨列印技術」又和傳統的塗佈、塗佈技術有什麼優勢？這些問題一開始像是煙霧一樣籠罩在我腦海中，但也正因為如此，我帶著更多的好奇與期待去翻閱每一篇文獻、設計每一個變因。

過程中我印象最深刻的部分是將 *NiPt-MOF* 製備成墨水後進行噴墨列印。這項技術雖然操作起來並不困難，但要達到均勻分佈與與基材良好結合，實際上需要相當多的細節控制，包含墨水濃度、噴孔大小、加熱參數等等。每一次列印都像是一場賭注，只有真正看到

SEM 或 TEM 影像那一刻，才能確認參數是否精準地轉化為理想的材料狀態。

實驗過程中，我特別有感的是穩定性的測試結果。當 *NiPt* DAs/CMS 在酸性介質下維持 27 小時電位穩定不衰減時，我幾乎感到一種成就感。因為我知道，這代表我們做出來的材料不只是在某些條件下有效，而是真的有潛力被應用到實際能源轉換的場域中。這也呼應了我選擇材料科學這個領域最初的初心——希望能夠用材料技術去改變能源未來。

透過這份研究，我重新體認了跨領域合作的重要性。這項工作中，我不僅需要了解 MOF 的化學性質，也要接觸到物理性質分析（如 XRD、TEM 等），甚至還有電化學的理論與操作（EIS、Tafel 分析等）。剛開始常常搞不清楚哪一個圖代表什麼意思，或是誤以為某個尖峰代表的是金屬而不是碳。這些錯誤雖然小，但在看過那麼多篇文獻後，我逐漸學會了如何用整體的視角看待一個材料，如何從結構、性能到應用全面去思考。

在整個研究過程中，我也不自覺地對「氫能源」這個話題產生了更深的關注。原本只是把它當作一個背景介紹的名詞，現在卻會在新聞或科技報導中，主動去追蹤各種氫氣應用的最新發展。例如各國

正在加緊建設氫燃料車的基礎建設、MOF 材料被用來做氫儲存罐、甚至連航太領域也開始研究用氫當作能源的可能性。這讓我覺得，自己做的研究也許不大，但它卻與這個世界未來可能走向有著微小卻真實的連結。

這份報告帶給我最大的收穫其實是「我變得更相信自己了」。從一開始對實驗儀器不熟、對文獻理解不透，到現在能自己寫出整套實驗流程、完成材料製備與分析，我知道我正在一步步走向更成熟的研究者。我也開始期待自己在研究所或未來的工作中，能將這份紮實的訓練延伸出去，繼續為材料、為能源、為永續做出自己的努力。

這一份專題，不只是讓我完成了一項學術挑戰，也讓我更清楚未來的方向。無論是否會繼續鑽研氫能源相關領域，我相信這段過程已經深深植入我的生命中，成為我成長歷程中最特別的一塊拼圖。

7.參考文獻

1. Li, Sha, et al. “Ni-MOF-Derived NiPt Dual Atoms Self-Supporting Electrode by Inkjet Printing for Hydrogen Evolution Reaction.” *Carbon*, vol. 235, no. 120098, 6 Feb. **2025**, pp. 120098–12009
2. Chen, Shi, et al. “Construction of Heterogeneous Core–Shell CoFeMo Polymetallic Sulfide/N-Rich Carbon Skeleton Composite Catalysts Based on Stepwise Displacement of MOF for Overall Water Splitting.” *Fuel*, vol. 365, no. 131230, June **2024**, p. 131230
3. Yao, Hong, et al. “Ni-MOF-74-Derived ZnIn₂S₄/P-Ni-MOF-74 Z-

- Scheme Heterojunctions for Highly Efficient Photocatalytic Hydrogen Evolution under Visible Light Irradiation.” *Journal of Molecular Structure*, vol. 1284, no. 135398, 20 Mar. **2023**, pp. 135398–135398
4. Alli, Ruth D., and Nader Mahinpey. “Influence of Organic Ligand and Nickel Loading on the Performance of MOF-Derived Catalysts for Dry Reforming of Methane.” *Fuel*, vol. 361, no. 130756, 30 Dec. **2023**, p. 130756
 5. Tian, Jinsen, et al. “Amorphous/Crystalline NiZr Heterojunction Nanorods for Alkaline Hydrogen Evolution Reaction Prepared by Magnetron Sputtering.” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 1013, no. 178575, 1 Jan. **2025**, pp. 178575–178575
 6. Li, Yue, et al. “Interface Regulation of Zr-MOF/Ni₂P@Nickel Foam as High-Efficient Electrocatalyst for PH-Universal Hydrogen Evolution Reaction.” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 656, no. 289–296, 21 Nov. **2023**, pp. 289–296
 7. He, Nannan, et al. “Zr-MOF/NiS₂ Hybrids on Nickel Foam as Advanced Electrocatalysts for Efficient Hydrogen Evolution.” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 640, no. 820–828, June **2023**, pp. 820–828
 8. Zaman, Neelam, et al. “Advances and Challenges of MOF Derived Carbon-Based Electrocatalysts and Photocatalyst for Water Splitting: A Review.” *Arabian Journal of Chemistry*, vol. 15, no. 7, July **2022**, p. 103906