

逢甲大學學生報告 ePaper

金屬有機框架自摻雜氮多孔碳材料用於高性能
超級電容器

Nitrogen self-doped porous carbon material derived
from metal-organic framework for high-
performance super-capacitors

作者：陳亞琪

系級：材料三甲

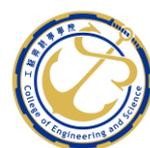
學號：D1163618

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 學年度第二學期



中文摘要

金屬有機框架 (MOF) 因為具備高比表面積、多孔結構以及可調性高等優點，在能源儲存領域中備受矚目，適合作為多孔碳材料的前驅體。本研究以 $[Zn_2(BTEC)_{0.5}(ATZ)_2(H_2O)_3] \cdot H_2O$ (簡稱 ZAB) 作為起始材料，經由熱處理碳化的方式製備出氮自摻雜的多孔碳材料 (ZABC-T)，探討不同碳化溫度對其結構與電極性能的影響。其中，ZABC-800 樣品展現出最佳性能，其比表面積高達 $1008 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ ，並且含有 4.09% 氮元素，這樣的結構有助於提升導電性與電化學性能。並且其電化學測試結果顯示，ZABC-800 在 1.0 A g^{-1} 的電流密度下擁有 316.3 F g^{-1} 的比電容，在經過 5000 次充放電循環後仍然保有 81.9% 的電容穩定性，展現良好的循環壽命與倍率性能。本研究結果顯示，ZABC-T 材料在結構設計與電化學性能方面具有明顯優勢，是具有潛力的超級電容器之電極材料候選。

關鍵字：金屬有機框架、氮自摻雜多孔碳、比電容、電化學、超級電容器

Abstract

Metal-organic frameworks (MOFs), due to their high specific surface area, porous structure, and excellent tunability, have attracted significant attention in the field of energy storage, making them suitable precursors for porous carbon materials. In this study, $[\text{Zn}_2(\text{BTEC})_{0.5}(\text{ATZ})_2(\text{H}_2\text{O})_3] \cdot \text{H}_2\text{O}$ (referred to as ZAB) was used as the starting material to synthesize nitrogen self-doped porous carbon materials (ZABC-T) via thermal carbonization. The effects of different carbonization temperatures on the structure and electrochemical performance were investigated. Among the samples, ZABC-800 exhibited the best performance, with a high specific surface area of $1008 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ and a nitrogen content of 4.09%. This structure contributes to enhanced conductivity and electrochemical behavior. Electrochemical tests revealed that ZABC-800 achieved a specific capacitance of 316.3 F g^{-1} at a current density of 1.0 A g^{-1} , and retained 81.9% of its capacitance after 5000 charge–discharge cycles, demonstrating excellent cycling stability and rate capability. These results indicate that ZABC-T materials possess significant advantages in both structural design and electrochemical performance, making them promising candidates for supercapacitor electrode materials.

Keywords: Metal–organic frameworks, nitrogen self-doped porous carbon, specific capacitance, electrochemistry, supercapacitors

目 次

1. 研究背景與現況.....	4
2. 研究構想.....	5
3. 基本理論.....	6
4. 實驗方法.....	7
5. 結果與討論.....	11
6. 本研究的應用潛力與未來發展.....	21
7. 本篇論文的觀察與學習心得.....	22
8. 結論.....	23
9. 參考資料.....	24

1. 研究背景與現況

在資訊科技快速演進的時代中，對於高效能且可靠的儲能系統的需求日益迫切，如何開發出可持續且對環境友善的高功率輸出的能源材料已成為當前領域面臨的重大挑戰之一。超級電容器為當代新興的儲能裝置，根據儲能機制可以分成擬電容器和雙電層電容器，其中，雙電層電容器因為具有快速充放電、長循環壽命、高功率密度以及安全性高等優點而受到廣泛的關注，然而其能量密度低限制了超級電容器的發展。為了提升超級電容器的性能，本研究設計具有高比表面積與多孔結構的電極材料，並且透過摻雜技術提高超級電容器的性能，如氮、磷、硫、硼等原子摻雜入碳材中，可以有效地提升電容，其中，氮摻雜碳材料中所形成的吡啶型氮與吡咯型氮，不僅有助於提升材料的潤濕性與界面反應活性，還能產生額外的擬電容。此外，氮自摻雜的多孔碳結構能夠有效縮短離子傳輸距離，進一步提升離子的遷移效率

金屬有機框架（MOF）是一種由中心金屬離子和有機配體鍵結所組成的晶體材料，MOF 作為一類多孔材料，具有許多的優異特性，包括：多樣的微觀結構、比表面積大、均勻孔徑、孔隙率高、可調孔參數以及金屬活性位點等。因此，MOF 在眾多應用領域中備

受關注，如氣體儲存與分離、催化、藥物輸送、鋰離子電池以及超級電容器等。特別是在電化學領域，MOF 作為一種二維多孔材料，展現出巨大的應用潛力，然而，MOF 本身導電性差與穩定性不足，限制其在超級電容器中的直接應用。因此，近年來越來越多研究將 MOF 作為碳材料的前驅體，透過熱處理的方式轉化為導電性與穩定性更佳的多孔碳。例如，徐等人以 MOF 為前驅體製備出比表面積高達 $2872\text{m}^2\text{g}^{-1}$ 的碳材料，並應用於超級電容器的電極中，在 0.25Ag^{-1} 下擁有 258Fg^{-1} 的比電容。孫等人則透過一步碳化 Bi-MOF-5 製備出層狀多孔碳材料，展現優異的儲能性能。此外，利用 ZIF 類 MOF 製備的多孔碳，其比表面積高達 $2159\text{m}^2\text{g}^{-1}$ ，並達成 285.8Fg^{-1} 的比電容。以 MOF 作為碳前驅體製備多孔材料具有許多優點：(a) MOF 中的有機配體常含有 N、S、P 等雜原子，即使在碳化後仍能部分保留於碳結構中，提供額外的活性位點、(b) MOF 衍生碳材料通常具有高比表面積與豐富的孔隙結構，有助於離子的快速擴散與電化學反應，進一步提升超級電容器的性能。

2. 研究構想

本研究以發展高性能、具永續潛力的電極材料為目標，針對當前超級電容器面臨的能量密度不足問題，嘗試引入結構可調性高的

金屬有機框架作為前驅體，製備兼具高比表面積與導電性的多孔碳材料。MOF 因其金屬節點與有機配體可組裝出多樣結構，不僅具備高度孔隙率，更具有良好的原子級均勻性與摻雜潛力，特別適合作為碳材料模板進行微結構控制。

我們利用水熱合成法成功製備出新型 MOF 材料 $[Zn_2(BTEC)_{0.5}(ATZ)_2(H_2O)_3] \cdot H_2O$ ，不僅具有穩定性高的骨架結構，更含有豐富的氮源，有利於後續進行自摻雜碳化處理。接著透過簡單的碳化方法，於不同溫度條件（600–900°C）下合成出氮自摻雜之多孔碳材料（ZABC），此外，於 6 M KOH 電解液的三電極系統中，探討不同碳化溫度對電極材料電化學特性的影響，進一步評估其在儲能電極應用上的適用性與性能表現。

3. 基本理論

超級電容器是一種介於一般電容和電池之間的儲能設備，它的優點是充放電速度快、輸出功率大，還有很長的壽命。根據不同的儲能方式，大致可以分成兩種機制：一種是靠電解質裡的離子在電極表面堆積，形成一層靜電界面，這叫做「電雙層電容」；另一種是電極材料和電解液中的離子發生氧化還原反應，也就是所謂的「擬電容」。前者主要是一種物理性的儲能過程，優點是反應快、穩定性

高，但缺點是能量密度有限。後者雖然涉及電子轉移反應，但可以儲存更多電荷，因此比電容和能量密度通常比較高。

要讓超級電容器表現好，關鍵在於使用怎樣的材料當電極。像碳材料因為有很大的比表面積和良好的導電性，是常見的選擇。尤其是從金屬有機框架衍生出來的碳材料，因為它本身就有多孔結構，碳化後還能保留這些特性，甚至還能自帶氮摻雜，讓材料在導電性和反應活性上表現更好。接著，材料的孔洞大小也很重要。微孔可以存電荷，介孔可以讓離子快速跑進跑出，大孔則幫助電解液更容易進入整個電極。這些結構特性搭配起來，能讓材料不管是在儲能效率、反應速度還是壽命都表現得不錯。

總結來說，如果能把 MOF 的優點轉移到碳材料上，再搭配適當的碳化條件，就能做出一種同時具有雙電層和擬電容行為的材料，應用於超級電容器上是很有潛力的方向。

4. 實驗方法

4-1 實驗材料

本研究所使用的 1,2,4,5-苯四甲酸、六水硝酸鋅 ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 及 5-氨基-1H-四唑均購自阿拉丁實業有限公司。

二甲基甲醯胺 (DMF) 則由中國廣福化學試劑有限公司提供。所有化學試劑均為原樣使用，使用前未經進一步純化處理。

4-2 合成 $[\text{Zn}_2(\text{BTEC})_{0.5}(\text{ATZ})_2(\text{H}_2\text{O})_3]\cdot\text{H}_2\text{O}$

將 5-氨基-1H-四唑 (0.136 g)、六水硝酸鋅 ($\text{Zn}(\text{NO}_3)_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 0.4768 g) 與 1,2,4,5-苯四甲酸 (0.2 g) 溶解於 16 mL 二甲基甲醯胺 (DMF) 與 32 mL 去離子水中，以合成金屬有機框架 ZAB。將溶液移至高壓水熱反應釜，並在 100 °C 下反應 72 小時，反應結束後冷卻至室溫，並從母液中分離出產物白色晶體。所得晶體以去離子水洗滌三次以去除雜質，隨後置於真空乾燥箱中乾燥 12 小時，最終得到的白色晶體，其化學式為 $[\text{Zn}_2(\text{BTEC})_{0.5}(\text{ATZ})_2(\text{H}_2\text{O})_3]\cdot\text{H}_2\text{O}$ ，其中 BTEC 為 1,2,4,5-苯四甲酸 (H_4BTEC)，ATZ 為 5-氨基-1H-四唑。

4-3 製備氮自摻雜多孔碳

ZAB 晶體樣品在管式爐中於不同溫度下進行直接碳化處理，以升溫速率每分鐘三度升溫至 600 °C、700 °C、800 °C 及 900 °C，並在氫氣氣氛下恆溫保持 2 小時 (如圖 1 所示)，碳化後所得樣品依序以 1M 鹽酸與去離子水清洗至溶液 pH 值約為 7，以去除殘留無機物，隨後置於 60 °C 真空乾燥箱中乾燥 12 小時，根據碳化處理所使用的溫度，最終所得氮自摻雜多孔碳材料分別命名為 ZABC-600、ZABC-700、ZABC-800 及 ZABC-900。

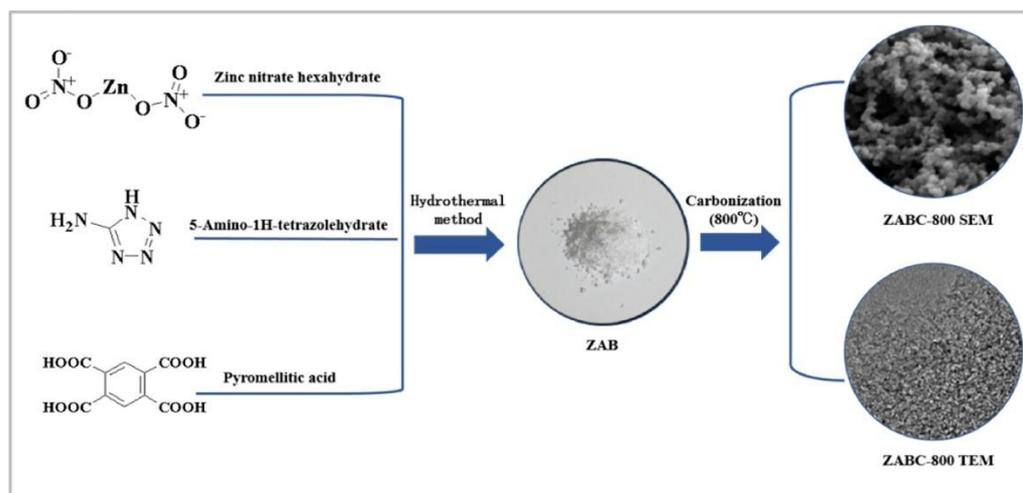


圖 1. 製備氮自摻雜多孔碳 ZABC-T

4-4 結構和性能的分析

A. X 射線繞射儀 (XRD):

為了分析 ZAB 前驅體與不同碳化溫度下所得 ZABC-T 材料的結晶結構，測試條件為：工作電流 300 mA、工作電壓 40 kV，使用 Cu K α 輻射源，掃描範圍為 10–90°，掃描速率為 15°/min。

B. 熱重分析 (TGA):

對 ZAB 晶體進行熱穩定性評估，樣品在通氮氣的管式爐中以特定升溫速率加熱至 1000°C，記錄其重量損失行為，藉此分析碳化過程中有機物的分解階段及最適碳化溫度。

C. 拉曼光譜:

對 ZABC-T 材料進行結構分析，重點觀察其石墨化程度與缺陷情形。主要觀測 D 帶 (約 1350 cm⁻¹) 與 G 帶 (約 1580 cm⁻¹) 的位

置與相對強度，評估碳材的有序程度及缺陷比例。

D. SEM、TEM：

觀察材料的表面形貌與微觀結構，SEM 可提供材料的表面形態、粒徑分布與孔洞結構，而 TEM 則進一步解析碳結構的層次性、孔道分布與摻雜原子的均勻程度。

E. X 射線光電子能譜 (XPS)：

用以分析元素鍵結型態與表面化學組成。透過高解析掃描可辨別 C 1s、O 1s、N 1s 的化學狀態，評估其對電化學性能的影響。

F. 氮氣吸附-脫附等溫線 (BET)：

測得材料的比表面積與孔結構性質，並以 BET 方法計算相對壓力介於 0.06~0.2 的氮吸附數據以求得比表面積。

4-5 電化學測量

工作電極的製備方法如下：將 80wt% 的 ZABC-T (3 mg)、15 wt% 的乙炔黑與 5wt% 的聚四氟乙烯黏合劑充分混合，形成均勻的漿料。隨後，將漿料均勻塗佈於尺寸為 1 cm × 1 cm 的發泡鎳上，並在 80 °C 的真空條件下乾燥 24 小時。乾燥後的電極進一步在 15 MPa 壓力下壓約 1.5 分鐘，以提升接觸穩定性與機械強度。所有電化學性能測試均採用 CHI660C 電化學工作站並配合三電極系統進行。其

中，發泡鎳負載的 ZABC-T 為工作電極，Ag/AgCl 為參考電極，鉑片為對電極。測試於 6 M KOH 水溶液中進行，所進行的測試包括循環伏安法 (CV)、恆電流充放電 (GCD) 及電化學阻抗譜 (EIS)，以了解材料的儲能性能。

5. 結果與討論

為了確認所合成的 ZAB 晶體結構，透過 XRD 進行分析，結果如圖 2 (a) 所示，在 11.3° 、 15.54° 、 23.11° 和 27.55° 處出現尖銳且明顯的繞射峰，顯示其具有良好的結晶性，這些峰值的位置與參考文獻一致，證明本研究的 MOF 已被成功合成，並且結晶性高。使用 TGA 在氮氣下從 25°C 升溫至 1000°C 評估 ZAB 的熱穩定性，結果如圖 2 (b) 所示，TGA 曲線呈現重量損失分成了三個階段：第一階段為室溫至 126.5°C ，重量損失約 9.8 wt%，可歸因於殘留溶劑或結晶水的蒸發；第二階段發生於 386.0°C 至 696.2°C ，重量損失達 36.7 wt.%，對應於 ZAB 骨架的崩塌以及配體分解所產生的二氧化碳和水的溢出；第三階段在 696.2°C 至 901.4°C 間，重量損失 29 wt.%，這是因為碳與氧化鋅之間產生還原反應，生成金屬鋅和二氧化碳。隨著溫度超過 900°C ，金屬鋅氣化並在氮氣氛下逸出，留下多孔碳結

構。這結果表明，ZAB 可以經過熱解直接轉化為多孔碳材料，具潛力應用於高溫環境下的儲能裝置。

此外，為了確認 ZAB 的官能基與化學結構，進行 FTIR 分析，如圖 2 (c) 所示，在 3330 cm^{-1} 處觀察到明顯的吸收峰，對應於 -NH 基團的伸縮振動。位於 1600 cm^{-1} 、 1370 cm^{-1} 和 823 cm^{-1} 的特徵峰，則分別對應於羧酸官能基中的 C=O 、 C-O 與 O-H 的伸縮振動，進一步證實有機配體的存在與完整結構。

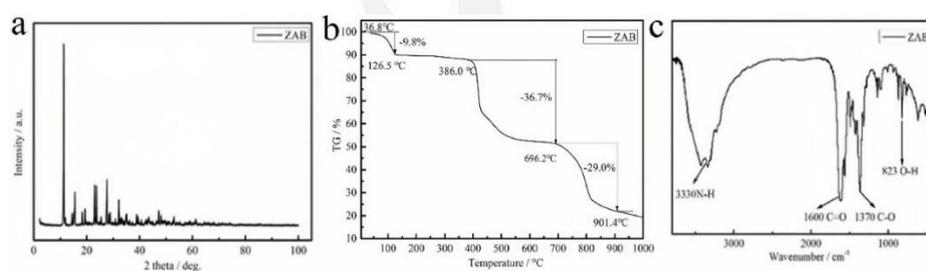


圖 2. ZAB 的 (a) XRD 圖 (b) TGA 曲線 (c) FTIR

為了探討 ZABC-T 的結構變化，進行了 XRD 分析，結果如圖 3 所示。可以觀察到在約 $2\theta = 24.3^\circ$ 處出現一個寬而明顯的繞射峰，這對應於石墨的 (002) 晶面，相較於標準石墨的 (002) 特徵衍射峰位置 ($2\theta = 26.6^\circ$)，ZABC-T 的衍射峰明顯向低角度偏移，顯示其層間距較大。這種峰位偏移可歸因於氮原子的摻雜效應。氮摻雜會導致碳材料的晶格產生畸變，使石墨層之間的距離擴大，形成無序層狀結構。此結構變化不僅證實了材料在碳化過程中具一定程度

的石墨化，有利於電解質離子在電極材料中的快速擴散且提升離子傳輸速率，進而增強其在超級電容器中的電化學性能。

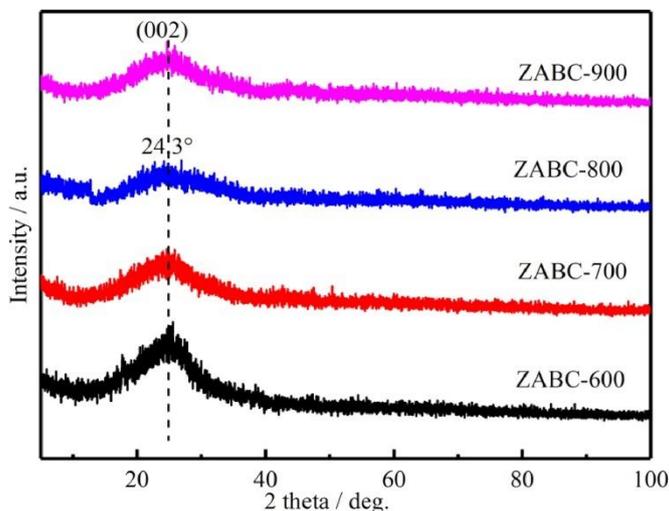


圖 3. 自摻雜氮多孔碳 ZABC-T 的 XRD 圖

本研究也進行了拉曼光譜分析，如圖 4 所示，光譜中可明顯觀察到兩個特徵性峰值，分別為 D 帶（位於約 $1300\text{--}1500\text{ cm}^{-1}$ ）與 G 帶（位於約 $1550\text{--}1620\text{ cm}^{-1}$ ）。其中，D 帶通常與碳材料中無序結構或缺陷相關，源自於 sp^2 碳原子雙共振過程；而 G 帶則對應於 sp^2 碳原子的 E_{2g} 模式，是石墨碳相的特徵訊號。D 與 G 帶的相對強度比 (I_{D}/I_{G}) 被廣泛用作評估碳材料無序程度與石墨化程度的指標。本研究中，ZABC-600、ZABC-700、ZABC-800 與 ZABC-900 的 I_{D}/I_{G} 比值分別為 1.345、1.339、1.329 和 1.301。整體而言，ZABC-T 材料仍表現出高度無序的碳結構，這與前述 XRD 結果一致。無序結構有助於提升材料的比表面積與活性位點，從而增進其在電化學儲能應用中的性能表現。

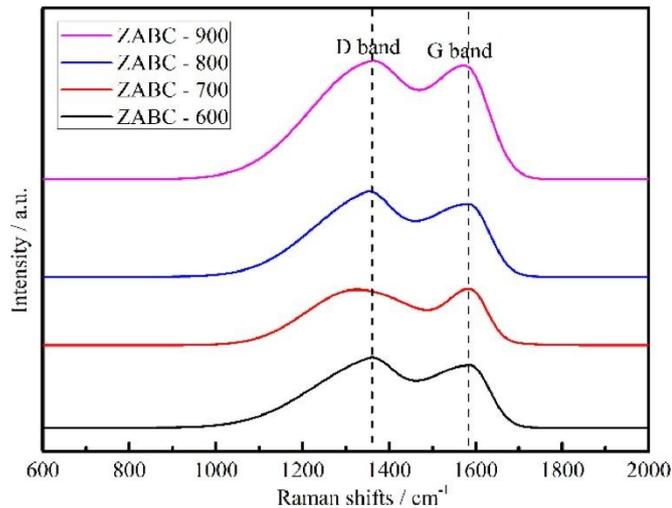


圖 4. 自摻雜氮多孔碳 ZABC-T 之拉曼光譜

利用 SEM 和 TEM 觀察分析 ZABC-800 的表面形貌，從 SEM 圖中（圖 5 a、b）可見，ZABC-800 由表面光滑的球形奈米顆粒組成，彼此堆疊形成具備微孔、介孔與大孔的三維網狀多孔結構。這樣的形貌特徵具有較高的比表面積與較大的孔體積，有助於提升電解液的擴散與離子傳輸效率。進一步的透過 TEM 觀察（圖 5 c、d），可以更清楚地看出 ZABC-800 的孔洞分布與局部結構，TEM 結果顯示材料內部具有明顯的多孔結構，邊緣區域也呈現出一定程度的石墨化排列，顯示材料具備局部無序層狀結構。這種結構不僅有利於提升電子的傳導性，同時也促進電荷在材料內部的快速傳輸，進而增強其在超級電容器應用中的電化學表現。

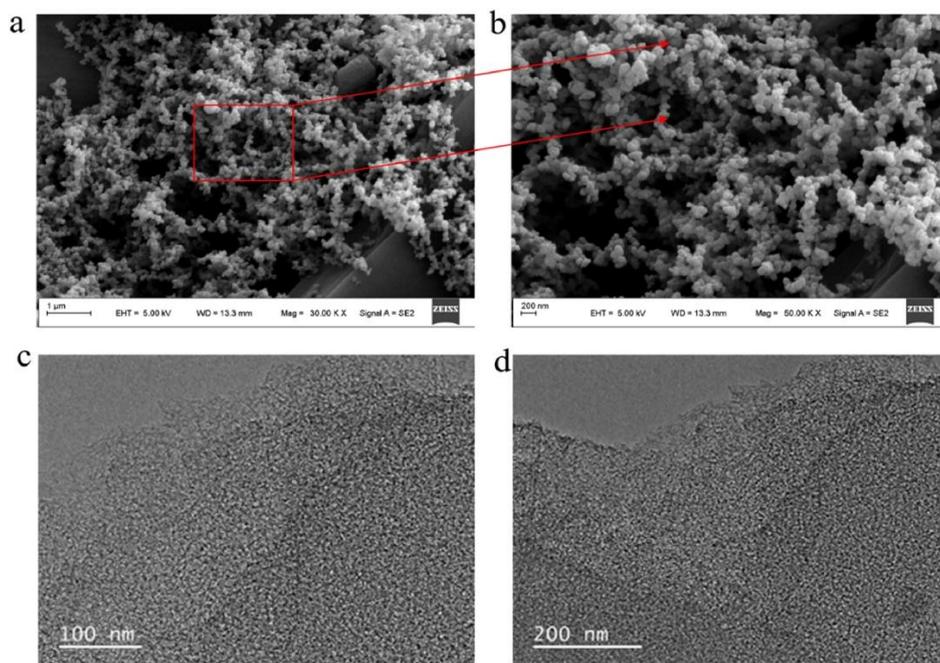


圖 5. 自摻雜氮多孔碳 ZABC-800 的 (a) (b) SEM 圖 (c) (d) TEM 圖

透過 BET 分析來測量 ZABC-T 材料的比表面積和孔徑分佈 (圖 6)。從氮氣的吸附/脫附等溫線來看，ZABC-T 顯示出典型的 IV 型曲線，這代表它具有介孔結構的特性，當相對壓力 (P/P_0) 小於 0.01 時，氮氣吸附行為主要是由材料中的微孔所貢獻；而在 P/P_0 位於 0.45 到 0.85 的範圍內時，ZABC-800 的氮氣吸附量明顯高於其他樣品，此外，當相對壓力接近 1 時，ZABC-800 的吸附量又再次明顯上升，這顯示其內部還存在著相當多的大孔結構。綜合來看，ZABC-800 具有豐富的微孔、介孔與大孔結構，對於提升電化學性能是很有幫助的。從圖 6(b) 中的孔徑分佈圖也可以看出，ZABC-900 的孔徑分佈比 ZABC-800 向左偏移，這表示在更高碳化溫度

下，其部分大孔可能已經坍塌或消失，造成整體孔隙變小。

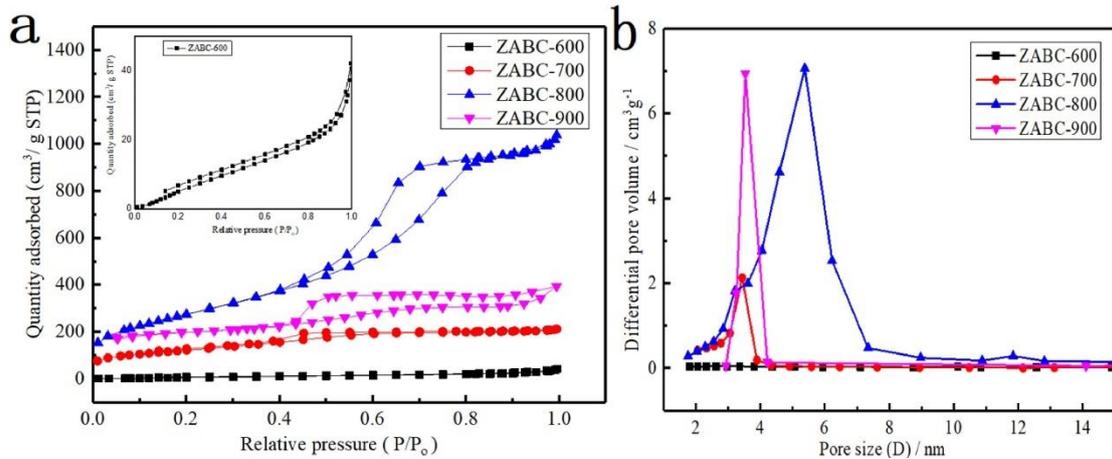


圖 6. (a) N₂ 吸附/解吸曲線 (b) 自摻雜氮多孔碳 ZABC-T 的孔径分佈曲線。

為了深入了解 ZABC-T 材料的表面化學性質與功能基團分佈，我們進行了 XPS 分析，從圖 7 (a) 全能譜圖可以觀察到明顯的 C1s、N1s 與 O1s 峰，證實其表面含有碳、氮和氧等主要元素。在不同碳化溫度下樣品的 N 原子百分比有明顯變化。以 ZABC-600 為例，其 N 原子含量為 6.24%，而隨著碳化溫度升高，N 含量逐漸降低，分別為 ZABC-700 的 5.32%、ZABC-800 的 4.09%、以及 ZABC-900 的 3.49%，說明在高溫下，氮元素逐漸從碳骨架中逸出，由於前驅物 ZAB 含有豐富的氮元素，因此透過簡易碳化過程即可導入氮至碳材料中，實現自摻雜。

以 ZABC-800 為例，其 C1s 光譜如圖 7 (b) 所示，分別對應石墨碳 (284.6 eV)、C-C/C-N (285.1 eV) 及 C-O 結構 (286.4 eV)。N1s 光譜如圖 7 (c) 可分為四個鍵結形式：吡啶氮 (398.5

eV)、吡咯氮 (400.1 eV)、季氮 (401.0 eV) 與氧化吡啶氮 (402.1 eV)。其中，吡咯型氮 (N-5) 所帶的孤對電子可加強電解質與電極間的電子交換，並提升材料的親液性。O1s 光譜如圖 7 (d) 顯示三個訊號，分別與酯類及羧酸類中的 C=O 和 C-O 鍵有關 (對應於 531.5 eV、532.6 eV 與 533.5 eV)。ZABC-T 展現出優異的表面特性，適合作為超級電容電極材料。

圖 8 (a) 展示了在不同碳化溫度下製備的 ZABC-T 材料於 1 A g^{-1} 電流密度下的充放電曲線，碳材料中氮原子的自摻雜可以產生明顯的擬電容效應，導致放電曲線呈現非對稱等腰三角形的形貌，並在尾段呈現微幅下降的趨勢。根據這些 GCD 曲線進一步計算的比電容如圖 8 (b) 所示。從圖 8 (c) 可觀察不同樣品於 10 mV s^{-1} 的掃描速率下進行循環伏安曲線。整體曲線並非理想的矩形，顯示其電化學儲能機制中同時包含雙電層電容與擬電容反應，曲線當中可見微弱的氧化還原峰，這被歸因於材料中殘留的含氧與含氮官能基團，這些官能基能參與可逆氧化還原反應，進而提升總電容性能。

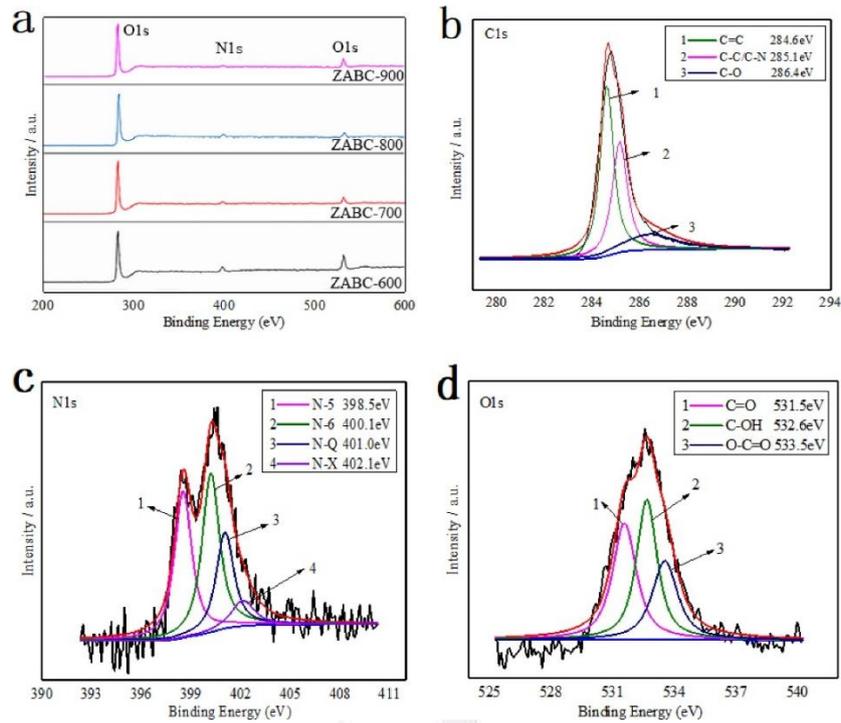


圖 7. (a) ZABC-T 的 XPS 全能譜圖、ZABC-800 的 (b) C1s (c) N1s (d) O1s

特別是吡咯型與吡啶型氮原子，在反應中可各接受一個電子與一個質子，形成與質子傳遞的偽電容。綜合所有 CV 曲線，ZABC-800 所對應的積分面積最大，說明其擁有最高的比電容表現。在不同溫度下碳化所得的 ZABC-T 材料中，800 °C 所製得樣品展現出最佳的電化學表現，推測此溫度能提供較理想的孔隙結構、合適的無序程度、較高的氮含量與最大化的比表面積。

進一步從 Nyquist 圖觀察各樣品的阻抗行為，如圖 8 (d) 所示，於低頻區段可見 ZABC-T 材料的阻抗曲線接近垂直，顯示其具有良好的理想電容性。其中，ZABC-700、ZABC-800、ZABC-900 的阻抗線幾乎垂直於 X 軸，而 ZABC-600 則偏離明顯，顯示其導電性

較弱，在高頻區段，曲線與 X 軸的交點代表等效串聯電阻 (ESR)，ZABC-800 的 ESR 僅為 0.73Ω ，明顯低於 ZABC-600 (0.97Ω)、ZABC-700 (0.83Ω) 與 ZABC-900 (0.9Ω)。因此綜合來看，ZABC-800 不僅擁有最低的內阻，同時具備最優異的比電容，為理想的超級電容材料。

為了更準確地評估 ZABC-800 的比電容表現，進一步測量了其在不同電流密度下的 GCD 曲線。如圖 9 (a) 所示，當電流密度為 1 A g^{-1} 時，ZABC-800 展現出最高的比電容，達到 316.3 F g^{-1} ，隨著電流密度提升至 10 A g^{-1} ，比電容下降至 213.0 F g^{-1} ，約為低電流密度下容量的 67.34% (圖 9 (b))，此現象主要可歸因於較高電流下電解質離子無法充分擴散至材料內部的微孔與中孔結構，使得擬電容反應無法完全發揮。圖 9 (c) 顯示 ZABC-800 在不同掃描速率下的 CV 曲線。儘管改變掃描的速率高低，曲線仍然保有良好形狀，顯示其電化學反應具備良好的可逆性及穩定性。此外，ZABC-800 在 1 A g^{-1} 條件下經歷 5000 次充放電循環後，仍保有 81.90% 的初始電容，如圖 9 (d) 所示，反映其優異的循環穩定性。ZABC-800 優越的電化學性能可歸因於其獨特的多孔結構，高比表面積以及材料中所含的氧與氮官能基，這些特性共同促進了電荷儲存與電解質離子的傳輸效率。

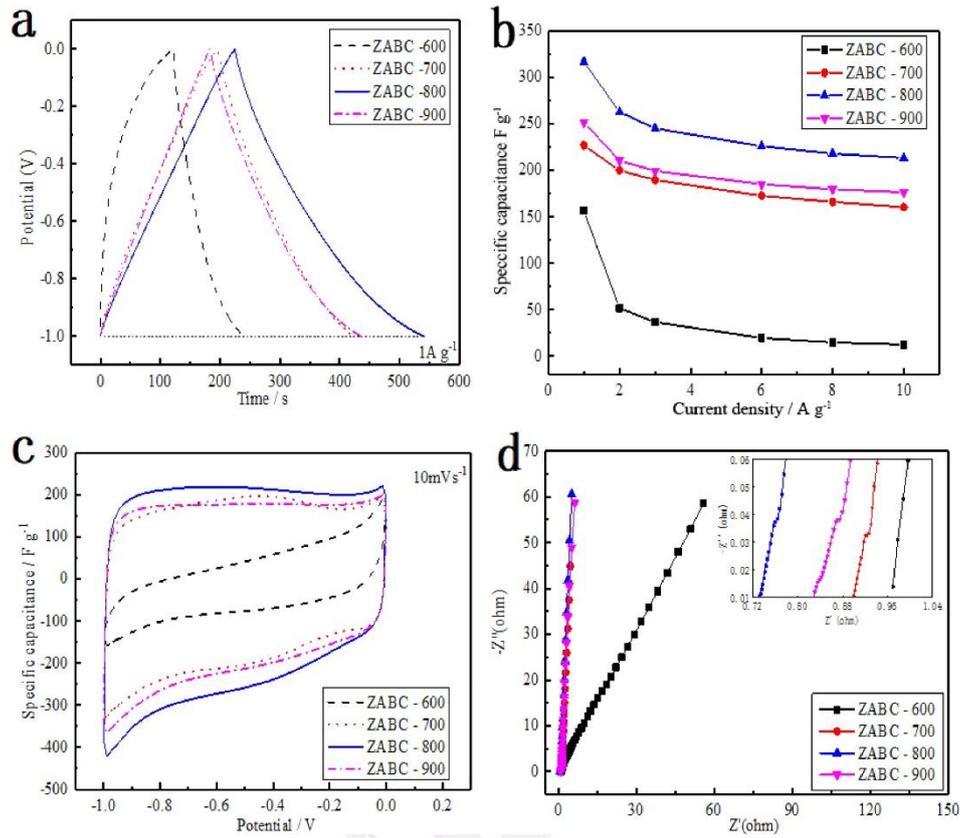


圖 8. 自摻雜氮多孔碳 ZABC-T 的電化學性能測試 (a) GCD 曲線 (b) 基於 GCD 計算的比電容；(c) CV 曲線 (d) 奈奎斯特圖

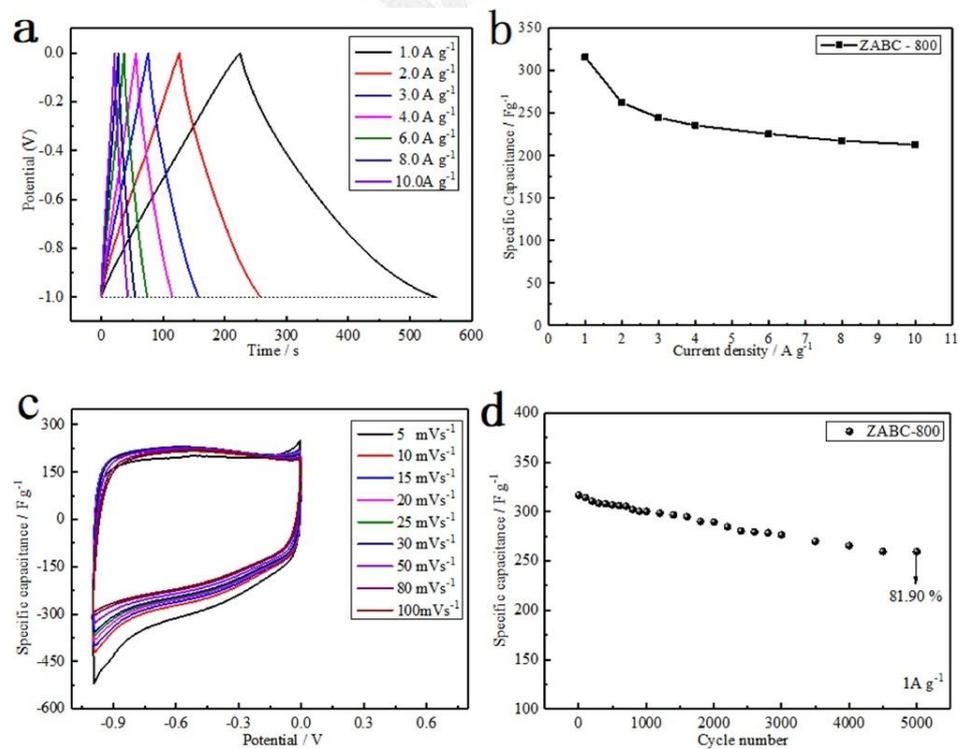


圖 9. ZABC-800 的電化學測試：(a) 不同電流密度下的 GCD 曲線

- (b) 基於 GCD 曲線的比電容
- (c) 不同掃描速率下的 CV 曲線
- (d) 循環穩定性。

6. 本研究的應用潛力與未來發展

金屬有機框架材料因為具有高度的可調性、高比表面積與可摻雜性，近年來已被廣泛應用於各種能源相關的儲能裝置中，例如超級電容器、鋰離子電池、鈉離子電池等，透過適當的碳化與摻雜處理，MOF 不僅可轉化為導電性良好的多孔碳材料，還能引入如氮、硫等功能性元素，提高其導電性與反應活性。此外，MOF 獨特的骨架結構亦有助於控制碳材料的孔徑與微觀形貌，是發展次世代儲能材料的重要路徑之一。

應用方面，ZABC 材料在本研究中展現的高功率密度、快速充放電特性與良好的循環穩定性，使其不僅適用於便攜式電子設備，也具備擴展至大型儲能系統與再生能源裝置（如風力或太陽能能量儲存）的潛力。

未來的研究方向可朝以下幾個面向進行：第一，透過 MOF 前驅體的設計改良，例如引入雙金屬節點或功能性有機配體，進一步優化碳化後的微觀結構與摻雜行為。第二，可以嘗試與其他材料（如石墨烯、碳奈米管）複合，或進行多元素共摻雜設計，以強化

導電性與表面活性。第三，建議導入雙電極系統進行實際裝置測試，進一步評估其能量密度、功率密度與循環壽命等應用層面的表現，為將來商品化鋪路。

7. 本篇論文的觀察與學習心得

由於我自己的專題實驗也是利用 MOF 經過高溫碳化後，應用在超級電容器的電極材料上，因此在閱讀這篇相關研究的過程中，有很多內容讓我感到既熟悉又有收穫。尤其是看到研究者除了使用 MOF 作為碳前驅體之外，還進一步加入「摻雜」的概念，例如氮元素的自摻雜，來提升碳材料的導電性與電化學活性，這部分讓我有新的想法，也補足了我在設計實驗時沒有特別深入考慮的方向。另外我也學習到了儀器分析在材料研究中的重要性。像是使用 BET 分析比表面積，能幫助我們評估材料提供多少有效的儲能面積；TGA 則能觀察材料在加熱過程中的重量變化，進一步判斷前驅體的穩定性與碳化行為。這些工具不只是操作儀器而已，而是能幫助我們從數據中去理解材料的結構與性質，這點讓我印象很深。

這篇文章讓我知道，做材料不只是「把東西做出來」，而是要從結構設計、製程參數、分析結果到性能測試，每個環節都要有邏輯、有目的地去設計和判斷。未來如果有機會繼續做研究，我希望

不只是製作材料，也能在分析與應用上更進一步，讓研究成果更完整也更有實際價值。

8. 結論

本研究採用直接碳化法將合成所得的 ZABC 材料轉化為氮自摻雜多孔碳，成功製備出具有優異性能的電極材料。該材料具備高比表面積 ($1008 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) 與適度的氮含量 (4.09%)，為其良好的電化學表現奠定基礎。ZABC-800 電極於 1 A g^{-1} 電流密度下展現出 316.3 F g^{-1} 的高比電容，並於經過 5000 次充放電循環後仍保有 81.90% 的容量，證明其具備出色的循環穩定性。此外，本研究亦凸顯金屬有機框架 (MOF) 作為前驅體的潛力，其所衍生出的碳材料不僅具有可調控的孔結構與均勻的孔徑分布，亦展現高孔隙率與多樣的微觀結構，為開發次世代高效能超級電容器電極材料提供了可行的方向與應用潛力。

9. 參考資料

- [1]Zhang, D., Wang, J., Wang, Q., Huang, S., Feng, H., & Luo, H. (2019). Nitrogen self-doped porous carbon material derived from metal-organic framework for high-performance supercapacitors. *Journal of Energy Storage*, 25, 100904.
- [2]Li, H., Huang, Y., Zhang, Y., Wang, X., Hu, F., You, J., & Zhu, K. (2025). NaCl-confined strategy boost charge storage capability of carbon materials for Zn-ion hybrid capacitors. *Carbon*, 232, 119818.
- [3]Liang, S., Wang, G., Dong, L., Yang, X., Zhou, B., Duan, Z., ... & Hu, Y. (2025). NiCo-MOFs derived carbon matrix composites: A promising electrode construction for high-performance supercapacitors. *Applied Surface Science*, 681, 161602.
- [4]Elgrishi, N., Rountree, K. J., McCarthy, B. D., Rountree, E. S., Eisenhart, T. T., & Dempsey, J. L. (2018). A practical beginner's guide to cyclic voltammetry. *Journal of chemical education*, 95(2), 197-206.
- [5]Zheng, J., Solomon, M. B., Rawal, A., Chi, Y., Yu, R., Liu, L., ... & Kalantar-Zadeh, K. (2023). Passivation-Free, Liquid-Metal-Based Electrosynthesis of Aluminum Metal–Organic Frameworks Mediated by Light Metal Activation. *ACS nano*, 17(24), 25532-25541.
- [6]Salunkhe, A. D., Pawar, P. S., Pagare, P. K., Kadam, A. N., Katkar, P. K., & Torane, A. P. (2023). MOF derived NiCo₂O₄ nanosheets for high performance asymmetric supercapacitor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 939, 117475. supercapacitor. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 939, 117475.