

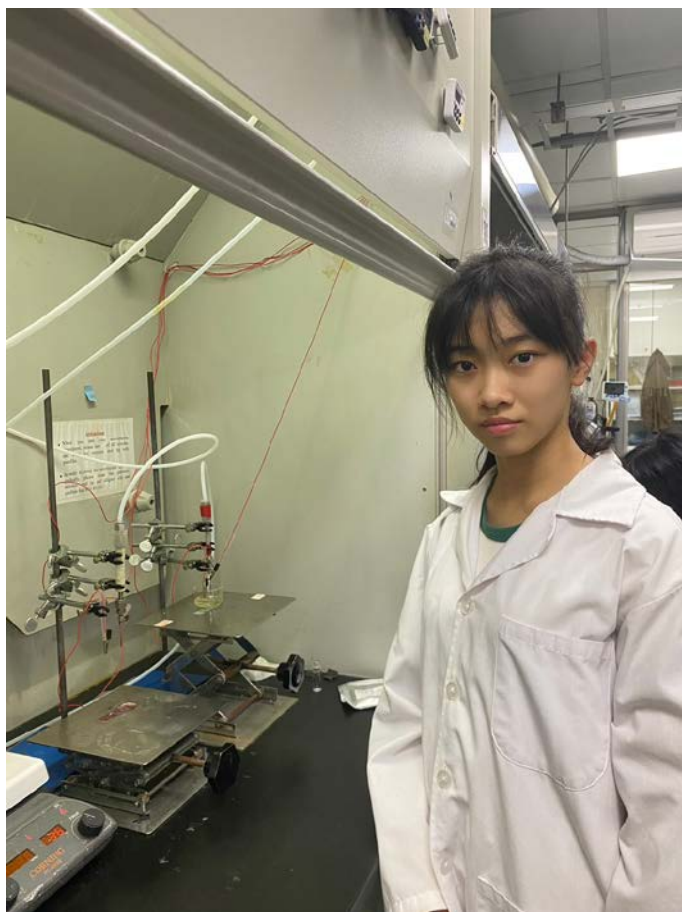
2025年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號	180023
參展科別	地球與環境科學
作品名稱	大氣常壓微電漿合成共價有機框架應用於光催化降解汙染物

就讀學校	國立員林高級中學
指導教師	江偉宏 陳芳君
作者姓名	陳玟錡

關鍵詞	<u>大氣常壓微電漿、共價有機框架、光催化降解</u>
-----	-----------------------------

作者簡介



大家好，我是陳玟錡，目前就讀於彰化縣員林高中的二年級。我的主題是研究共價有機框架在水污染處理中的應用，發現這種材料對改善水質有著顯著的效果，使我深感興趣，也期許這能為地球環境保護貢獻一份力量。

2025 年臺灣國際科學展覽會

研究報告

區別： 中區

科別：地球與環境科學科

作品名稱：大氣常壓微電漿合成共價有機框架應用於光
催化降解汙染物

關鍵詞：大氣常壓微電漿、共價有機框架、光催化降解

編號：180023

摘要

為了解決水污染問題，本研究探討共價有機框架（COF）作為光催化劑的應用。COF 具備高度可調孔洞、高穩定性及選擇性吸附等優勢，有助於有效去除水中污染物，對未來具有前景。本實驗採用大氣常壓微電漿合成 COF，此方法能在室溫下以水為溶劑，無需高溫或有毒化學品，並僅需一小時即可完成合成，具有綠色化學優勢。實驗結果顯示，成功合成的 COF 能有效降解水中常見染料污染物（結晶紫及亞甲藍），證明了 COF 的高效光催化性。在紫外-可見光光譜中，隨著光催化反應的進行，染劑吸收波峰顯著減弱並幾乎完全褪色，確認了 COF 優異的降解能力。掃描電子顯微鏡圖像顯示，COF 的高度有序孔洞結構提升了其催化活性與穩定性。這項技術不僅能高效處理水中有機污染物，還具備廣泛應用潛力，有望為全球水污染治理與環保提供新思路。

Abstract

This study investigates the use of covalent organic frameworks (COFs) as photocatalysts to tackle water pollution. COFs, known for their adjustable porosity, robust stability, and selective adsorption, are particularly effective in removing contaminants from water, showing significant promise for applications of environmental science. The experiment applied atmospheric-pressure microplasma to synthesize COFs—a green chemistry technique that enables synthesis at room temperature using water as a solvent, avoiding the need for high temperatures or harmful chemicals, and completing the process within one hour. Our results showed that the synthesized COFs can effectively degrade common dye pollutants, such as crystal violet and methylene blue, exhibiting high photocatalytic efficiency. UV-visible spectroscopy data revealed that the main absorbance peaks of these dyes diminish and nearly vanish as the photocatalytic reaction proceeds, affirming the COFs' strong degradation abilities. The images from scanning electron microscopy highlight the COFs' ordered porous structure, which contributes to their catalytic effectiveness and stability. In conclusion, our proposed approach not only provides a powerful solution for treating organic pollutants in water but also presents vast potential for environmental protection and water pollution control on a global scale.

壹、前言

一、研究動機

全球污染問題日益嚴重，水質受到藥物殘留、農藥和工業污染的影響，成為不可忽視的危機。據統計，全球有7.03億人無法取得乾淨的飲用水，每天約有1000名5歲以下的兒童死於水污染及惡劣衛生環境引發的疾病。這些數據反映了人類對環境的不良影響，以及我們不容忽視的環境議題。

因此，我研究共價有機框架 (COF)，這是具有高度可調結構和功能材料，並能精確捕捉並分解水中的有害物質。共價有機框架擁有結構穩定、高比表面積、可調節孔洞大小的延展晶體有機材料，這種材料的獨特性在於其能夠針對不同的污染物進行調整，從而達到最佳的淨化效果。

水與人類生活密切相關，乾淨水源的稀缺成為我們必須面對的嚴峻挑戰。隨著污染的日益加劇，找到有效的解決方案變得尤為重要。希望通過對共價有機框架的研究，能夠為解決水污染問題貢獻力量，讓更多人能夠享有乾淨的飲用水，改善全球的衛生環境。

二、研究目的

(一)、探討光催化方式對有機染料降解：利用大氣微電漿合成的共價有機框架在光催化降解有機染料中的作用。

(二)、COF為孔洞結構：展示COF如何將有毒染劑轉化為無毒物質，強調COF在減少環境污染方面的潛力。

三、 文獻回顧

藉由查閱相關文獻資料，對合成共價有機框架 (COF) 的方法進行比較:

(一)、溶劑熱合成

1. 在封閉容器中，以高溫高壓溶解材料
2. 通常需要 2 至 9 天
3. 最常用的 COF 合成方法之一
4. 冷卻後收集沉澱物，進行清洗並在真空下乾燥

(二)、微波合成

1. 利用微波加熱加速反應速率，與傳統加熱方法相比，產率更高且產品更純淨
2. 其顯著優勢是反應時間更短且節省能源，但僅適用於極性溶劑(具有明顯電荷分佈不均的溶劑)有較好的加熱效果
3. 並非所有的反應物和溶劑都適合微波合成，有些材料可能對微波不敏感，限制了其應用範圍。

(三)、離子熱合成

1. 使用熔鹽或離子液體創造離子熱條件進行 COF 合成
2. 離子液體可回收，該方法具有環保優勢。
3. 能在較短的反應時間內提高純度和產量，具備高效性。
4. 得到的結晶體，結晶度無法固定。

(四)、機械化學合成

1. 這種方法時間效率高，合成通常不需使用溶劑
2. 雖然反應快速，但在某些情況下，機械化學合成的產率可能不如傳統方法高。
3. 合成的材料結晶度較低，這種方法在 COF 合成中較少使用。

(五)、聲化學合成

1. 使用超聲波作為能量源來促進化學反應。由於通常在室溫下進行並減少了有害溶劑的使用，被視為環保的合成方法。
2. 這種方法快速且高效。
3. 由於空化現象的局部極端條件，聲化學反應可能不易精確控制，可能產生副反應或出現不希望的副產物。

(六)、室溫溶液合成

1. 在室溫下進行 COF 合成，簡化了合成過程並減少能耗。
2. 室溫溶液合成通常不需要大量能源，也可以使用環保型溶劑，減少對環境的影響
3. 合成的材料通常具有較高的穩定性，不易因過熱而降解或變性。
4. 在室溫下，化學反應速率通常較低，合成過程可能需要較長的時間，導致產率不如高溫合成。

(七)、界面合成

1. 主要是在兩個不相容的液相的界面上進行的合成，界面提供了一個高度有序的環境，有利於形成規則的結構
2. 該方法可以精確控制 COF 薄膜的生長，並且適用於催化和光電應用
3. 界面反應通常較慢，需要較長時間才能完成，可能影響大規模生產的效率。
4. 目前控制薄膜的厚度和均勻性仍有挑戰，對於某些應用要求高精度的薄膜厚度可能會有所限制。

(八)、大氣微電漿合成

1. 花費時間較短：與傳統的共價有機框價合成方法相比，大氣微電漿能顯著縮短反應時間。傳統方法可能需要二到九天才能完成，而微電漿方法能在一個小時即可完成。
2. 能夠在室溫下進行反應：無需高溫或加熱設備，降低了對能源的需求，使得實驗流程更加簡單。
3. 水為溶劑：以水作為溶劑有環保和經濟的優勢。水為最常見的綠色溶劑，無毒且價格低廉，不需要使用有害或昂貴的化學試劑，也減少了對環境的污染。此外，水作為溶劑也有助於溶解性好、反應物分散均勻，能促進共價有機框架的高效生成。
4. 結晶性和結構均勻性：大氣微電漿合成通常能生成結晶性較高且結構均勻的共價有機框架。
5. 靈活可調整的反應條件：大氣微電漿的參數（電壓、電流）可以靈活調整，能控制反應的能量輸入和進行速度。這種可調性能夠更精確控制 COFs 的結構、孔徑和化學組成，

根據不同應用需求能有不同的材料的性能。

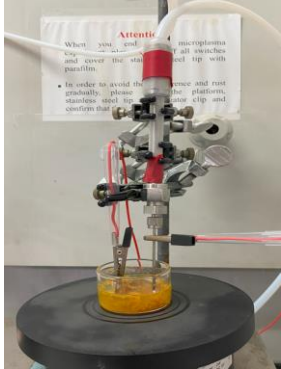
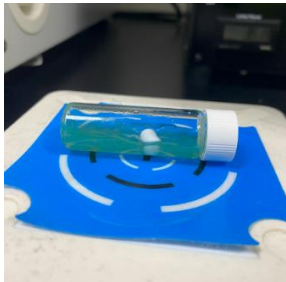
6. 可在大氣壓環境下操作：不需要真空設備，在常壓下就能進行，這使得設備成本較低，且易於大規模應用。這一特性讓該技術具有更高的可操作性和實用性，特別適合大批量合成和工業化生產。也降低了設備的安全風險，避免了高壓或高溫環境下的安全隱患。
7. 廣泛應用潛力：這種合成方法所生成的共價有機框架在氣體分離、催化、傳感器等領域的潛在應用，顯示出其多功能性和應用前景。
8. 較安全，能降低的操作風險：相較於高壓、高溫或使用有毒溶劑的方法，大氣微電漿合成在常壓、常溫下進行，安全風險較低，操作環境友好。

對比多項合成方法後，我使用大氣微電漿合成，其快速、環保且成本較低的特點，是我認為合成共價有機框架最理想的選擇。相比於傳統的合成方法，它能在常溫常壓下進行反應、使用水作為溶劑的優勢，都有明顯優勢。同時，該技術具有廣泛的應用潛力，隨著未來的技術優化與材料創新，大氣微電漿合成將為共價有機框架的研究和應用開啟更多可能性，成為推動材料科學發展的重要力量。

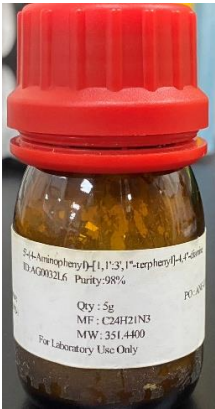
貳、研究過程與方法

一、研究藥品與設備

(一)、實驗設備

太陽能模擬器 	大氣常壓微電漿 	超音波震盪槽震盪 	紫外-可見光光譜儀 
電子天秤 	攪拌器 	離心機 	

(二)、藥品

1,3,5 苯三甲醛 BTCA (-COOH) 	1,3,5-三 (4-氨基苯 基) 苯 TAPB (-NH₂) 	亞甲基藍 MB 	結晶紫 CV 
---	---	---	---

(三). 實驗器材

1. 滴管
2. 刮勺
3. 離心管
4. 微量離心管
5. 微量滴管
6. 微量吸管尖
7. 樣品瓶
8. 乙醇
9. 丙酮
10. 封口蠟膜

11. 去離子水

12. 洗滌瓶

13. 磁石

14. 銀片

二、實驗流程圖

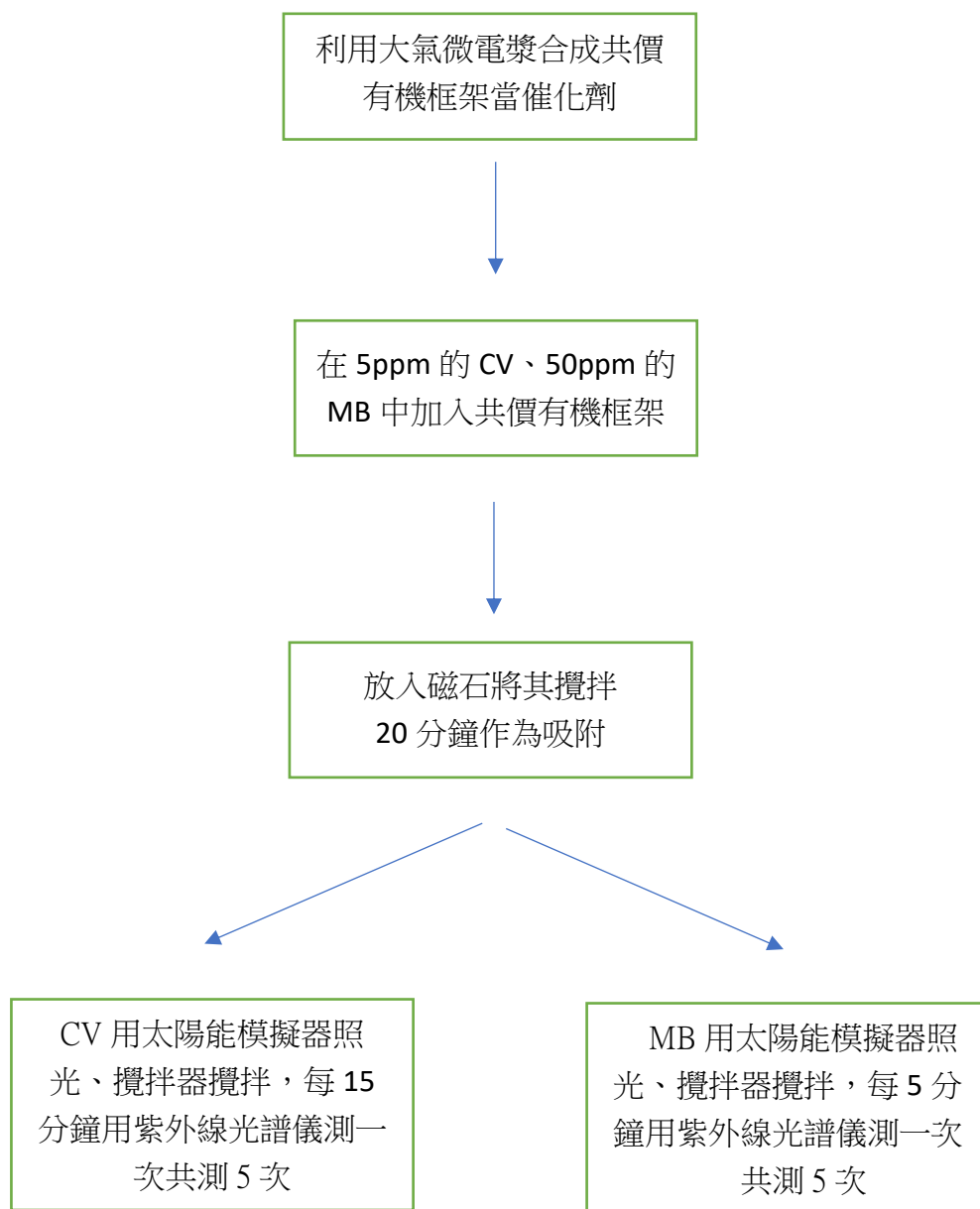


圖 (1) . 圖為本實驗總流程圖

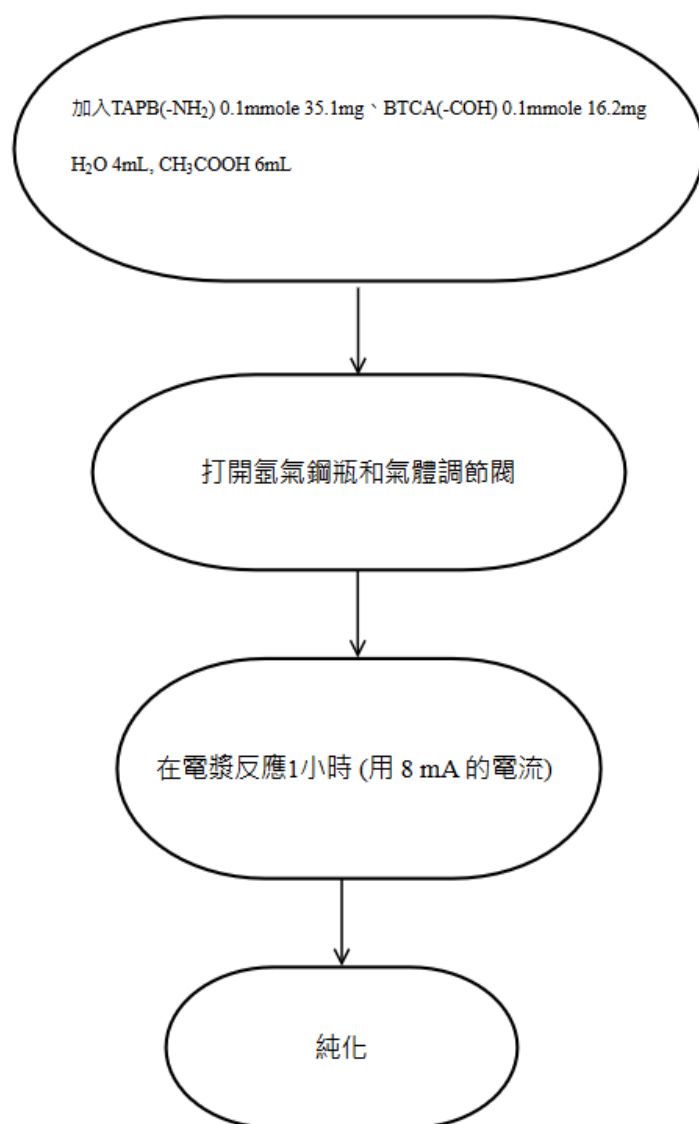


圖 (2) . 圖為COF合成流程簡圖

(三)、實驗流程

實驗一. 利用大氣為電漿合成共價有機框架

一. 實驗步驟

(一). 配藥

Step1. 秤 TAPB(-NH₂) 0.1mmole 35.1mg、BTCA(-COH) 0.1mmole 16.2mg

Setp2. 加入 H₂O 4mL, CH₃COOH 6mL

(二). 合成

Step1. 打開氬氣鋼瓶和氣體調節閥

Step2. 開啟電漿反應時間為 1 小時

Step3. 離心，將產物用丙酮洗兩次

Step4. 最後加入酒精後放入烘箱等待揮發，即可得到共價有機框架

二. 實驗設置

(一). 合成共價有機框架

1. 使用氬氣作為電漿源
2. 使用 8 mA 的電流
3. 氬氣出口為反應器陽極，鉑片為反應器陽極
4. 陰陽極之間距離為 2 公分

(二). 純化共價有機框架

1. 把產物和 20mL 的去離子水，加入一個離心管中，而另一個離心管加入 20mL 的去離子水
2. 為去除未反應的溶液，在管中加入 10mL 的丙酮，用超聲波清理機清洗 10 分鐘，再以 6000 rpm 離心 15 分鐘
3. 因為共價有機框架不溶於丙酮，而利用丙酮進行沖洗，將沒有反應的物質或是非產物洗掉，為純化

實驗二. 降解染劑

1. 降解 結晶紫 CV 5ppm

Step1. 秤共價有機框架 COF

Step2. 在樣品瓶加入水、磁石、COF、CV

Step3. 將樣品瓶放到攪拌器下將其攪拌 20 min，讓染劑將其吸附

Step4. 放到紫外線光譜儀測吸光度和波長的關係

Step5. 將樣品瓶放到攪拌器下攪拌、太陽光模擬器下照光 15min

Step6. 放到紫外線光譜儀測吸光度和波長的關係

Step7. 利用在紫外線光譜儀測出的數據在 SpectraManager 轉成文字檔、Origin 轉成圖檔

2. 降解 亞甲基藍 MB 50 ppm

Step1. 秤共價有機框架 COF

Step2. 在樣品瓶加入水、磁石、COF、MB

Step3. 將樣品瓶放到攪拌器下將其攪拌 20 min，讓染劑將其吸附

Step4. 放到紫外線光譜儀測吸光度和波長的關係

Step5. 將樣品瓶放到攪拌器下攪拌、太陽光模擬器下照光 5min

Step6. 放到紫外線光譜儀測吸光度和波長的關係

Step7. 利用在紫外線光譜儀測出的數據在 SpectraManager 轉成文字檔、Origin 轉成圖檔

伍. 研究結果

一、 結晶紫 (CV)

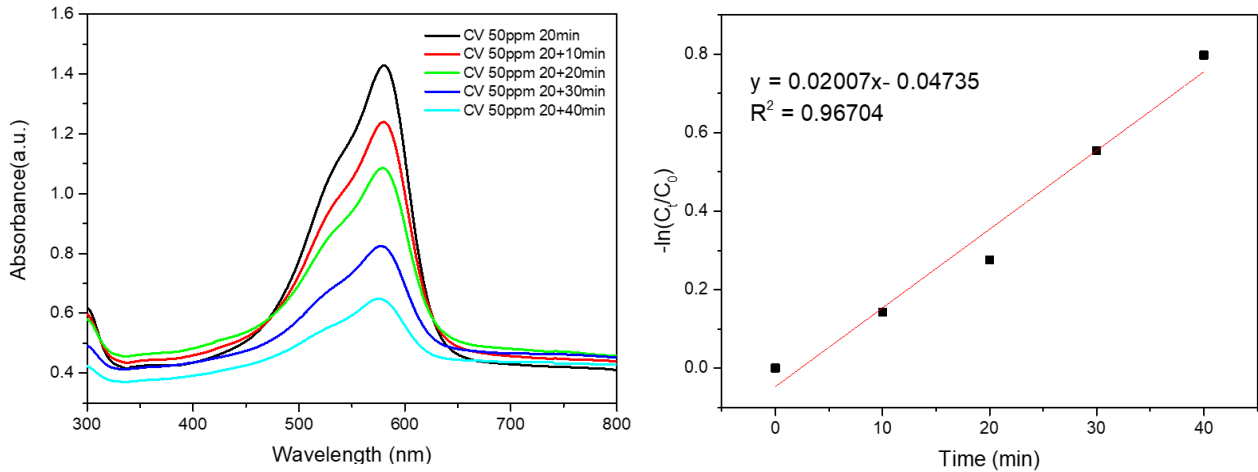


圖 (3) . 為結晶紫 (CV) 染劑降解結果

此實驗利用光催化技術對結晶紫 (CV) 染劑降解，探討及應對工業染劑污染問題。CV 是一種常見於染色工業中的三苯基甲烷染料，在水中具有高穩定性和毒性，對環境具有嚴重的影響。

實驗利用 1 g/L 的 COF 作為光催化劑，加入到濃度為 5 ppm 的 CV 水溶液中。共價有機框架的大比表面積、可調結構及高光學吸收能力，在光催化反應中具有優勢。在吸附階段，將共價有機框架與染劑溶液混合並攪拌 20 分鐘，這一過程是為了讓染劑充分吸附在共價有機框架的表面，為後續的光催化降解提供有利條件。光催化反應過程中，利用太陽光模擬器模擬太陽光。為評估降解效果，每隔 15 分鐘採用紫外-可見光光譜儀對染劑溶液的吸光度進行測量，通過吸光度的變化可以計算出染劑濃度的下降幅度。

實驗結果顯示，在光催化條件下，CV 有明顯的降解效果。CV 的主要吸收波峰位於約

在 581 nm，隨著光催化反應的進行，581 nm 波峰的吸光度會逐漸減小，表示染劑濃度下降，結構被分解。由共價有機框架作為光催化劑能夠有效促進染劑的分解，減少其在水體中的殘留濃度。隨著光催化反應的進行，溶液的顏色逐漸變淡，最終幾乎完全褪色，這也直接反映了染劑被降解的程度。

二、亞甲基藍 (MB)

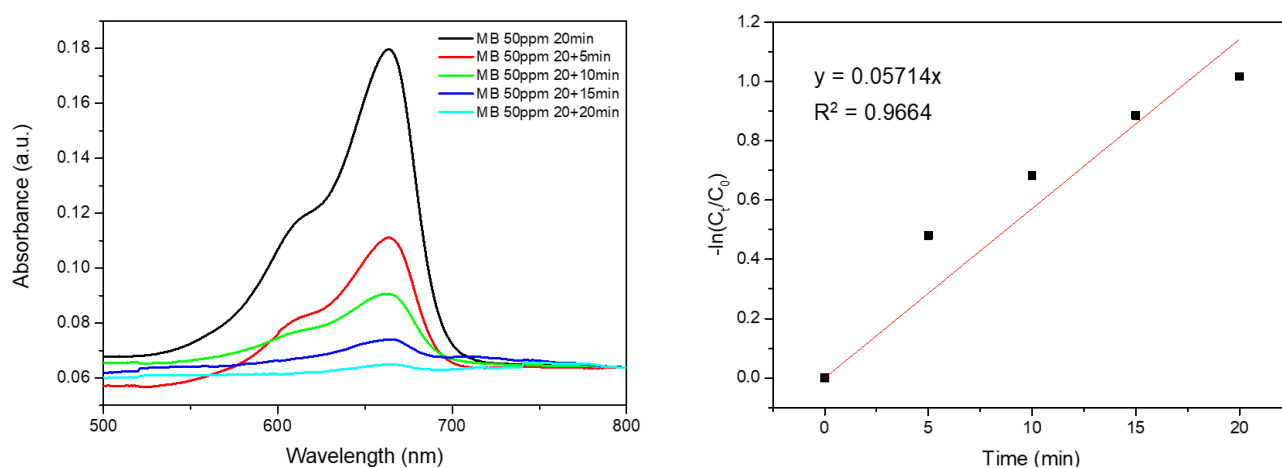


圖 (4) . 為亞甲基藍 (MB) 染劑降解結果

此實驗利用光催化技術對亞甲基藍 (MB) 染劑進行降解，以應對工業染劑污染問題。

MB 是一種常見於紡織和印染工業中的有機染料，在水中具有較高的穩定性和毒性，對環境造成潛在威脅。

實驗中使用 1 g/L 的 COF 作為光催化劑，將其加入濃度為 50 ppm 的 MB 水溶液中。

COF 以其大比表面積、可調結構及高光學吸收能力，在光催化反應中展現了顯著優勢。吸附階段中，將共價有機框架與染劑溶液混合並攪拌 20 分鐘，這樣可以確保染劑充分吸附在

COF 的表面。光催化反應過程中，利用太陽光模擬器模擬自然光照條件。為了評估降解效果，每隔 15 分鐘使用紫外-可見光光譜儀測量溶液中染劑的吸光度，並通過吸光度的變化計算染劑濃度的下降幅度。

實驗結果顯示，MB 在光催化條件下有顯著的降解效果。MB 的主要吸收波峰位於約 663 nm，隨著光催化反應的進行，663 nm 波峰的吸光度逐漸減小，這表明染劑濃度下降且其分子結構被破壞。在共價有機框架作為光催化劑的幫助下，MB 得以有效分解，顯著減少了其在水體中的殘留濃度。隨著光催化反應的持續進行，溶液的顏色逐漸變淡，最終幾乎完全褪色，這進一步驗證了染劑的降解程度。

陸. 討論

一、共價有機框架 (COF) 的表面結構

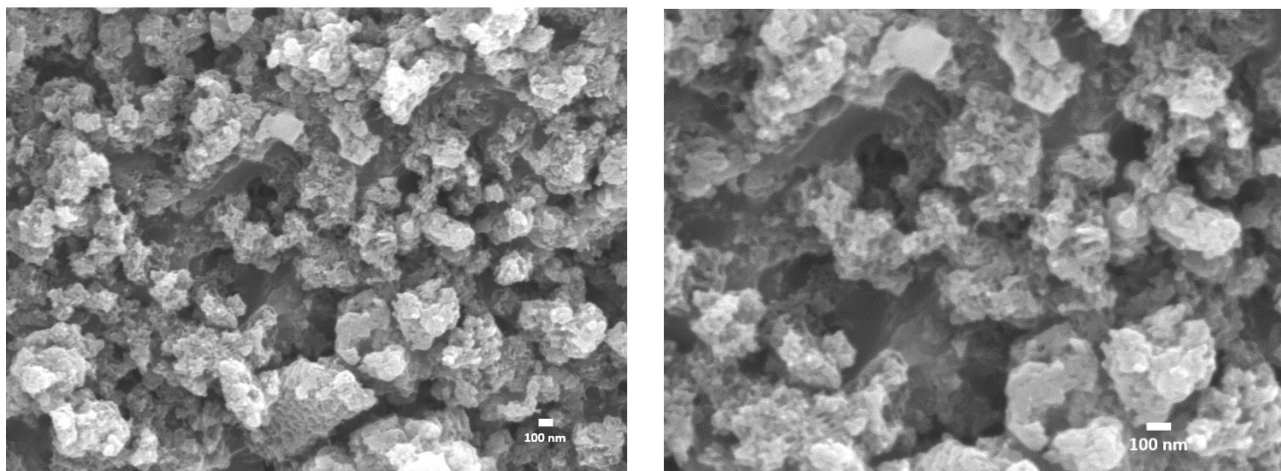


圖 (5) . 為掃描電子顯微鏡 (SEM) 觀察共價有機框架 (COF) 的表面結構

由電子顯微鏡 (SEM) 可看出共價有機框架 (COF) 通過共價鍵形成有序的網狀結構，這結構的最大特點就是其高度規則的孔洞結構。

孔洞結構的特點為：

1. 有高度可控的孔徑：COF 的孔徑大小可以通過選擇不同的有機分子單元來調整，這使得其孔徑可精確控制，能適用於不同的需求。
2. 大比表面積(單位質量所擁有的表面積)：COF 材料的多孔性帶來了極大的比表面積，這使其在吸附和儲存氣體 (如氫氣、二氧化碳) 方面具有優異的性能。
3. 高穩定性：由於 COF 是通過共價鍵連接的，這賦予其相對較高的熱穩定性和化學穩定性。這使得 COF 能夠在苛刻條件下使用。
4. 功能性可調控：COF 的多孔性可以通過引入不同的官能團來進行表面修飾，從而賦予其不同的化學性質，這對於選擇性吸附和催化反應具有重要意義。

在掃描電子顯微鏡 (SEM) 圖像中，能看出 COF 的明顯孔洞，這些孔洞的形狀、大小以及分佈可以直觀地呈現在微觀尺度上。孔洞的尺寸通常在數十到數百奈米之間，且排列方式可以呈現出高度對稱或特定的有序性。這些孔洞是由 COF 的有機框架分子自組裝形成的，表現出一定的穩定性和可重現性。

(二)、共價有機框架 (COF) 的降解

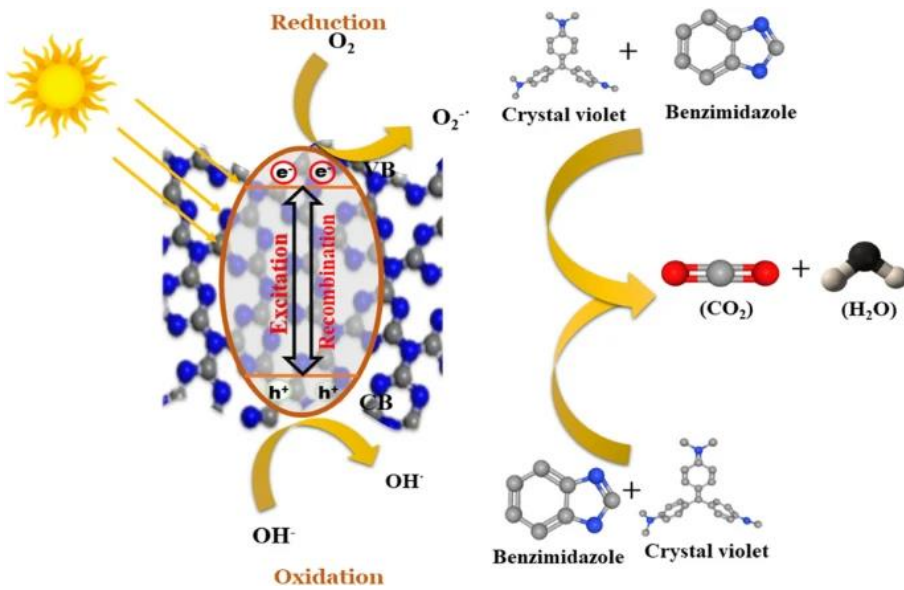


圖 (6) . 為共價有機框架降解染劑的過程圖 (圖源自 *Macromolecular Research*, 31, 91 – 104.)

1. COF 在光照下，會吸收光能，激發電子 (e^-) 從價帶 (VB) 跳到導帶 (CB)，同時生成電洞 (h^+)。

2. 這些電子和空穴之間可能發生重組，如果重組被抑制，電子和電洞會分別進行氧化和還原反應。

-還原反應：電子與氧氣反應，生成超氧陰離子 ($\bullet O_2^-$)，這些陰離子有助於降解染劑分子。

-氧化反應：電洞與水或氫氧根反應，生成強氧化性的氫氧自由基 ($OH^\bullet$)，進一步攻擊並分解染劑。

3. 右側的箭頭顯示了染劑降解的過程，最終產物是二氧化碳 (CO_2) 和水 (H_2O)，表明染劑降解。

捌. 總結

本實驗成功利用大氣微電漿合成共價有機框架 (COF)，並應用於光催化降解有機染劑，實現了對水中有機污染物的高效分解與處理。COF 是一種具備高度有序多孔結構的結晶材料，憑藉其優異的物理和化學性質，展現其強大的吸附與光催化降解的能力。COF 在降解有機染劑時表現出卓越的催化能力，其降解機制主要包含三個步驟：染劑的吸附、活性氧物種（如超氧陰離子、氫氧自由基）的生成，以及最終的氧化降解過程，通過這一過程，有毒染劑被分解為無毒的小分子副產物(水和二氧化碳)。實驗結果表明，僅需短短一小時，結晶紫 (CV) 和亞甲基藍 (MB) 的最大吸收峰明顯下降，證實了 COF 材料在降解這些污染物時的高效性。此外，這使 COF 成為解決水污染問題的理想催化劑之一。

與傳統的 COF 合成方法相比，大氣微電漿技術展示出多方面的優勢。首先，該方法反應時間大幅縮短，從傳統合成方法需要的數天時間縮減到僅需約一小時，極大地提高了反應效率。其次，大氣微電漿技術在室溫條件下即可完成反應，無需高溫高壓，進一步降低了能耗需求，使其成為更環保、更經濟的選擇。此外，該技術使用水作為溶劑，替代了傳統合成方法中可能使用的有毒或昂貴的溶劑，這不僅符合綠色化學的原則，還減少了實驗過程中的安全隱患和對環境的潛在影響。在技術層面來看，大氣微電漿合成 COF 具有靈活調控的特性，能夠通過調整反應條件（如電壓、電流等參數）來精確控制 COF 的結構、孔徑大小及化學組成，能針對不同應用需求，製備具備特殊性能的 COF 材料，這高度可調的特性，使其在解決多種不同污染物時都能發揮最大效用，從而拓展了其在環境治理中的應用範圍。

展望未來，大氣微電漿合成 COF 材料不僅在水污染治理中展現了強大的應用潛力，還有望在氣體分離、能源儲存、電池材料、催化劑設計等領域發揮重要作用。在氣體分離領域，COF 的大比表面積和可調控孔徑結構可以精確篩選特定氣體分子；在能源儲存領域，COF 的穩定性和多孔結構有助於提升儲氫、儲能的效率，COF 還可以作為高效催化劑，應用於各種化學反應中，從而進一步推動環保技術的發展。

隨著技術的不斷進步和合成方法的優化，大氣微電漿技術有望成為 COF 研究中的主流方法。期盼未來隨著更多應用場景的開發和技術的完善，大氣微電漿合成 COF 能為水污染處理做出更多重要貢獻。

陸、參考文獻

1. Zhao, W., Yan, P., Yang, H., Bahri, M., James, A. M., Chen, H., ... & Cooper, A. I. (2022) ° Covalent organic frameworks: Synthesis and applications ° 《Nature Synthesis》, 1, 87-95
2. Chiang, W. H., Mariotti, D., Sankaran, R. M., Eden, J. G., & Ostrikov, K. (2020) ° Advances in microplasma synthesis ° 《Advanced Materials》, 32, 1905508
3. Dey, K., Pal, M., Rout, K. C., Kunjattu, S. H., Das, A., Mukherjee, R., ... & Banerjee, R. (2017) ° The emerging field of covalent organic frameworks ° 《Journal of the American Chemical Society》, 139, 13083-13091
4. Mariotti, D., & Sankaran, R. M. (2010) ° Microplasma: A new frontier in plasma science and technology ° 《Journal of Physics D: Applied Physics》, 43(32), 323001
5. Yang, C., Chen, B., Ma, X., Zhang, Q., Zhang, W., & Xie, R. (2020) ° Recent advances in microplasma-assisted synthesis of nanomaterials for energy and environmental applications ° 《Nanomaterials》, 10(1), 24
6. Banerjee, R., Phan, A., Wang, B., Knobler, C., Furukawa, H., O'Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2008) ° High-throughput synthesis of zeolitic imidazolate frameworks and application to CO₂ capture ° 《Science》, 319(5865), 939-943
7. Zhao, X., & Paidi, P. (2021). Covalent organic frameworks (COFs) for electrochemical applications. Chemical Society Reviews, 50(13), 6871–6913.

【評語】180023

本件研究作品結合大氣常壓微電漿與共價有機框架(COF)，提出了一種環保、高效且快速的污染物處理技術，具有極高的創新價值和實際應用潛力。實驗結果證明 COF 具備快速且有效的光催化降解污染物能力，可在短時間內分解結晶紫及亞甲藍等有毒染劑，其成果有助於促進環境安全與保護工作。實驗分析採用掃描電子顯微鏡與紫外-可見光光譜儀等技術進行結構與降解效果的科學驗證，實驗設計與流程描述詳盡，數據分析清楚。研究為實驗室級別，若進行大規模水處理，可能面臨技術轉移及能耗問題的挑戰。COF 作為光催化劑，若應用於實際水處理，其回收與重複使用效率仍需進一步研究，實現完整循環再利用。