

中華民國第 65 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高級中等學校組 工程學科(二)

佳作

052415

新型微生物燃料電池於能源再生及有機物降解
之研發

學校名稱： 臺北市立麗山高級中學

作者： 高二 廖若涵	指導老師： 林獻升 郭瓊華
-------------------	-----------------------------

關鍵詞： 微生物燃料電池、綠色能源、有機物降解

摘要

本研究探討新型微生物燃料電池(MFC)於能源再生及水資源處理中的應用。MFC 利用微生物將廢水中的有機物轉化為電能，不僅達到能源再生、低碳排放的優勢，還可降解有機物、產生電力等。本研究使用不含氟化物的煤灰陶瓷隔離膜，並對石墨氈改質，以探討電極的材料(石墨紙、石墨氈、改質石墨氈、碳布) 及表面積(3x3、4x4、5x5 cm²)對 MFC 產電效率及淨化廢水效率的影響。結果顯示，電極材質則以較貴的石墨紙表現最優，但較便宜改質石墨氈在發電效果及去除污水的效率上皆接近石墨紙；在電極表面積為 4x4 cm²時產電效率及淨化廢水效率最佳，顯示較小的表面積差異對 MFC 影響效果不大。本研究可為 MFC 在污水處理和能源再生中的應用提供了重要的數據參考。

壹、前言

一、研究動機

近年來，全球氣候變遷和環境污染問題日益嚴峻，過度使用傳統化石燃料加劇了溫室氣體排放和環境污染，對人類賴以生存的地球環境造成了嚴重的威脅。在這一背景下，開發清潔、可持續的綠色能源已成為刻不容緩的課題(陳彥銘，2011)。

微生物燃料電池(Microbial Fuel Cell, MFC)與其他傳統發電方法相比具有成本較低以及設置簡單為主要的優點。微生物燃料電池的應用包括廢水處理、再生能源及生物感測器等方面。

微生物燃料電池具有可將廢水中的有機物轉化為電能，實現能源再生、廢水資源化和能源利用化、產生的電能可直接使用或儲存，為偏遠地區或災害地區提供可靠的能源保障，具有廣泛的應用潛力。且 MFC 可應用於污水處理、生物傳感、生物修復等領域等優點。且與傳統的能源生產方式相比，MFC 利用廢水中的有機物作為燃料，是一種可再生的能源(楊雲捷，2022)，並且在產電的過程中會在陰極槽產出乾淨的水，這些特點都與聯合國的一系列目標永續發展目標(圖一)中的 SDG 6 中的水質改善和污水管理及 SDG 7: 可再生能源要求密切相關。因此，微生物燃料電池是具有巨大發展潛力的綠色能源技術。



(圖一)永續發展目標(圖片來源:National Library of Medicine)

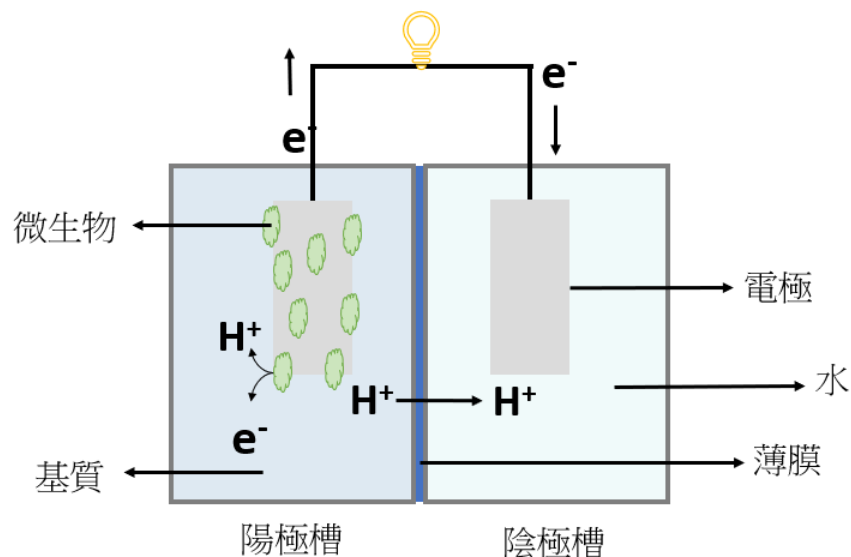
二、研究目的

電極材料是微生物燃料電池重要的基本組件之一，其性能直接影響 MFC 的發電效率。而電極是 MFC 的基礎零件，其中種類繁多，包括一些具有良好導電性能但較不常見、取得難度高或取得管道不穩定的材料，這些因素限制了 MFC 在日常應用中的普及。此外，MFC 中的薄膜技術研發成本較高，且已經有許多人投入研發，而只開發出效率良好的新薄膜，但是沒有採用較良好電極材料的電極或控制適當的電極大小，效率一樣無法大幅提升，所以電極材料及尺寸仍有許多研究空間。因此，本實驗旨在使用易於獲得的碳材料，並透過多壁奈米碳管 (Multiwalled Carbon Nanotube, MWCNT) 對石墨氈進行改質。MWCNT 具有優良的導電性並能增加電極表面積，進而提升 MFC 效能。此外，本研究也探討電極表面積對 MFC 的影響。因此，本研究目標如下：

1. 比較不同電極材料對 MFC 產電效能的影響
2. 比較不同電極材料對 MFC 對有機物降解效率的影響
3. 探討不同電極表面積對 MFC 產電效能的影響
4. 探討不同電極表面積 MFC 對有機物降解效率的影響

三、文獻回顧

生物燃料電池常見使用的是雙槽式微生物燃料電池系統(Dual chamber MFC)、單槽式微生物燃料電池系統(Single chamber MFC)，而現今為了能夠得到更好的發電效率或是能在微生物燃料電池中有更好的優勢而發展出的系統，像是微型燃料電池、平板式燃料電池、管流式燃料電池等(林志達，2021)。傳統雙槽式微生物燃料電池構造如(圖二)所示，主要是由陽極反應槽、陰極反應槽及中間的質子交換膜組成。在陽極槽厭氧或好氧環境下，有機物在微生物作用下會進行氧化反應產生電子、質子和二氧化碳，電子再通過外電路傳遞到陰極形成電流，而質子通過薄膜傳遞到陰極，並且氧氣在陰極得到電子進行還原反應生成乾淨的水。



(圖二)雙槽式微生物燃料電池構造與基本反應，反應式:

陽極: $C_6H_{12}O_6 + 6H_2O \rightarrow 6CO_2 + 24H^+ + 24e^-$ ，陰極: $6O_2 + 24H^+ + 24e^- \rightarrow 6H_2O$ 。各零件作用:

電極:傳遞電子、讓微生物附著；廢水:提供有機物作為微生物的食物；污泥:內含大量的微生物；薄膜:防止電子、氧氣和其他離子直接通往另一端選擇性的讓質子通過

(圖表來源:作者繪製)

貳、研究設備及器材

一、電池材料

- (一)、電池外殼:硼矽酸玻璃材質的血清瓶
- (二)、薄膜：煤灰膜
- (三)、電極: 碳布、石墨紙、石墨氈

二、電池內部添加物

- (一)、基質：人工葡萄糖廢水
- (二)、污泥：厭氧污泥

三、電池外部

- (一)、導線
- (二)、電阻

四、儀器

- (一)、三用電錶
- (二)、磁石攪拌機
- (四)、自動吸量管
- (五)、紫外線可見光分光光度計
- (六)、pH meter
- (七)、ORP meter
- (八)、噴槍

參、研究方法或過程

一、研究方法

本實驗以人工葡萄糖廢水作為陽極槽的基質，以加入葡萄糖 3.6g/L、無水醋酸鈉 1.1g/L、磷酸二氫鉀 0.021g/L、碳酸氫銨 0.2g/L 來配置葡萄糖廢水(張庭郢，2024)。以此廢水為基質，比較四種電及材質，分別為:較常運用在 MFC 的石墨氈、碳布、較常運用在石油、化工、電子的石墨紙及運用聚乙醇和多壁奈米碳管改質的石墨氈，比較不同電極材質的產電效率及有機物降解效率，並探討不同電及表面積對 MFC 產電效率及有機物降解效率的影響，如表(一)所示。比較所產生的電壓、極化曲線、COD 去除率、功率密度曲線等指標，綜合決定出一組產電性能較高及廢水處理效果較好的電極組合。

(表一)比較不同電極表面積或不統電極材質的 MFC(圖表來源:作者繪製)

表面積\材質	碳布	石墨紙	石墨氈	改質石墨氈
5*5cm ²	✓	✓	✓	✓
4*4cm ²			✓	
3*3cm ²			✓	

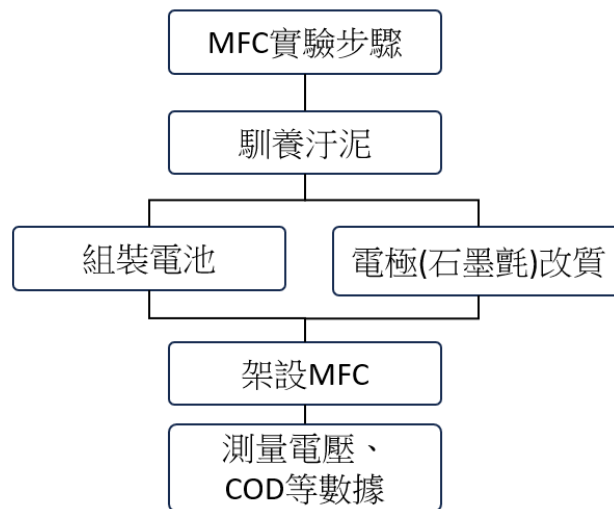


(圖三)電極材料圖片

從左至右材料依序為:碳布、石墨紙、石墨氈、改質石墨氈(圖片來源:作者拍攝)

二、研究過程

研究過程如(圖四)所示，步驟依序為：馴養汙泥、製作微生物燃料電池、測量各項數值，詳細方法為以下所示：



(圖四)實驗步驟圖(圖表來源:作者繪製)

(一) 馴養汙泥

以人工葡萄糖廢水作為基質，每兩天換一次廢水，並在進料前曝氣 30 分鐘，以減少水中的溶氧量。COD 去除率穩定後，則以相同條件進行餵養，以供日後實驗備用。

(二) 製作微生物燃料電池

1. 電極改質

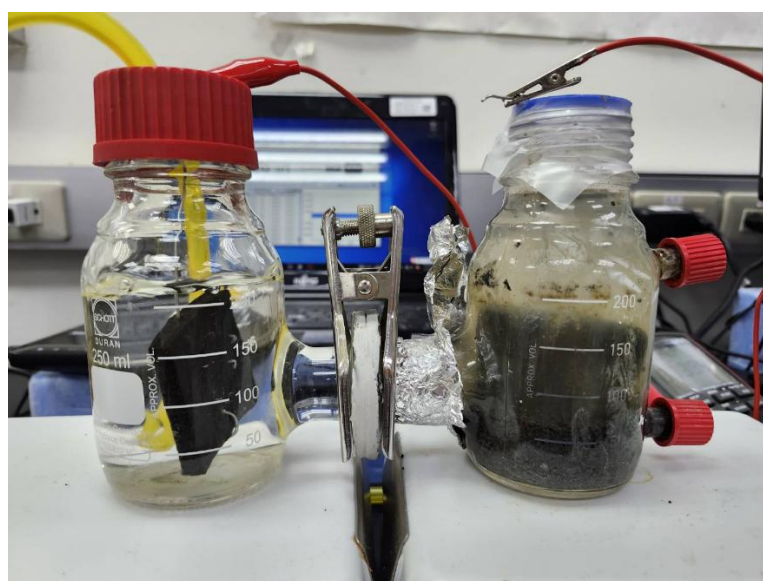
將 3mg 的聚乙烯醇(Polyvinyl Alcohol, PVA)加 DI 水至 20ml，加熱到 80°C並等到 PVA 融化，再將 17mg 的多壁奈米碳管 (Multiwalled Carbon Nanotube, MWCNT)加入並搖晃均勻。再利用手壓式噴筆均勻噴塗在石墨氈表面，最後放至烘箱 14 小時烘乾(Artigas-Arnaudas, J., Muñoz, B.K., Sánchez, M. *et al.* , 2022)。

2. 組裝電池

將電池外殼如(圖六)所示組裝，用煤灰膜隔開兩極，接著將厭氧汙泥 50ml 及葡萄糖廢水 200ml 放置微生物燃料電池的陽極中，陰極放入 DI 水，並放入電極，再接上導線及外電組(1000 歐姆)，接著密封陽極並包上鋁箔紙。

(三) 測量

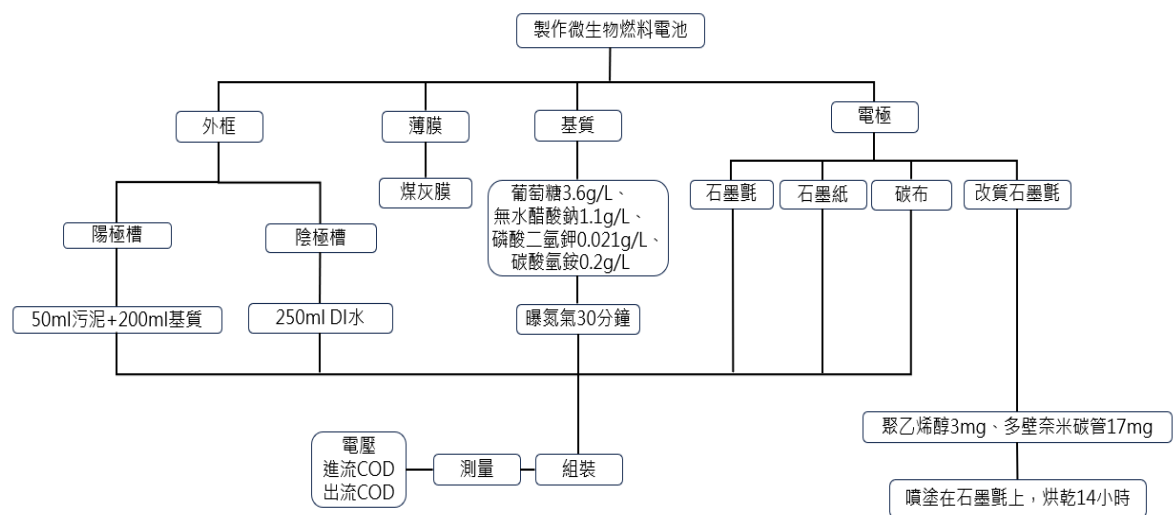
紀錄電壓、pH 值、ORP 等數據，並用分光光度計測量餵養前、後人工廢水的 COD 濃度，得出電流密度、極化曲線、COD 去除率、電流密度、功率密度等數值，並繪製成極化曲線、功率密度曲線等圖表。藉由電壓、極化曲線、功率密度曲線來判斷產電效率的大小；以 COD 去除率來判斷有機物降解速率。



(圖五)為微生物燃料電池拼裝完成圖與示意圖，陽極槽(右方)還未包上錫箔紙。

陽極槽(右方)放入汙泥、基質及電極，陰極槽(左方)放入電極及 DI 水

(圖片來源:作者拍攝)



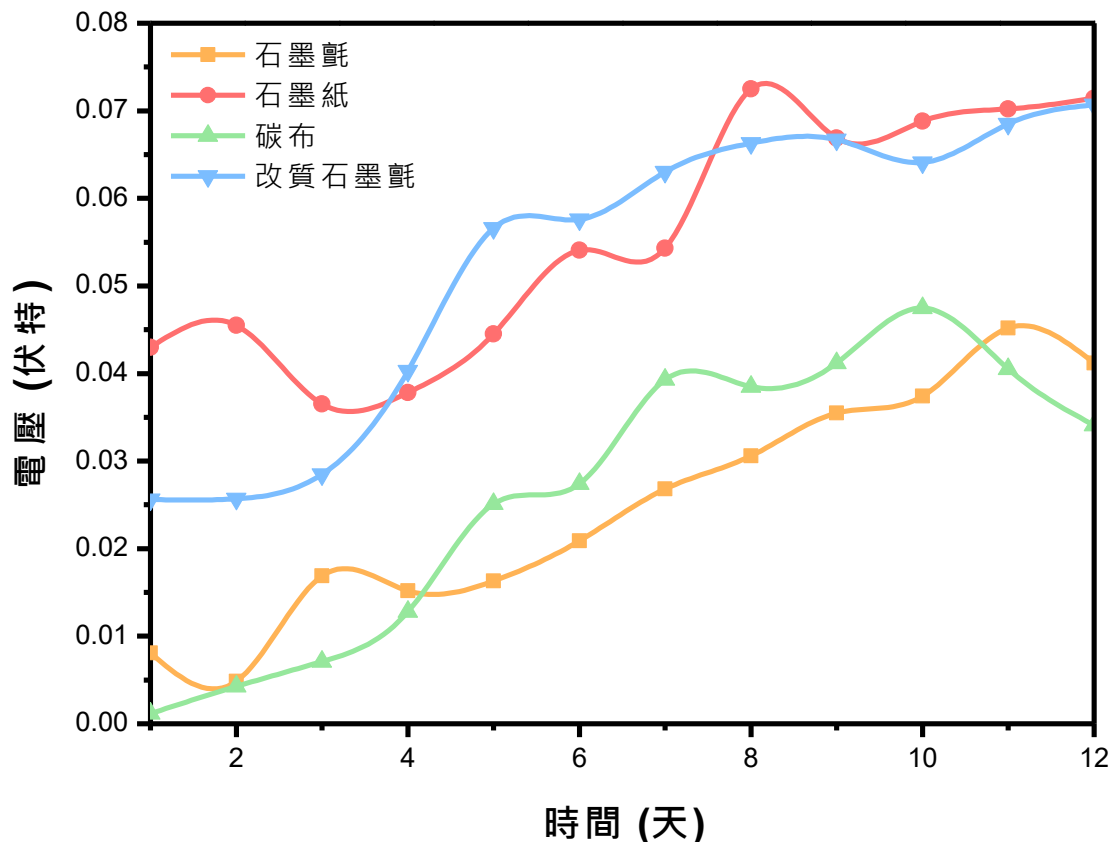
(圖六)實驗設計圖(圖表來源:作者繪製)

肆、研究結果

一、電極材質對於 MFC 產電效能的影響

(一) 電壓

電壓 (Voltage) 是電位差的量度，電壓的大小決定了電流通過電路的能力，並且反映了電源所能提供的能量強度。(圖七)為不同材質的電極在外接 1000 歐姆電阻下產生的電壓。

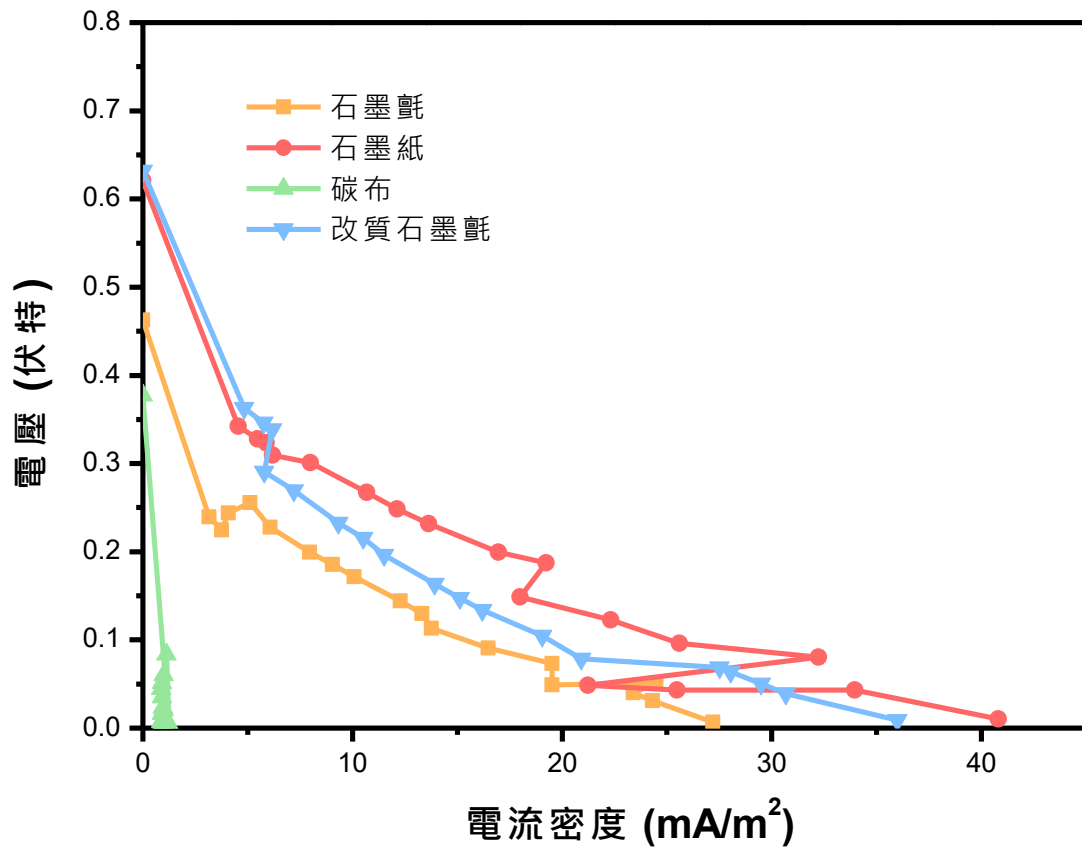


(圖七)不同材質的電極在外接 1000 歐姆電阻下產生的電壓。從最後的電壓來看，

電壓大小為:石墨紙>改質石墨氈>石墨氈>碳布。(圖表來源:作者繪製)

(二) 極化曲線

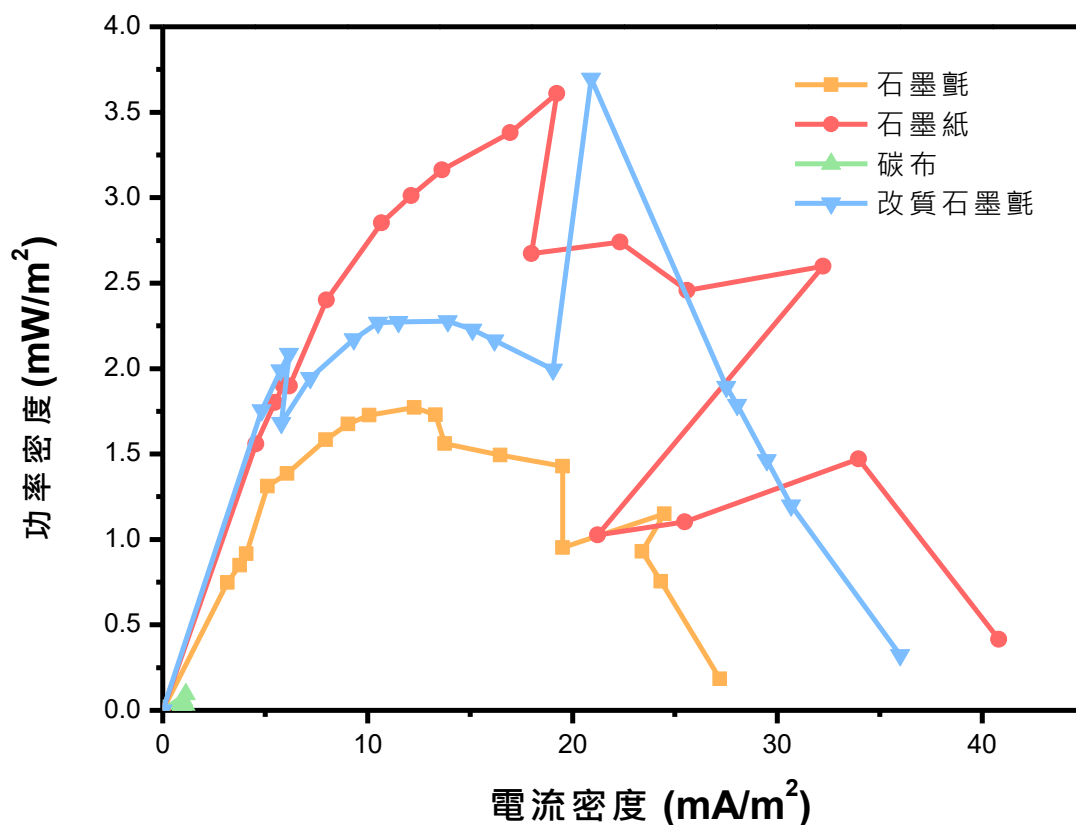
極化曲線 (Polarization Curve) 是描述燃料電池或電化學系統性能的重要圖表。它顯示了燃料電池中的電壓隨電流密度變化的關係，通常用來評估燃料電池的性能、效率和限制因素。(圖八)為不同電極材質的極化曲線。極化曲線優劣為相同電流密度狀況下的電壓高低。



(圖八)不同電極材質的極化曲線。因此極化曲線的好壞為
石墨紙>改質石墨氈>石墨氈>碳布。(圖表來源:作者繪製)

(三) 功率密度曲線

功率密度曲線 (Power Density Curve) 是另一個用來評估燃料電池或電化學系統性能的重要工具。它描述了燃料電池中的功率密度 (每單位面積產生的功率) 隨電流密度變化的關係。(圖九)為不同電極材質的功率密度曲線。功率密度曲線是看最大電流密度和最大功率密度。



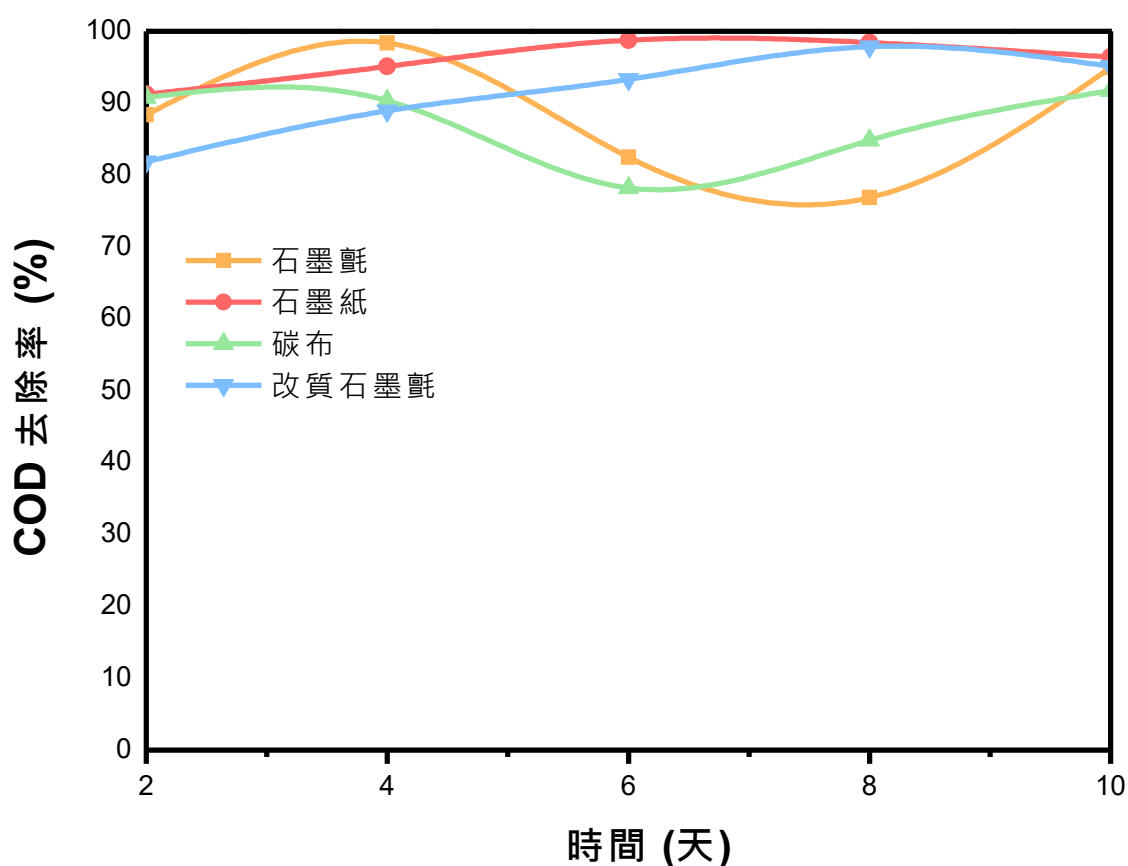
(圖九)為不同電極材質的功率密度曲線。功率密度曲線的好壞為

石墨紙>改質石墨>石墨>碳布。(圖表來源:作者繪製)

小結:根據電壓、極化曲線、功率密度曲線，各電極材質產電效率排序為: 石墨紙>改質石墨>石墨>碳布

二、電極材質對於 MFC 對有機物降解效率的影響

COD 去除率 (Chemical Oxygen Demand Removal Efficiency) 是指在污水處理過程中，污水中化學需氧量 (COD) 被去除的百分比。COD 是一種常用的指標，用來測量水體中的有機污染物的總量。COD 越高，表示水中有機物含量越高。COD 值越低，表示水中的有機污染物含量越少，水質越乾淨。(圖十)為不同材質的電極的 COD 去除率。**COD 去除率越高，表示處理系統對有機物的降解效果越好，淨化污水的效果越好。**



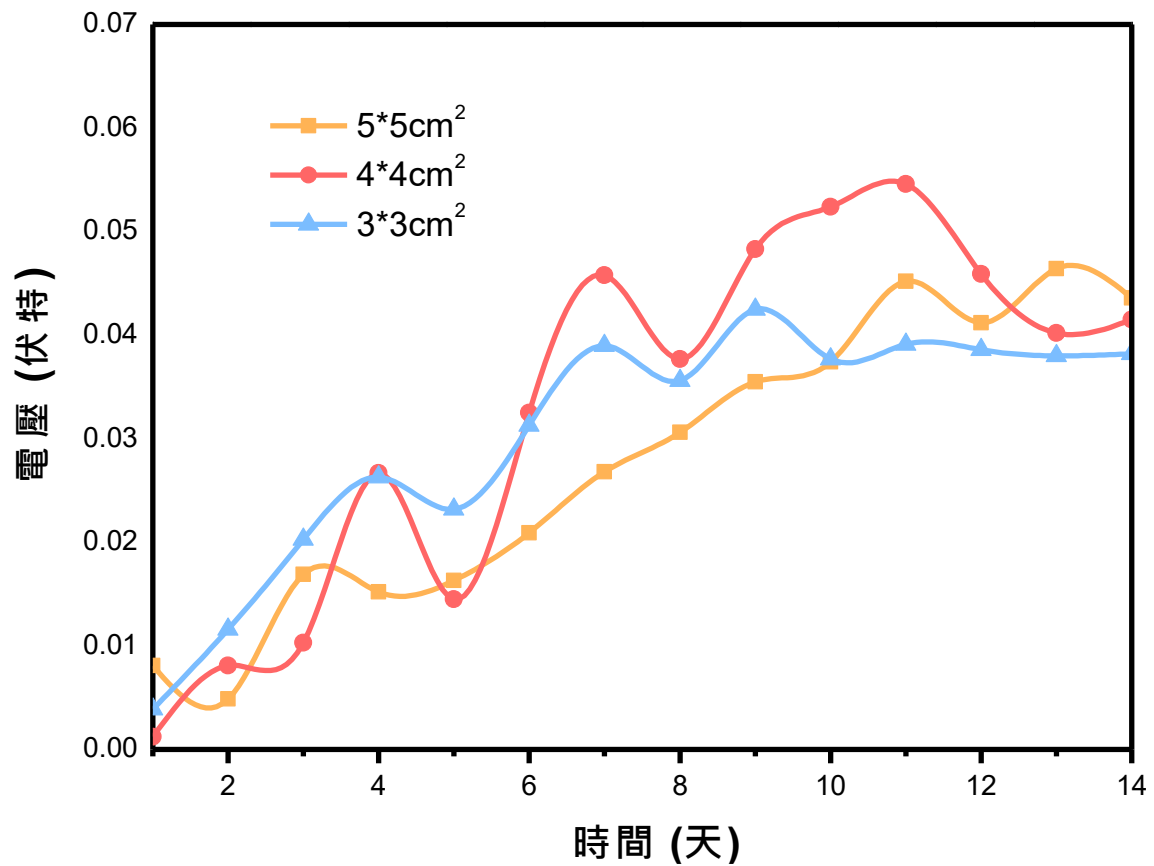
(圖十)不同材質的電極的 COD 去除率。平均來看，COD 去除率高低為:

石墨紙>改質石墨>碳布>石墨。(圖表來源:作者繪製)

三、電極表面積對於 MFC 產電效能的影響

(一) 電壓

(圖十一)為不同電極表面積在外接 1000 歐姆電阻下產生的電壓。

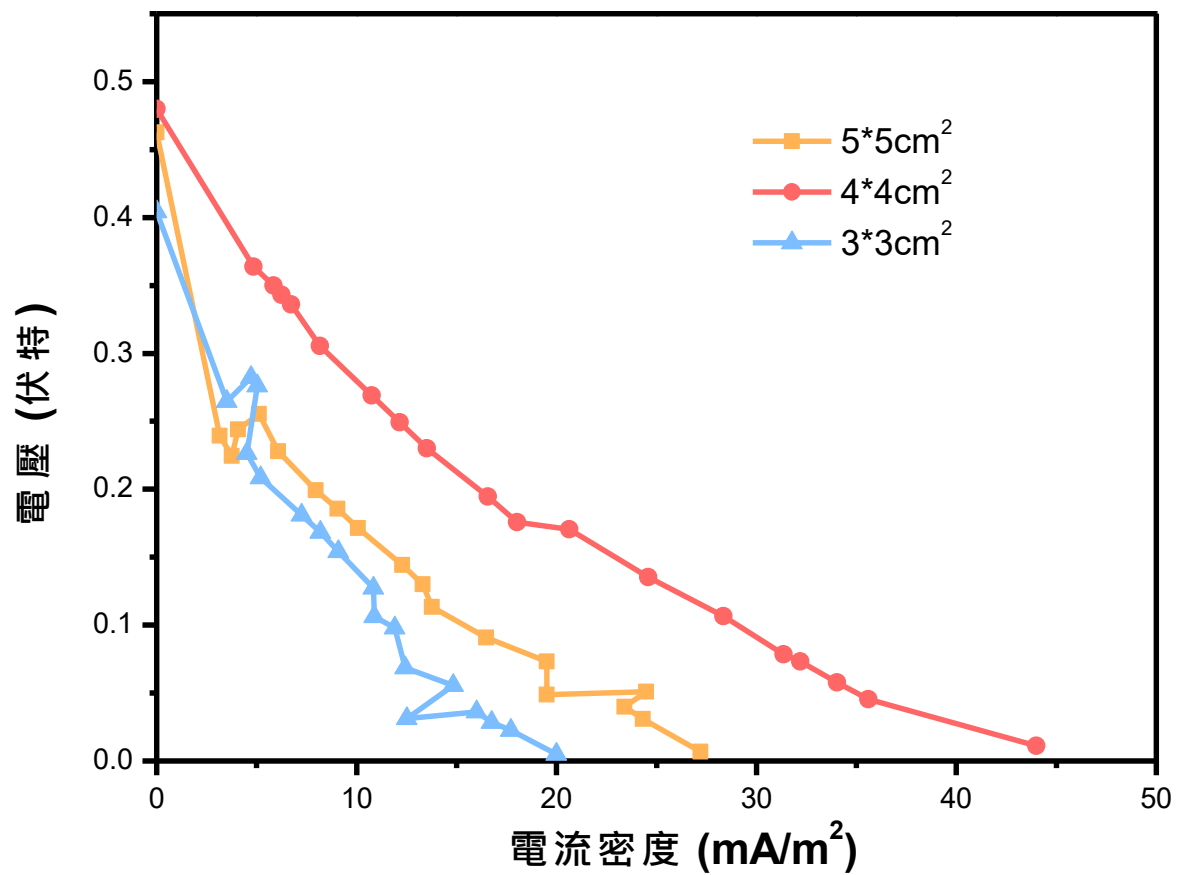


(圖十一)不同電極表面積的電壓。從最後的電壓來看，

電壓大小為: $5*5\text{cm}^2 > 4*4\text{cm}^2 > 3*3\text{cm}^2$ (圖表來源:作者繪製)

(二) 極化曲線

(圖十二)為不同電極表面積的極化曲線。極化曲線優劣為相同電流密度狀況下的電壓高低。

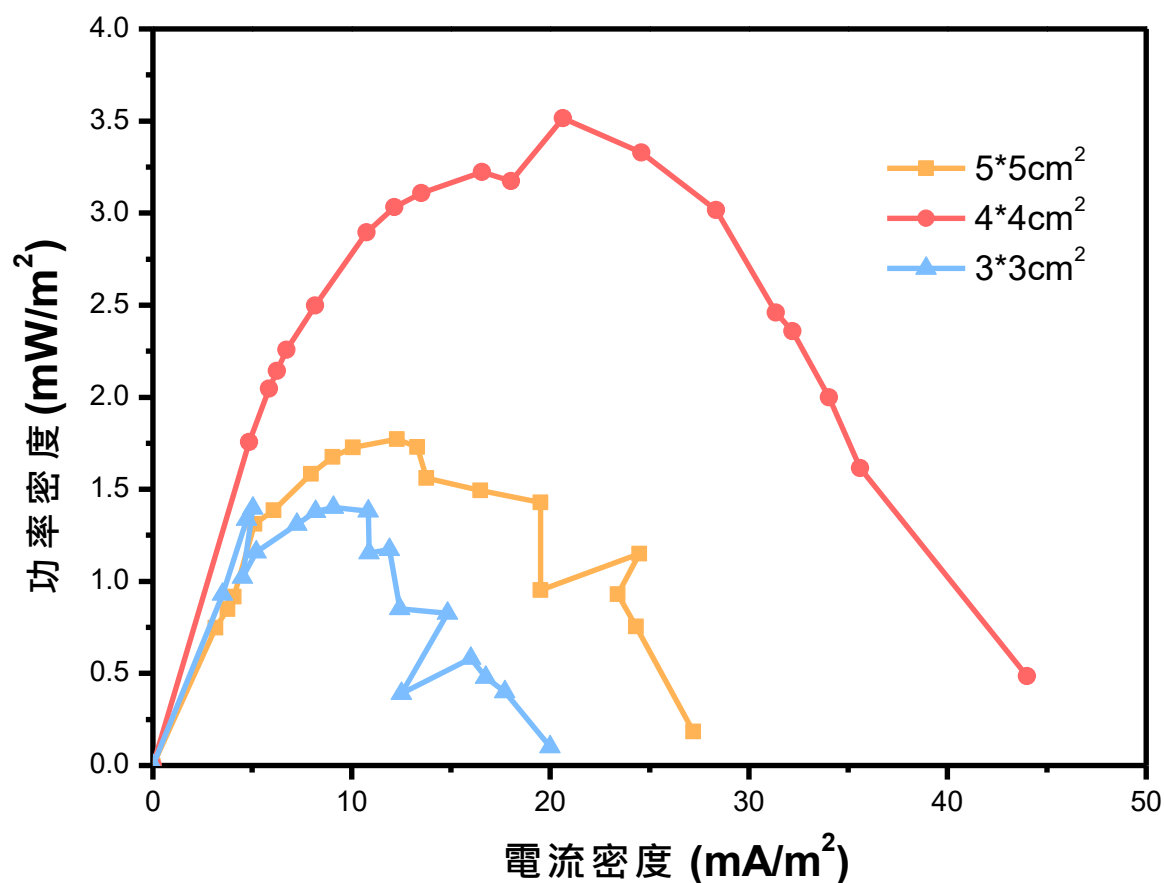


(圖十二) 不同電極表面積的極化曲線。極化曲線的好壞為

$4*4\text{cm}^2 > 5*5\text{cm}^2 \geq 3*3\text{cm}^2$ (圖表來源:作者繪製)

(三) 功率密度曲線

(圖十三)為不同電極表面積的功率密度曲線。功率密度曲線是看最大電流密度和最大功率密度。



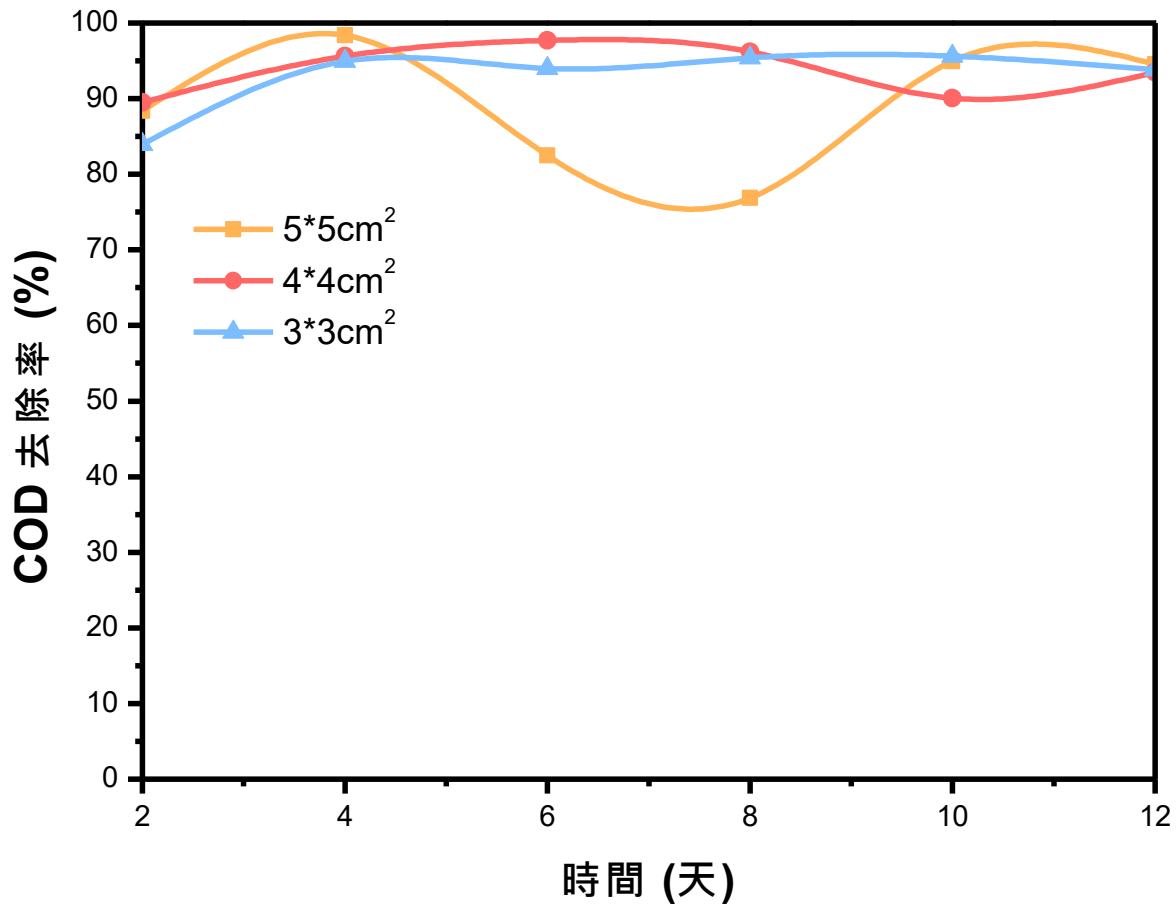
(圖十三)為不同電極表面積的功率密度曲線。功率密度曲線的好壞為
 $4*4\text{cm}^2 > 5*5\text{cm}^2 \geq 3*3\text{cm}^2$ (圖表來源:作者繪製)

小結:根據電壓、極化曲線、功率密度曲線，各電極表面積產電效率排序為:

$4*4\text{cm}^2 > 5*5\text{cm}^2 \geq 3*3\text{cm}^2$

四、電極表面積對於 MFC 對有機物降解效率的影響

(圖十四)為不同電極表面積的 COD 去除率。COD 去除率越高，表示處理系統對有機污染物的去除效果越好。



(圖十四) 不同電極表面積的 COD 去除率。平均來看，COD 去除率高低為：
 $4*4\text{cm}^2 > 3*3\text{cm}^2 > 5*5\text{cm}^2$ (圖表來源:作者繪製)

伍、討論

一、實驗數據

（一）電極材料如何影響微生物燃料電池的產電及淨化污水的效率？

1. 導電性與內阻：

不同的電極材料（如石墨紙、石墨氈、碳布）具有不同的導電性與內電阻，這些性質會直接影響電子在微生物燃料電池中的傳遞效率，進而影響其發電效能。

2. 孔隙結構與微生物附著：

電極的孔隙大小、分布以及總表面積會影響微生物在陽極上的附著與生長情況。良好的結構有助於微生物的成長，促進電子傳遞，並提升廢水中 COD 的去除效果。

（二）不同電極材質的實驗結果

在不同電極材質下從電壓、極化曲線、最大電流密度、最大功率密度來看，產電效率大小為：石墨紙 ≥ 改質石墨氈 > 石墨氈 > 碳布，MWCNT 的加入可增加電極的比表面積，進一步提升電子傳輸效率，使改質石墨氈具備更好的發電表現，而 PVA 則可以協助 MWCNT 附著在石墨氈上。但石墨紙及改質石墨氈的電池在相同的培養時間下較不穩定，推測可能為石墨紙材質孔徑過小及 MWCNT 噴塗不均勻的原因。

從 COD 去除率來看，淨化廢水效率排序為：石墨紙 > 改質石墨氈 > 碳布 > 石墨氈，依舊為石墨紙淨化廢水效率最好，但經過改質後的石墨氈，其淨化廢水效率可大致與石墨紙相當。改質後的石墨氈，其發電效率可大致與石墨紙相當。

（三）電極表面積如何影響微生物燃料電池的產電及淨化污水的效率？

1. 表面積與傳質效率：

較大的表面積能提供更多微生物附著的位置，有助於提升發電與污染物去除效率。

然而，如果電極的孔隙結構或厚度設計不良，反而可能增加內部電阻，導致效

率下降。

（四）不同電極表面積的實驗結果

在不同電極表面積的電壓、極化曲線、最大電流密度和最大功率密度來看，發電效率排名如下： $4*4\text{ cm}^2 > 5*5\text{ cm}^2 \geq 3*3\text{ cm}^2$ 。

根據 COD 去除率來看，淨化廢水效率排序為： $4*4\text{ cm}^2 > 3*3\text{ cm}^2 > 5*5\text{ cm}^2$ 。

二、可能產生誤差的原因

（一）基質（廢水）COD 濃度的微小變化

每次配置與更換廢水時，雖盡量維持相同配比，但仍可能因：測量誤差、溶液混合不均、操作過程中的細微變動，導致 COD 濃度出現輕微差異。在小型實驗裝置中，這些變化可能被放大，進而影響 MFC 的性能表現。

（二）廢水均勻性問題

廢水輕微晃動或分佈不均，可能影響微生物的附著生長與電子傳遞。且若懸浮顆粒未充分分散，某些區域營養物質濃度高而其他區域則相對不足，導致 MFC 整體性能出現波動。

（三）電極尺寸的微小差異

電極為手工裁切，可能因裁切工具精度限制及肉眼判斷誤差，難以保證每片電極尺寸完全一致。

三、減小誤差的方法

在未來的實驗中，可以利用本次獲得的基礎實驗數據作為參考，進一步**架設較大規模的實驗系統**。透過放大系統的規模，不僅能更接近實際應用場景，還能有效降低人為操作誤差對結果的影響。

由於在小型系統中，一些細微的操作誤差（如基質 COD 濃度的微小變化、廢水混合不均、電極尺寸的細微差異）可能被放大，導致實驗結果的波動性較大。然而，當系統放大後，這些變異相較於整體體積與處理量而言將變得相對微不足道，從而提高數據的穩定性與可重複性。

四、未來應用

將微生物燃料電池技術整合到現有的廢水處理廠，以處理高有機污染負荷的廢水（例如食品加工廢水、工業廢水）。

MFC 技術的雙重功能:同時處理廢水並發電，可有效降低能源消耗。改質石墨氈電極在成本與效率方面的優勢，為現代水處理技術提供了一種高效且經濟的解決方案。

MFC 技術通過微生物代謝有機物來產生電能，這使其特別適用於處理**高有機污染負荷的廢水**，如食品加工廠廢水、工業排放廢水以及農業廢水等。這類廢水中含有機物質，傳統處理方法需要大量曝氣供氧，而 MFC 則能夠**直接將有機物轉化為能源**，減少曝氣設備的運行需求，從而大幅降低能源消耗。

在 MFC 系統中，電極材料的選擇至關重要。**改質石墨氈電極**在成本與效率方面具有顯著優勢。與傳統的電極相比，改質石墨氈不僅能提供**更高的表面積**，增強電子轉移能力，還能以更低的成本實現與昂貴石墨紙相似的發電性能，從而降低整體設備投入成本，使 MFC 技術更具商業應用價值。

隨著科技的進步與環保政策的推動，MFC 技術在廢水處理領域的應用前景廣闊。未來，通過進一步優化電極材料、提升能量轉換效率以及擴大應用範圍，MFC 有望成為**新一代綠色水處理技術**，助力全球廢水處理產業向**低碳、節能、高效**的方向發展。

整合 MFC 技術至現有廢水處理設施，不僅能有效**減少環境污染**，還能實現**廢水資源化與能源回收**，為現代水處理技術提供一種高效且經濟的解決方案，推動環保技術的革新與應用。

陸、結論

一、電極材質

在未改質的電極材料中，產電效率的排序為：石墨紙 > 石墨氈 > 碳布。然而，改質後的石墨氈發電效率明顯高於未改質的石墨氈，且其發電效率與價格較昂貴的石墨紙相當。在污水處理效率方面，排序為：石墨紙 > 改質石墨氈 > 碳布 > 石墨氈。顯示 MWCNT 不僅提升了電極的發電能力，也有助於提高污水處理效率。

且石墨紙價格較高，改質石墨氈以更具成本效益的價格提供了類似的發電效率及有機物降解效率，使其成為一種經濟實惠的替代選擇。

二、電極表面積

由於產電效率大小為： $4*4\text{cm}^2 > 5*5\text{cm}^2 \geq 3*3\text{cm}^2$ ；從 COD 去除率來看，汙水處理效果好壞為： $4*4\text{cm}^2 > 3*3\text{cm}^2 > 5*5\text{cm}^2$ 。因此，在陰極槽及陽極槽皆為 250mL 下，產電效率及淨化廢水效率最高的電極表面積為 $4*4\text{cm}^2$ ，但細微的表面積差異對微生物燃料電池的性能影響不大。

總結:若為了獲得更高的效率，在陰極槽及陽極槽皆為 250mL 下，可以使用電極表面積 $4*4\text{cm}^2$ 的石墨紙作為電極材料，但成本會相對較高。因此，若追求更高的性價比，則建議使用表面積同樣為 $4*4\text{cm}^2$ 的改質石墨氈

柒、參考文獻

- 周廉軒(2022)。改變空氣陰極集電層提高微生物燃料電池性能之研究。國立臺北科技大學:碩士論文
- 楊雲捷(2022)。微生物燃料電池作為生物傳感器線上監測異丙醇應用於生物反應槽之研究。國立臺北科技大學
- 林志達(2021)。應用微生物燃料電池同時處理有機污染物與六價鉻之研究。國立臺北科技大學
- 張庭郢(2024)。聚苯胺改質石墨氈電極作為陰極對微生物燃料電池產電效率的影響。國立臺北科技大學
- 高振豐(2009)。以導電高分子/碳纖維電極開發藍菌光合/代謝作用微生物燃料電池及其晶片之研究。國立成功大學
- 黃埕鈞(2022)。微生物燃料電池串聯之效能最佳化。國立臺北科技大學:碩士論文
- 李明錚(2023)。利用氮氣電漿表面改質微生物燃料電池發泡金屬電極之研究。國立宜蘭大學:碩士論文
- 李淑君(2022)。探討沼澤紅假單胞菌 PS3 菌株促進有機番茄生長與提高土壤微生物燃料電池電能之效果。國立臺灣大學:博士論文
- 石少華(2007)。構築以紫色不含硫菌為微生物電池基礎之生物反應器。國立中興大學:學術論文
- 蘇建宇(2012)。台灣原生微生物混合族群在大型微生物燃料電池中的產電分析及發展微型微生物燃料電池進行產電微生物的快速篩選。國立成功大學:碩士論文
- 王永福(2006)。利用大腸桿菌為觸媒進行醋酸鹽電解之特性與應用。國立成功大學:博士論文
- 張家華(2009)。外加電流對微生物電池產電之影響。國立雲林科技大學:碩士論文
- 鄭力菖(2010)。利用糖類發酵過程製作微生物燃料電池之研究。中臺科技大學:碩士論文
- Artigas-Arnaudas, J., Muñoz, B.K., Sánchez, M. et al. Surface Modifications of Carbon Fiber Electrodes for Structural Supercapacitors. (2022) Appl Compos Mater 29, 889–900.
- Robin M. Allen & H. Peter Bennetto. (1993) Microbial fuel-cells. Volume 39, pages 27–40, Cite this

article

Rezaei, A., et al., Oxygen reduction reaction enhancement in microbial fuel cell cathode using cesium phosphomolybdate electrocatalyst. *Fuel*, 2023. 352: p. 129040.

Peng Liang 1, Xia Huang, Ming-Zhi Fan, Xiao-Xin Cao, Cheng Wang. (2007) Composition and distribution of internal resistance in three types of microbial fuel cells. 77(3):551-8. doi: 10.1007/s00253-007-1193-4.

Ramaraja P Ramasamy, Zhiyong Ren, Matthew M Mench, John M Regan. (2008) Impact of initial biofilm growth on the anode impedance of microbial fuel cells.1;101(1):101-8. doi: 10.1002/bit.21878.

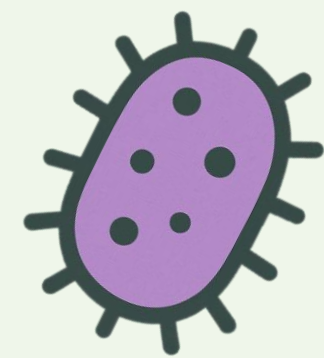
Bruce E Logan, Ruggero Rossi, Ala'a Ragab, Pascal E Saikaly. (2019) Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems.17(5):307-319. doi: 10.1038/s41579-019-0173-x.

Long Zou, Yun-Hong Huang, Zhong-Er Long, Yan Qiao. (2018) On-going applications of *Shewanella* species in microbial electrochemical system for bioenergy, bioremediation and biosensing. 19;35(1):9. doi: 10.1007/s11274-018-2576-7.

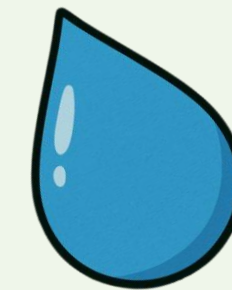
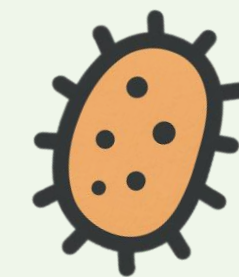
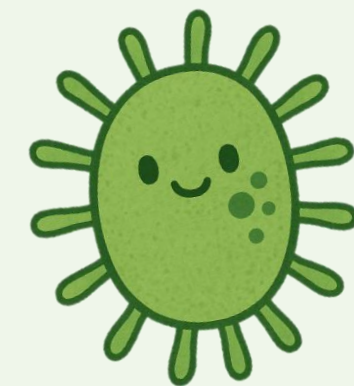
【評語】 052415

本研究採用不同電極之材料於新型微生物燃料電池(MFC)中進行優化與電性分析，亦針對電極比表面積進行調整進而分析其發電效率。於實驗規劃中用不同材質(碳布、石墨紙、石墨氈、改質石墨氈)作為電極以分析其電化學性值與發電表現，然而僅透過不同材質比較其電壓變化較難得知影響因素，建議應先從材料本身之電化學表現或電阻進行分析，且不同材質之表面積不應只用投影面積去計算，其厚度、孔隙與活性位點皆不同，難以直接進行電極間比較。石墨紙及改質石墨氈的電池在相同的培養時間下較不穩定，推測可能為石墨紙材質孔徑過小及MWCNT噴塗不均勻的原因應多加論述。此外，本實驗僅對石墨氈進行多壁奈米碳管之改質，其原因應加以說明，若是因為成本考量所以選用石墨氈，建議可進一步討論改質之成本與石墨紙之差異。

作品海報



新型微生物燃料電池於能源再生及 有機物降解之研發



研究動機

聯合國的永續發展目標包括**SDG 6:淨水及衛生**和**SDG 7:可負擔的潔淨能源**(圖一)。微生物燃料電池 (Microbial Fuel Cells , MFC) 具有降解污水中的有機物及產出綠能並產生乾淨的水等作用，能夠有效助力實現上述兩項目標。而電極材料是微生物燃料電池 (MFC) 重要的基本組件之一，其性能直接影響 MFC 的發電效率。



(圖一)SDG 6:淨水及衛生和 SDG 7:可負擔的潔淨能源 (圖表來源: United Nations)

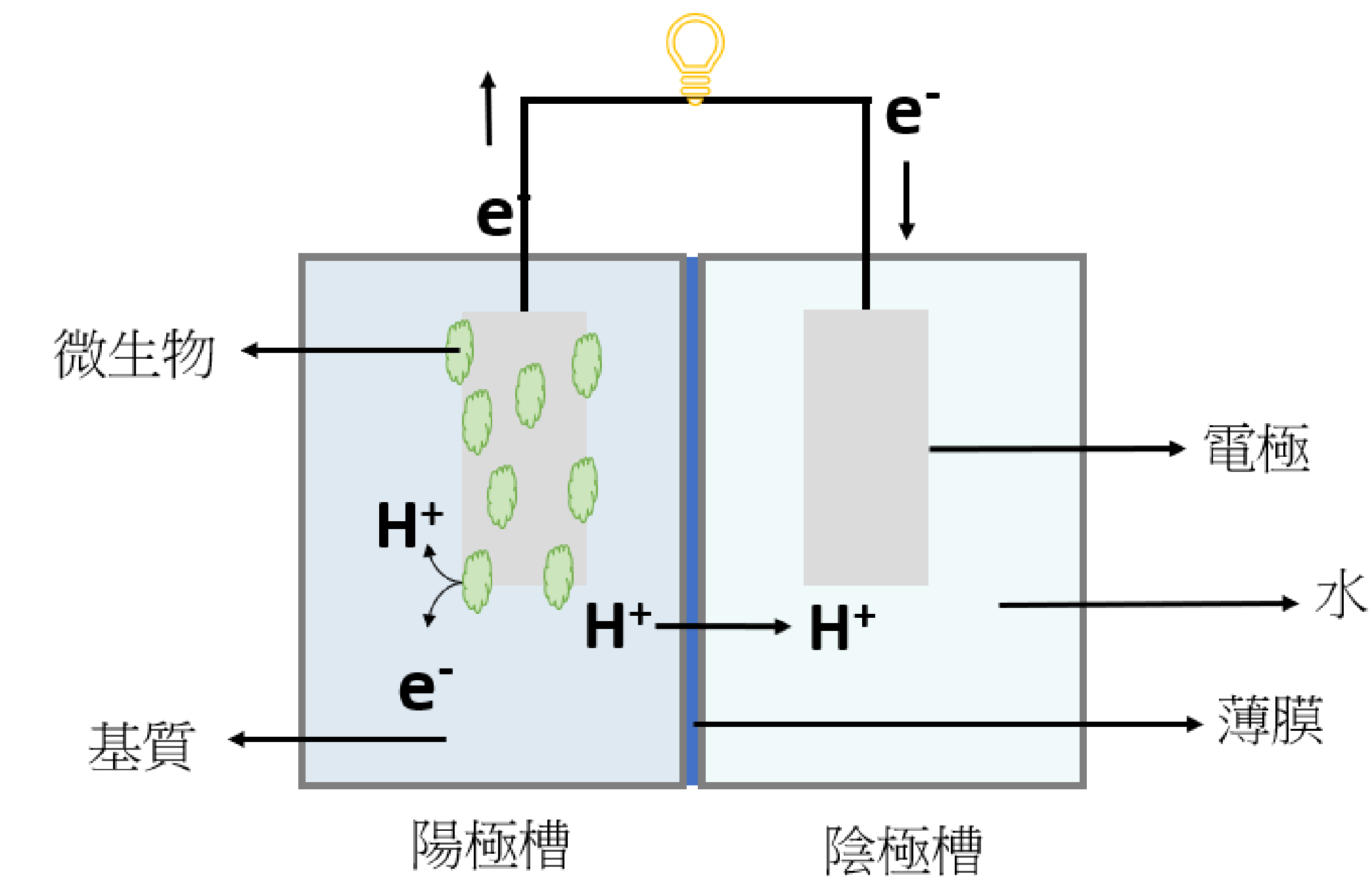
研究目的

本實驗旨在使用取得的碳材料，並透過多壁奈米碳管 (Multiwalled Carbon Nanotube, MWCNT) 對石墨氈進行改質。MWCNT具有優良的導電性並能增加石墨氈的**比表面積**，進而提升 MFC 效能。此外，本研究也探討電極表面積對 MFC 的影響。因此，本實驗的目標如下：

1. 探討出在MFC具有優良產電效能的電極材料
2. 探討出在MFC淨化廢水效率較高的電極材料
3. 比較電極表面積 MFC 產電效能的影響
4. 比較電極表面積 MFC淨化廢水效率的影響

研究方法

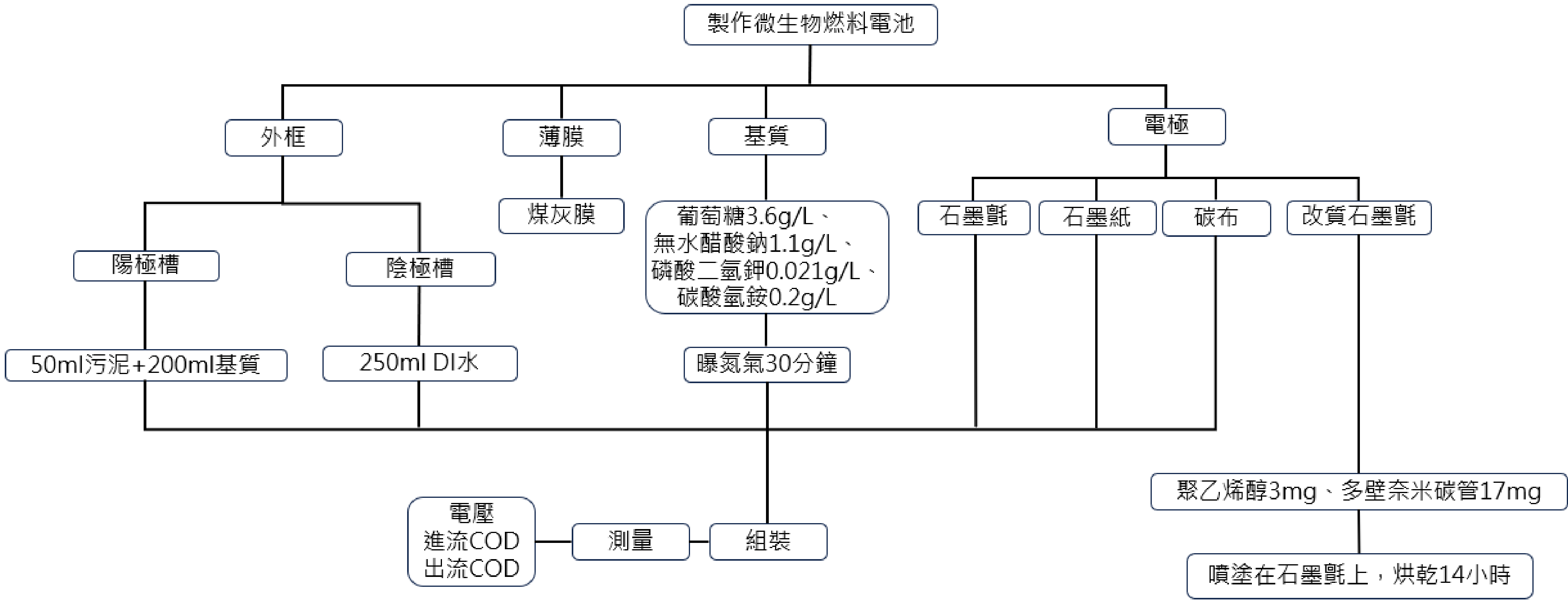
MFC原理概述



(圖二)MFC裝置圖(圖表來源:作者繪製)

- 陽極: $C_6H_{12}O_6+6H_2O\rightarrow 6CO_2+24H^++24e^-$
- 陰極: $6O_2+24H^++24e^-\rightarrow 6H_2O$
- 電極:傳遞電子並讓微生物附著
- 廢水:提供有機物作為微生物的食物
- 薄膜:隔開陰陽兩槽，防止電子、氧氣和其他離子直接通往另一端，讓電子通往導線，並選擇性的只讓質子通過。使電子、質子及氧氣在陰極槽結合，形成乾淨的水
- 微生物:附著在電極上，並利用基質中的有機物來產生電子以及質子

研究流程



(圖三)研究流程圖(圖表來源:作者繪製)

研究步驟

馴養汙泥

使用葡萄糖**3.6g/L**、無水醋酸鈉**1.1g/L**、磷酸二氫鉀**0.021g/L**、碳酸氫銨**0.2g/L**來配置葡萄糖廢水，在 COD 去除穩定後，將微生物維持在穩定

微生物燃料電池組裝

電極改質

- 在 **80°C** 下將 **3 mg** 聚乙烯醇 (PVA) 溶解於 **20 mL** DI 水中，直至完全溶解，加入 **17 mg** 多壁碳納米管 (MWCNT)，充分混合。

組裝

- 準備燃料電池外殼(各250mL)，並插入煤灰膜作為隔膜。
- 陽極槽加入 **50 mL** 厭氧污泥和 **200 mL** 葡萄糖廢水。陰極槽填充250ml DI水。
- 插入電極，並連接至 **1000 歐姆**電阻。
- 密封陽極槽並用鋁箔紙包裹。再對陰極槽曝氣。

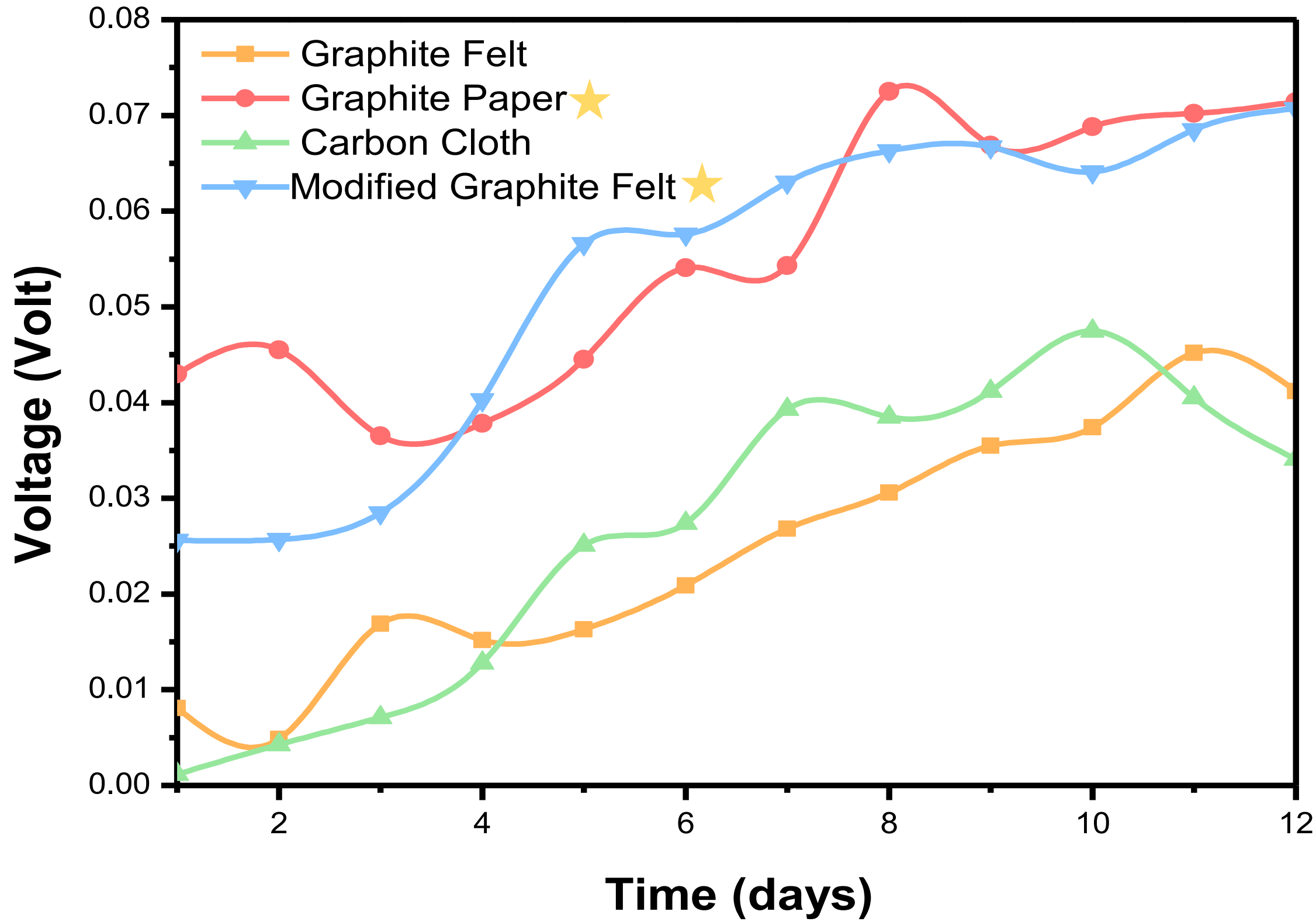
測量數值及意義:

- 電壓 (**Voltage**) :電壓的大小決定了電流流過電路的能力，反映能量強度。
- COD去除率 (**Chemical Oxygen Demand Removal Efficiency**) :COD去除率越高，表示處理系統對有機污染物的去除效果越好。
- 極化曲線 (**Polarization Curve**) :電壓隨電流密度變化的關係。
- 功率密度曲線 (**Power Density Curve**) :功率密度隨電流密度變化的關係。

研究結果

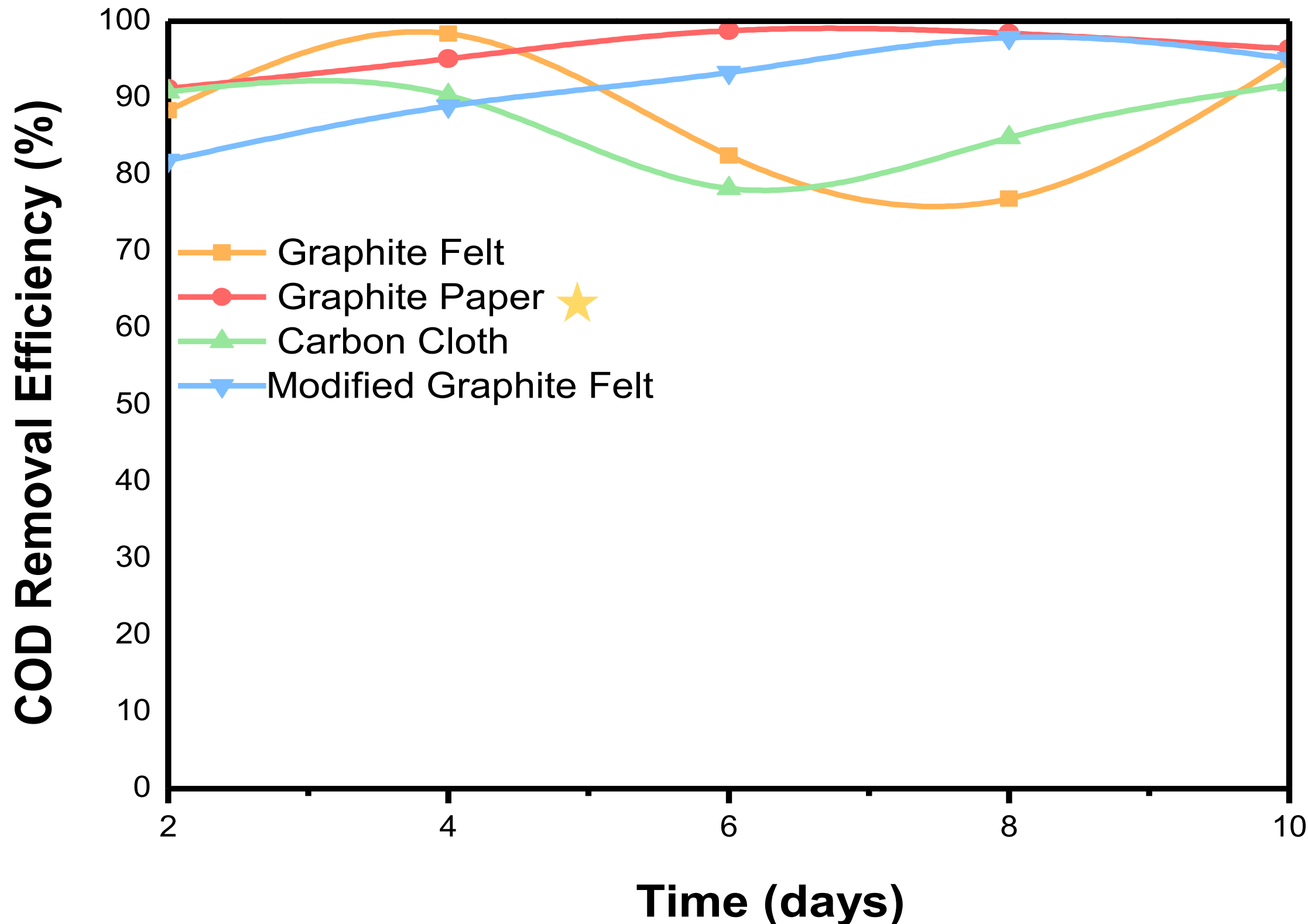
電極材質

電壓



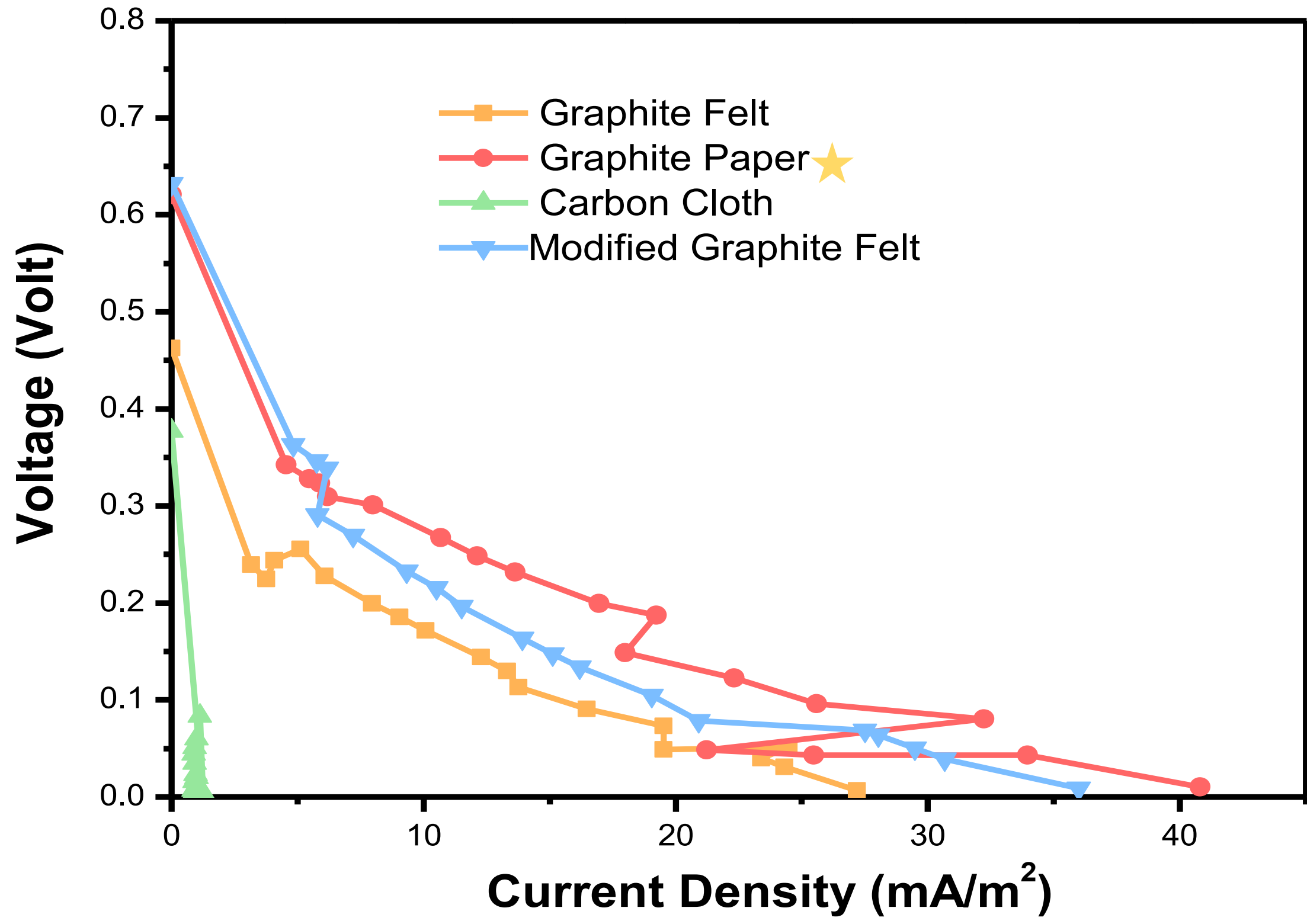
從最後穩定的電壓來看，電壓大小為:石墨紙≥改質石墨氈>石墨氈>碳布。而改質後的石墨氈比改質前電壓提高約56%

COD去除率



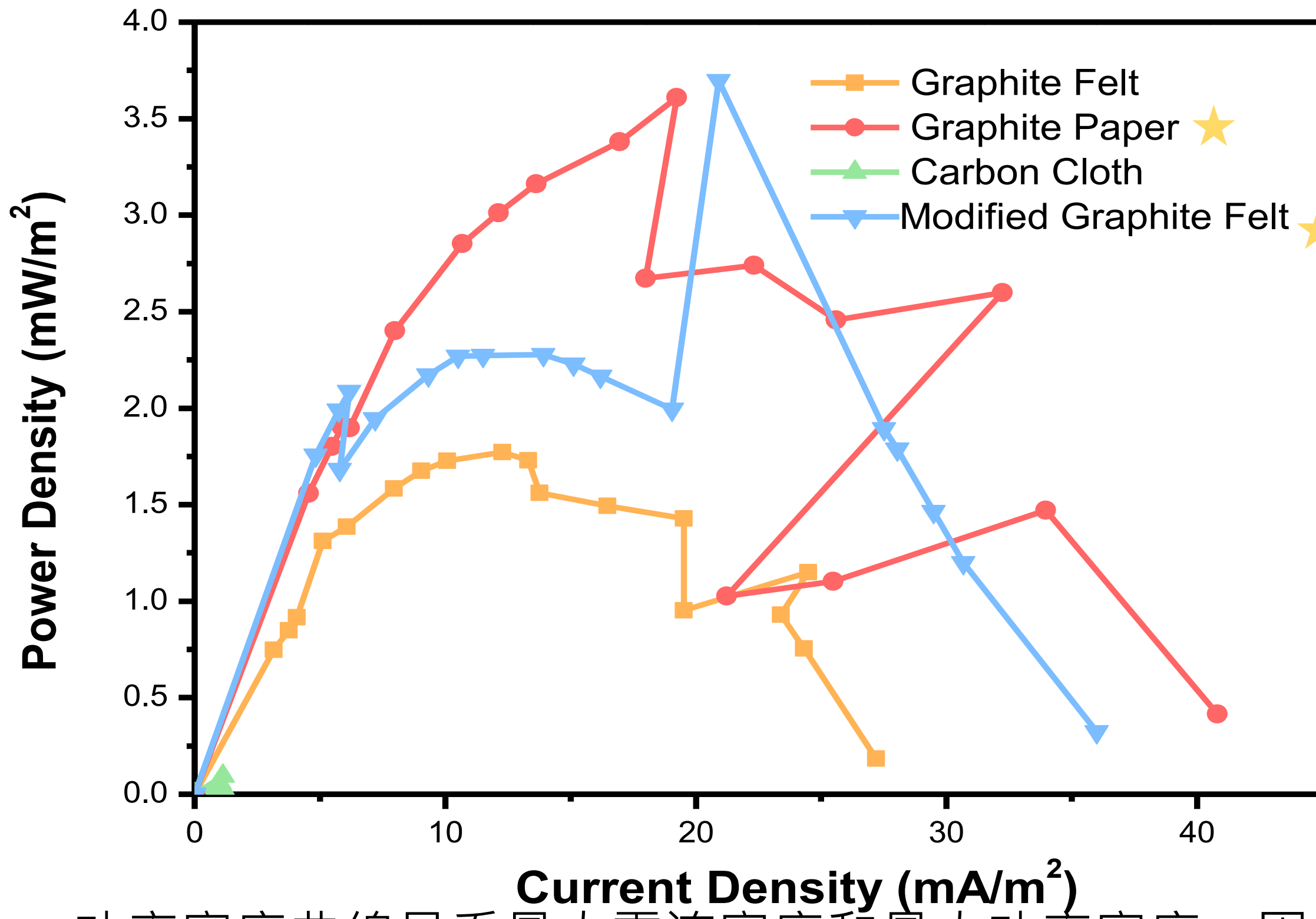
COD去除率越高，表示處理系統對有機污染物的去除效果越好。平均來看，COD去除率最高為石墨紙再者為改質石墨氈

極化曲線



極化曲線優劣為相同電流密度的電壓高低，因此極化曲線為石墨紙最好而改質石墨氈次之

功率密度曲線

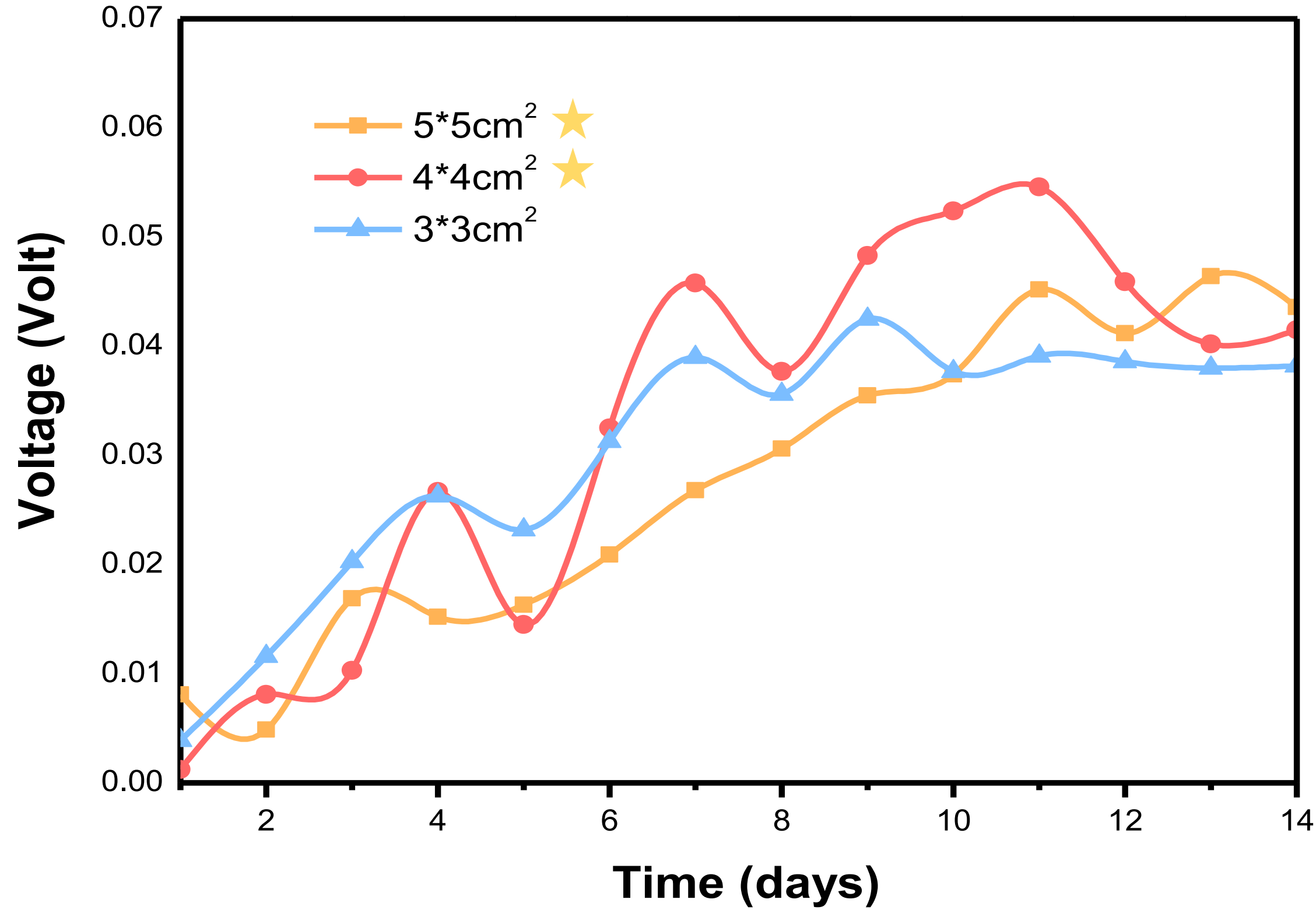


功率密度曲線是看最大電流密度和最大功率密度，因此功率密度曲線的好壞為:石墨紙≥改質石墨氈

小結1:未改質電極的產電效率及有機物降解效率排名為:石墨紙 > 石墨氈 > 碳布。然而，經過改質後的石墨氈，其產電效率及有機物降解效率可大致石墨紙相當。

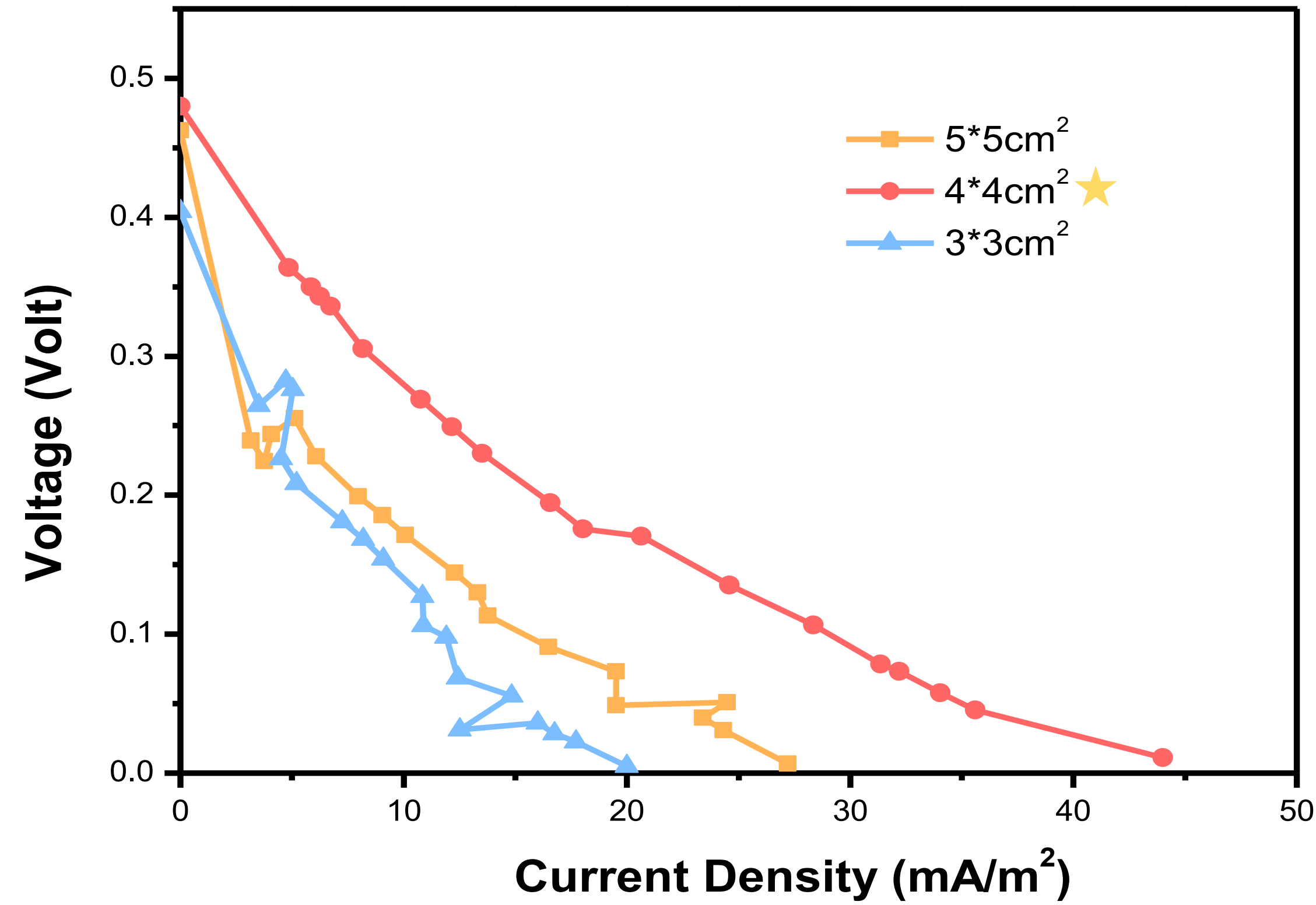
電極表面積

電壓



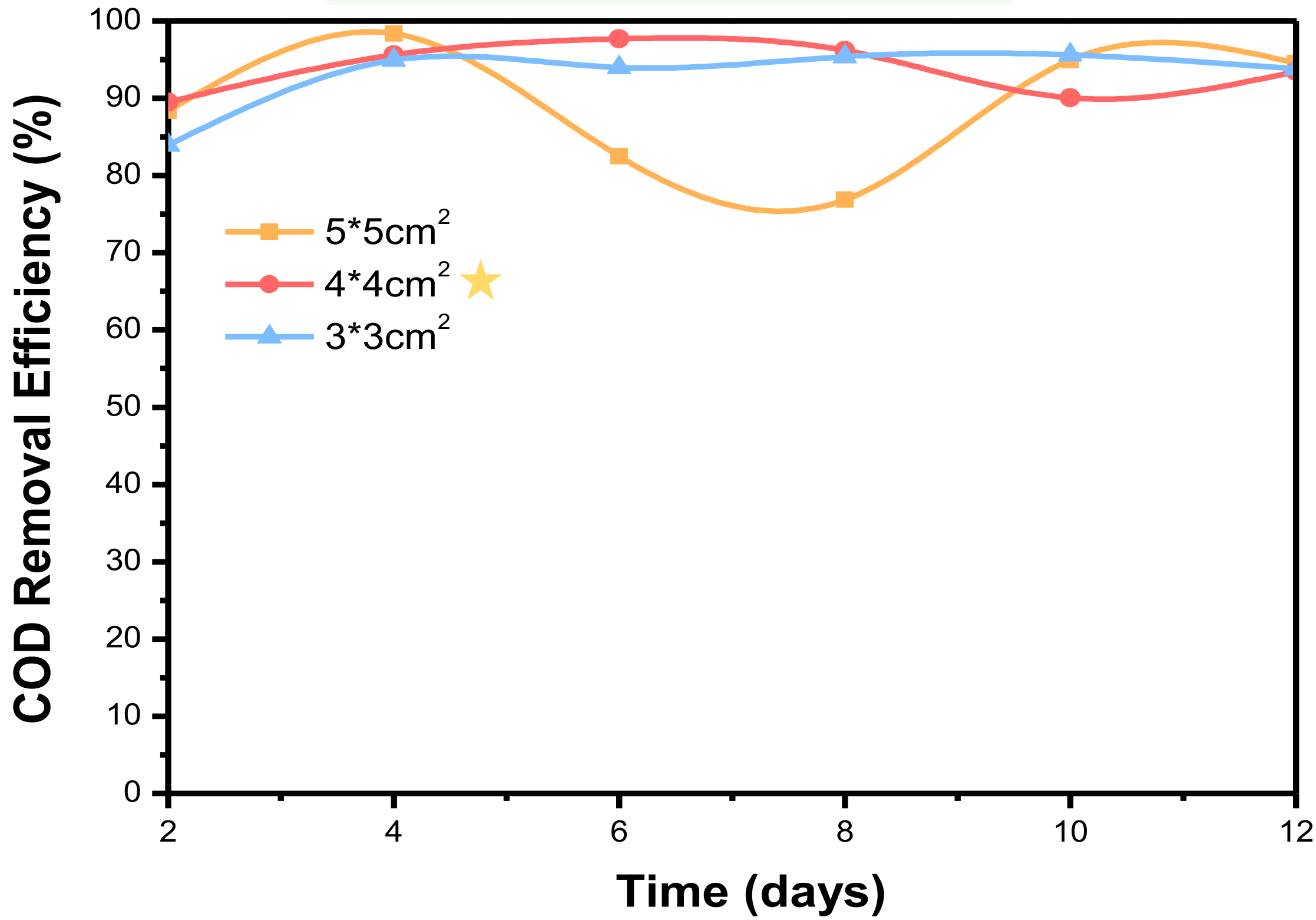
電壓大小為: 5*5cm²>4*4cm²>3*3cm²

極化曲線



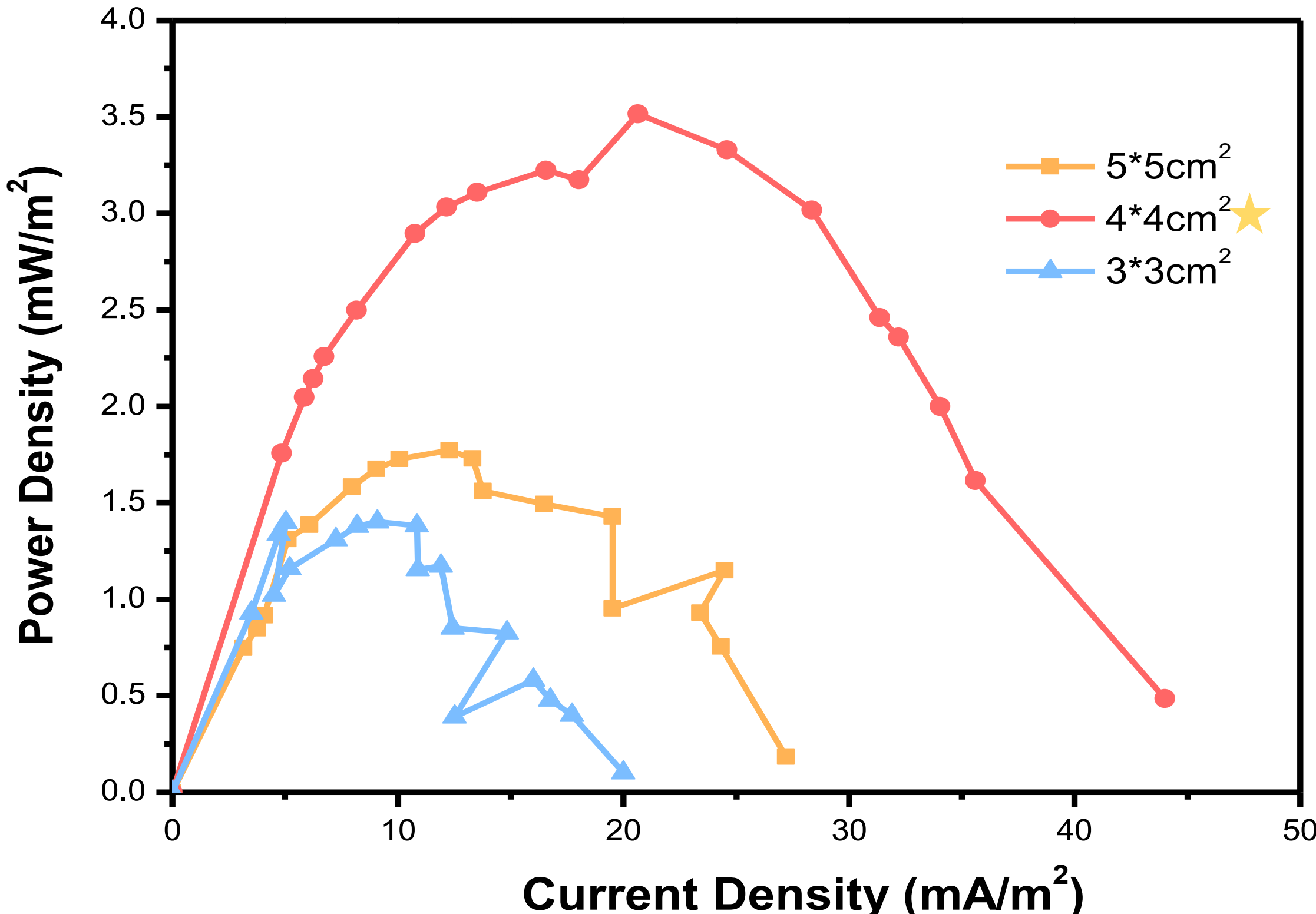
極化曲線排序為: 4*4cm²>5*5cm²≥3*3cm²

COD去除率



平均來看，COD去除率高低為: 4*4cm²>3*3cm²>5*5cm²

功率密度曲線



功率密度曲線排序為: 4*4cm²>5*5cm²≥3*3cm²

小結2:在陰極槽及陽極槽皆為250mL下，產電效率及淨化廢水效率最高的電極表面積為4*4cm²

研究討論

討論一:電極材料如何影響微生物燃料電池的產電及淨化污水的效率？

1. 導電性與內阻：
不同的電極材料（如石墨紙、石墨氈、碳布）具有不同的**導電性與內電阻**，這些性質會直接影響電子在微生物燃料電池中的傳遞效率，進而影響其發電效能。
2. 孔隙結構與微生物附著：
電極的**孔隙大小、分布以及總表面積**會影響微生物在陽極上的附著與生長情況。良好的結構有助於微生物的成長，促進電子傳遞，並提升廢水中COD的去除效果。

討論二:電極表面積如何影響微生物燃料電池的產電及淨化污水的效率？

1. 表面積與傳質效率：
較大的表面積能提供更多微生物附著的位置，有助於提升發電與污染物去除效率。然而，如果電極的孔隙結構或厚度設計不良，反而可能增加內部電阻，導致效率下降。

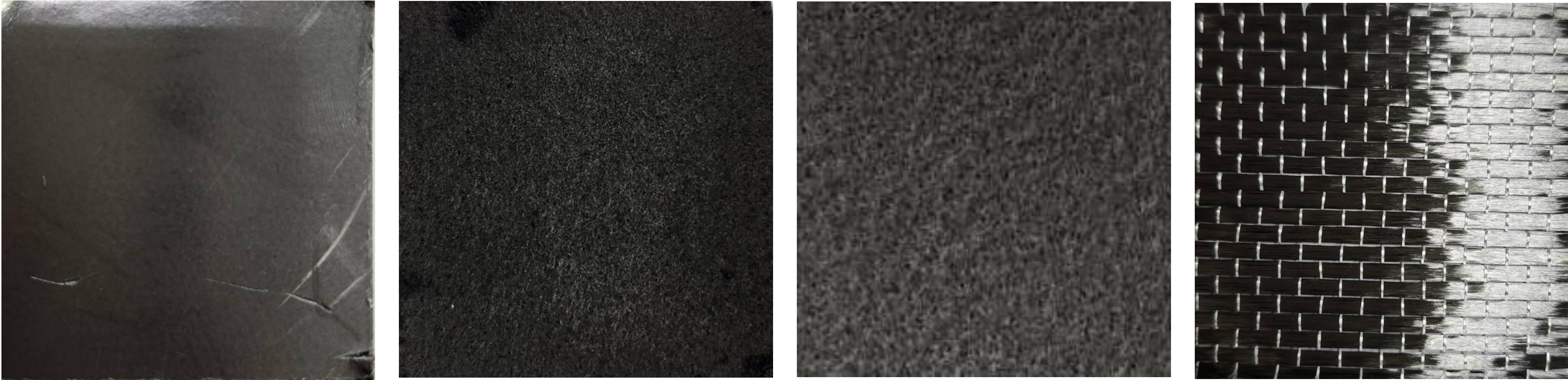
結論 電極材質

根據電壓、極化曲線、最大電流密度和最大功率密度，未改質電極的發電效率排名如下：**石墨紙 > 石墨氈 > 碳布**。然而，經過改質後的石墨氈，其發電效率可大致石墨紙相當。而石墨紙價格較高，但**改質石墨氈以更具成本效益的價格提供了相似的發電效率。這使得改質石墨氈成為一種具成本效益的替代選擇**。而根據COD去除率來看，淨化廢水效率排序為:**石墨紙>改質石墨氈>碳布>石墨氈**，依舊為石墨紙淨化廢水效率最好，但經過改質後的石墨氈，**其淨化廢水效率可大致石墨紙相當**。

下方為各材質價格及照片，石墨紙價格較高，而改質後的石墨氈能提供相近的產電效率，並成本較為低廉，且穩定所需的時間較短，使其成為一種具成本效益的替代選擇。

(表一)各電極材質的價格比例是以石墨紙的價格作為**100%**基準，並將其他材料的價格與之進行比較(圖表來源:作者繪製)

價格/電極材質	石墨紙	改質石墨氈	石墨氈	碳布
	100%	88%	84%	80%



(圖四) 各電極材質圖片。從左至右依序為:石墨紙、改質石墨氈、石墨氈、碳布。(圖片來源:作者拍攝)

電極表面積

根據電壓、極化曲線、最大電流密度與最大功率密度來看，產電效率的排列如下:

4*4 cm² > 5*5 cm² ≥ 3*3 cm²

根據 COD 去除率，淨化廢水效率的排列如下：

4*4 cm² > 3*3 cm² > 5*5 cm²

因此，在陰極槽及陽極槽皆為250mL下，產電效率及淨化廢水效率最高的電極表面積為4*4cm²，但細微的表面積差異對微生物燃料電池的性能影響不大。

建議

若為了獲得更高的電力輸出效率，可以選擇使用**電極表面積為4×4 cm²的石墨紙作為電極材料**。石墨紙的成本相對較高，對於預算有限或追求經濟效益的應用場合來說，可能並非最佳選擇。此外，由於其材料特性，微生物燃料電池在使用石墨紙作為電極時，系統達到穩定輸出所需的時間也會相對較長，可能會影響實驗或應用的時程規劃。

若在成本控制上有較高的需求，或者希望系統能在較短時間內達到穩定狀態，更建議採用表面積同樣為**4×4 cm²的改質石墨氈作為電極材料**。改質石墨氈不僅具備良好的導電性與比表面積，還能提供微生物更佳的附著環境，有助於縮短啟動時間。因此，改質石墨氈在實際應用中仍具有相當高的性價比。

未來應用

微生物燃料電池技術透過微生物代謝廢水中有機物以同時達成污染處理與電能產生，特別適用於處理高有機負荷之廢水，如食品加工業、工業排放與農業廢水等。相較於傳統需高耗能曝氣的處理程序，**MFC 系統可直接將有機物轉換為電能，顯著降低能源消耗**。在電極材料方面，改質石墨氈具備良好的導電性與高比表面積，不僅提升電力輸出效率，亦具備相對低廉的成本，為現代水處理技術提供一項兼具經濟性與效能的可行方案。

參考文獻

- 周廉軒(2022)。改變空氣陰極集電層提高微生物燃料電池性能之研究。國立臺北科技大學:碩士論文