

新竹市第四十二屆中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：生活與應用科學(三)

組 別：國中甲組

作品名稱：點石成金—自製反應裝置實現二氧化碳再利用

關 鍵 詞：3D 列印、二氧化碳、碳捕獲與利用

編 號：

目錄

摘要.....	1
壹、 研究動機.....	2
貳、 研究目的.....	3
參、 研究設備及器材.....	4
肆、 研究過程或方法.....	7
一、 實驗一：二氧化碳於水溶液中的溶解度測試.....	7
二、 實驗二：利用 H-型反應裝置進行二氧化碳還原.....	8
三、 實驗三：利用 Flow Cell 進行二氧化碳還原.....	10
四、 實驗四：利用 3D 列印製作 Flow Cell 反應裝置.....	11
五、 實驗五：Flow cell 產物測試.....	13
伍、 研究結果.....	14
一、 二氧化碳溶解度.....	14
二、 不同反應裝置間的電化學表現比較.....	16
三、 H-Cell 中的二氧化碳還原反應活性測試.....	16
四、 Flow Cell 中的二氧化碳還原反應活性測試.....	17
五、 Flow Cell 產物測試.....	20
陸、 討論.....	21
柒、 結論.....	24
捌、 參考資料及其他.....	27

摘要

本研究利用 3D 列印技術開發一種簡易且可攜式的電化學反應裝置，將大氣中二氧化碳 (CO₂) 轉化為化學品。透過將 CO₂ 轉化為有價值的化學品，我們期待這種技術能解決溫室氣體所造成的全球暖化問題，並減輕其對環境的影響。本研究中討論了二氧化碳在水溶液中的溶解度與 pH 值的關係，並根據觀察到的現象設計數種反應裝置的設計，以提高 CO₂ 的利用率和反應效率；結果顯示使用了氣體擴散層 (GDL) 的反應裝置，能有效的增強反應速率和效能。本研究也展示了 3D 列印在製作高效能 CO₂ 轉化裝置上的便捷性與商用潛力；該裝置能有效轉化 CO₂ 為一氧化碳，其反應的專一性大約為 80%，此方法提供了環境友善的化學品生產方式，為降低溫室氣體提供了一種具經濟性的方案。總結而言，我們的研究發現一個新興技術的發展，有賴於材料、機械、化學及化工等跨領域合作，也為未來相關領域的創新開發提供了寶貴的經驗。

壹、研究動機

隨著石化、民生以及高科技產業工業化的快速發展和人類活動的增加，大氣中的二氧化碳濃度自蒸汽機的發明後不斷上升，逐漸攀升的二氧化碳濃度導致的溫室效應，也對地球的自然生態系統產生了巨大的壓力。因此，為了能在工業技術以及地球環境之間達到平衡，尋找有效的方法來減少大氣中的二氧化碳濃度變得至關重要。二氧化碳還原是一種將二氧化碳加上電子與質子並轉換為有機物質的新方法；透過二氧化碳還原的技術，可以幫助我們減少二氧化碳的排放量、製造有用的化學品。其次，在能源轉換的層面，二氧化碳的還原過程提供了一種將無用的二氧化碳轉化為其他化合物的途徑，這類化合物包含甲醇、乙烯和乙醇等可作為替代燃料的物質；因此，將二氧化碳還原再生成可用的燃料，在永續能源生產上也具有重要意義。除此之外，二氧化碳還原技術的發展與應用對環境治理也極為重要，它不僅可以減少大氣中的二氧化碳含量有助於改善環境質量、促進氣候平衡的恢復還能將二氧化碳再生成為具有經濟價值的化學品。圖 1 顯示應用電化學二氧化碳還原技術後，工業技術發展串連的可能模式。

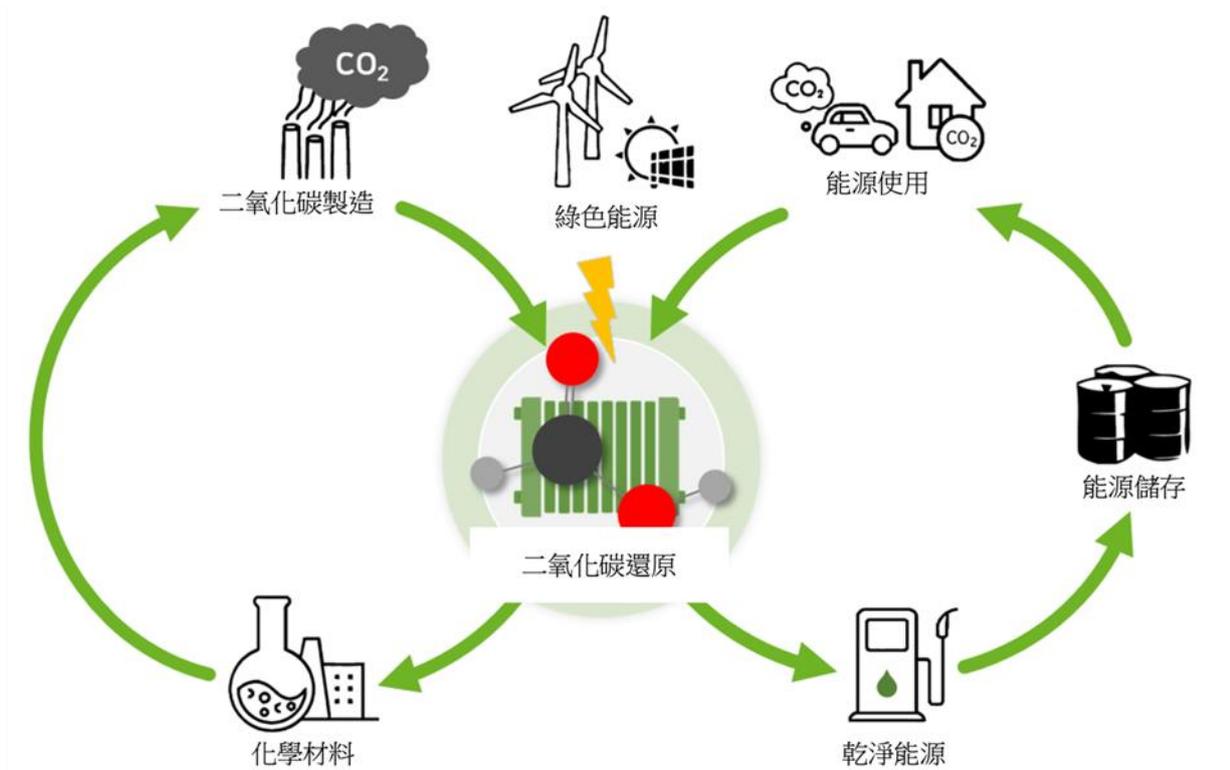
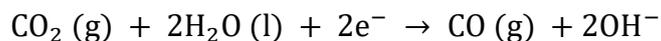


圖 1、二氧化碳還原技術在工業的永續發展中所帶來的可能串連模式。

二氧化碳還原的過程涉及將二氧化碳通過電化學反應轉化為有價值的化學品，這一過程

需要質子 (H⁺) 和電子 (e⁻) 的參與。以二氧化碳還原成一氧化碳為例，二氧化碳得到兩個質子以及電子生成一氧化碳及氫氧根離子，反應式如下所示：



具體來說，二氧化碳在電極上與質子和電子發生反應，生成如甲醇、乙醇等化學品，這不僅有望轉變能源生產方式，同時也是應對全球碳排放問題的一種策略。然而，這個化學轉換過程本身並不自發發生，它需要精確設計的反應裝置來實現。這些裝置的設計必須能夠促進 CO₂ 與質子和電子的有效接觸，從而提高反應效率。因此，開發能夠實現這一過程的高效反應裝置對於推動人工碳循環至關重要，這不僅有助於減少溫室氣體的排放，同時也促進了對再生能源的利用和能源產業的永續發展。

貳、研究目的

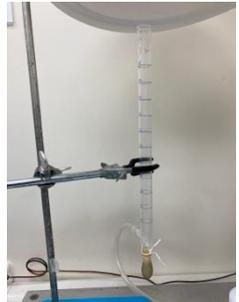
在探索二氧化碳的電化學還原過程中，我們面臨一個主要挑戰：如何有效地將二氧化碳轉化為有價值的化學品。二氧化碳作為一種穩定的化學分子，不論在分子的穩定性以及在水溶液中的溶解度都相當有限。過去的研究已經指出，傳統的 H 型反應槽(H-cell)受限於二氧化碳溶解度的因素，在二氧化碳轉化效率上遠遠達不到實際應用的程度，同時裝置效能亦遠不及新型的流動式反應槽(flow cell)系統。然而，此類研究才剛剛起步，還有許多的關鍵問題有賴解決。首先，電化學反應要成功進行，必須有適當的電解液和充足的二氧化碳供應。其次，二氧化碳在大多數電解液中的溶解度不足，導致反應效率低下。為了提高這一過程的可行性，我們必須尋找能夠提升二氧化碳溶解度並增加反應效率的方法。

本研究旨在設計和測試不同的電化學反應器設計，以找到最適合 CO₂ 還原的系統。我們將研究不同的電解液配方，嘗試增加二氧化碳的溶解度，並探索不同類型的催化劑對反應效率的影響。此外，我們將根據文獻回顧和理論計算，創建一系列模擬二氧化碳溶解度的圖表，以此來指導我們的實驗設計。

通過這項前瞻性研究，我們希望能夠克服目前電化學二氧化碳還原技術面臨的障礙，並為實現更高效的二氧化碳轉化過程鋪平道路，進而對抗全球氣候變化並推動能源產業向可持續方向發展。

參、研究設備及器材

一、 實驗器材與藥品

		
<p>氫氧化鉀</p>	<p>鎳網</p>	<p>碳酸氫鉀</p>
		
<p>質量流量控制器</p>	<p>3D 列印機</p>	<p>超音波振盪器</p>
		
<p>電化學工作站</p>	<p>噴筆</p>	<p>乙醇</p>
		
<p>氣相層析儀</p>	<p>白金電極</p>	<p>氣泡式流速計</p>

		
銀/氯化銀電極	加熱板	碳紙
		
pH 計	銀粉	高分子黏著劑(Nafion)
		
奈米碳顆粒	Parafilm	微量滴管
		
絕緣膠帶	銅膠帶	樣品瓶

表格 1、實驗器材與藥品

二、 電極片製備方法

本研究採用噴塗法將觸媒材料製備於電極片上，流程示意圖如圖 2，成品的實際照片如

圖 3 所示，詳細流程如下所述：

- (一). 將碳紙裁切為 $2.7 \times 2.7 \text{ cm}^2$ 大小的電極片，作為電化學反應的催化劑載體
- (二). 製備觸媒材料的漿料，首先將觸媒(銀奈米顆粒)、黏著劑、以及溶劑透過表 2 的比例混合
- (三). 將上述混合的漿料於超音波振盪器振盪 30 分鐘使其質地達到均勻
- (四). 將碳紙於加熱板加熱 120 度 30 分鐘使碳紙中多餘的水氣去除，去除水分後秤量重量備用
- (五). 利用噴筆將前述製備的漿料噴塗於碳紙上
- (六). 重複噴塗漿料，每噴一次都必須烤乾秤重確認，直至觸媒的附載量達到 1.5 mg/cm^2
- (七). 最後將碳紙烤乾減少溶劑重量對噴塗覆載量計算的影響，並計算實際噴塗量

漿料配比	
銀奈米觸媒	109.35 mg
導電奈米碳顆粒	12.15 mg
乙醇溶劑	8 ml
高分子黏著劑(Nafion)	218.7 mg

表格 2、配置噴塗漿料所使用的物質比例

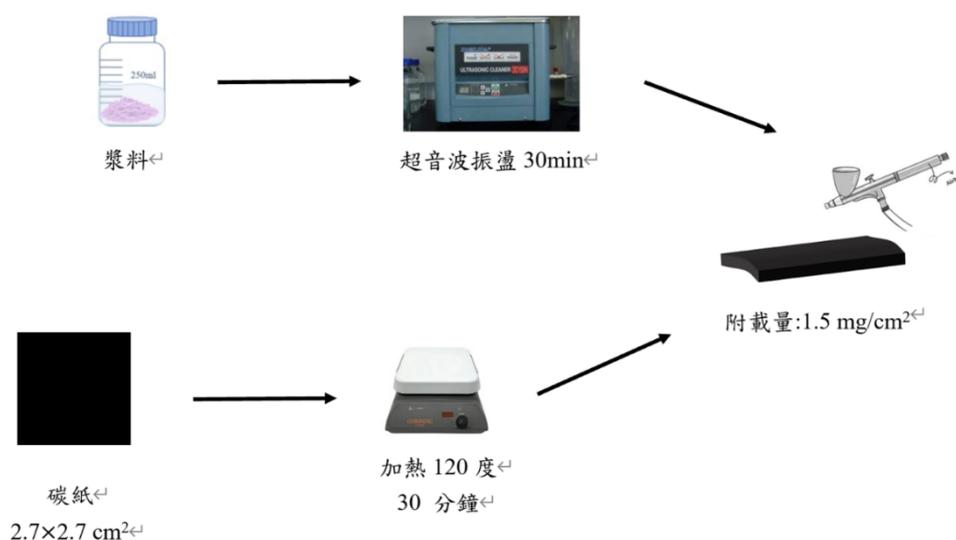


圖 2、製備電極片流程示意圖

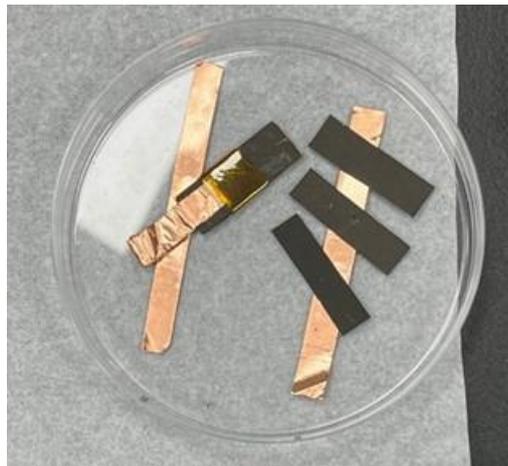


圖 3、噴塗製備電極片

肆、研究過程或方法

一、 實驗一：二氧化碳於水溶液中的溶解度測試

(一). 實驗背景

當二氧化碳溶解在水溶液中，會生成碳酸根以及碳酸氫根，並且會使得水溶液的 pH 值發生改變，而 pH 值與二氧化碳溶解度之間的關係主要體現在酸鹼性物質的溶解過程中。pH 值是衡量溶液酸性或鹼性的一個指標，其定義為溶液中氫離子濃度的負對數。當溶解一個酸性或鹼性物質時，它可能會影響溶液的 pH 值，進而影響其他物質的溶解度。這是因為溶解度不僅取決於溶質與溶劑之間的相互作用，還受到溶液中其他離子的影響。

對於酸性或鹼性物質，其溶解過程可能伴隨著離子的生成，這些離子會改變溶液的 pH 值。例如，溶解一個弱酸或弱鹼時，不完全離解的特性意味著溶液中存在著未離解的分子和離解產生的離子。pH 值的變化反映了這些離子的濃度，進而可以用來推算未離解分子的濃度，也就是溶解度。

(二). 實驗步驟

1. 在燒杯中加入 200 ml 的去離子水
2. 架設曝氣裝置如圖 4，將二氧化碳以 20 mL/min 的速率通入水中
3. 記錄水溶液每分鐘的 pH 值變化，直到 pH 值達到平衡為止

4. 利用 pH 值計算回推二氧化碳在水中的溶解度

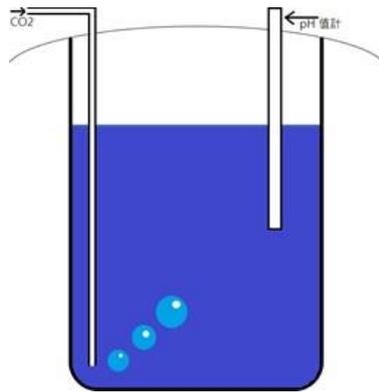


圖 4、二氧化碳溶解度實驗裝置示意圖。

二、 實驗二：利用 H-型反應裝置進行二氧化碳還原

(一). 實驗背景

H-Cell (或稱 H 型反應槽) 是一種常用於電化學研究的裝置，特別是在進行氣體反應 (如二氧化碳還原) 的研究中。H-Cell 由兩個半電池組成，這兩個半電池通常通過一個離子交換膜或鹽橋相連，以允許離子通過但阻止電解液和反應產生的氣體混合。

在進行二氧化碳還原實驗時，一側的半電池中充滿含二氧化碳的電解液，並放置工作電極；另一側則放置對電極。當電流通過電池時，二氧化碳在工作電極表面發生還原反應，產生如甲醇、乙醇或其他有價值的化學品。同時，在對電極發生氧化反應。離子交換膜或鹽橋確保了電荷的平衡，允許離子在兩個半電池間移動，但阻止了電解液的混合，從而保持了反應的獨立性和純度。H-Cell 的設計使其特別適用於研究氣體參與的電化學反應，因為它可以精確控制反應條件，如氣體壓力、溫度和電解液的組成，從而深入研究反應機制和優化反應條件。

而循環伏安法 (CV) 是一種通過改變電位來觀察物質的氧化還原電流方向的技術。這個過程通常是透過施加一個循環的電位來進行，首先從一個起始電位開始，以固定的速率增加到一個終點電位，然後以相同的速率回到起始電位，這個過程構成一個循環。透過這種方法，我們可以繪製出物質的 CV 曲線，從中分析可逆的氧化反應。當電位從低向高掃描時，會觀察到物質產生的還原峰，這幫助我們確定物質在哪些電位下發生還原反應。這裡還要說明電

流跟反應速率的關係是什麼。

在 CV 曲線上，電流的大小直接關聯到反應速率——電流越大，意味著在該電壓下，反應的速率越快。這是因為電流的產生來自於電化學反應中電子的轉移，電子轉移的數量越多，反應進行得越快。進一步地，CV 曲線上的峰值電流和對應的峰值電壓提供了量化反應速率和反應進行電位範圍的重要參數。峰值電流的高低可以反映出反應的活性程度，而峰值電壓的位置則與反應的熱力學特性相關。

(二). H-Cell 反應裝置介紹

H-Cell 反應裝置是一種電化學研究中常用的工具，特別是在探索氣體與電解液之間的反應時。這種裝置得名於其獨特的結構，看起來像英文字母"H"，由兩個分開的半電池室組成，這兩個室通過一個離子交換膜或鹽橋相連。這樣的設計允許在獨立控制的環境下進行實驗，每個室可以裝有不同的電解液和/或氣體，從而提供對實驗條件精確的控制。

在 H-Cell 裝置中，工作電極和對電極分別放置於這兩個室中。當施加電壓時，一個半電池室中的電極會促使氣體（例如二氧化碳）在電解液中還原，而另一個半電池室則進行相對應的氧化反應。離子交換膜或鹽橋的作用是保持電解液的分隔，同時允許離子穿過以完成電路，從而使反應得以進行。

(三). 實驗步驟

1. 將製備好的銀觸媒電極片裁切為 $1 \times 2.7 \text{ cm}^2$ 大小
2. 利用絕緣膠帶將電極片不反應的區域遮蔽，留下 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 大小的反應區域，確保反應面積固定
3. 在燒杯中加入 200 ml 的氫氧化鉀電解液
4. 用 Parafilm 將燒杯口密封，使反應裝置維持氣密
5. 將以下三種電極連接電源供應器，工作電極：電極片，參考電極：Ag/AgCl，輔助電極：白金電極)
6. 將氣體管線插入 parafilm 只需小洞讓他進去的空氣等於出來的空氣
7. 通入氫氣和二氧化碳以觀察電化學二氧化碳還原反應的活性

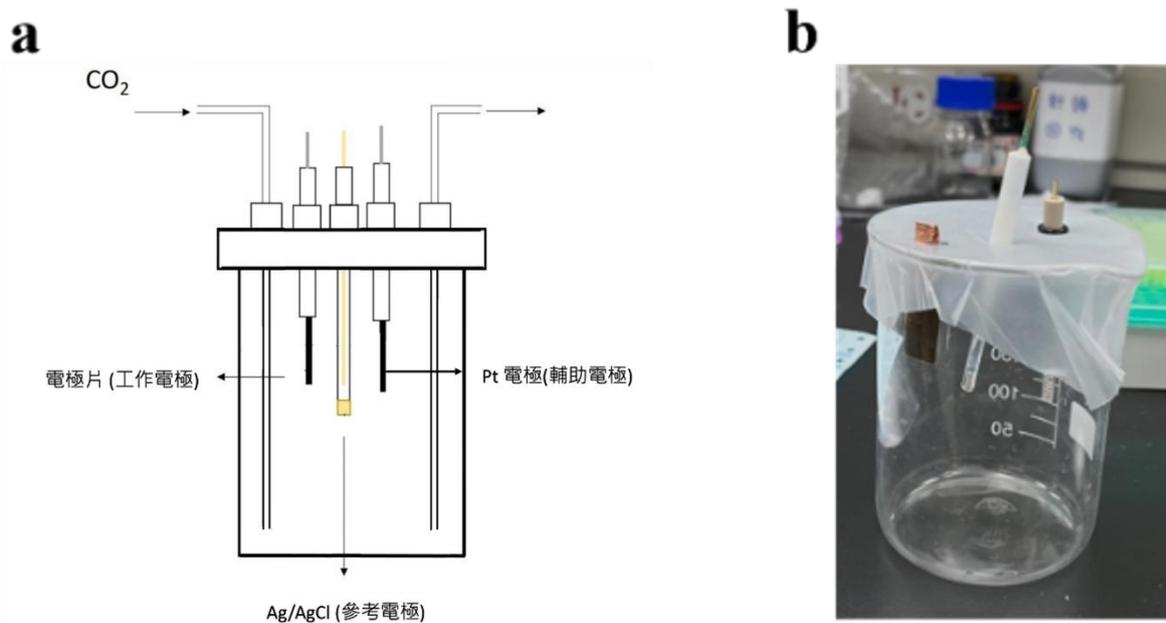


圖 5、(a)簡易 H-cell 示意圖 (b)實驗裝置

(四). 實驗觀察

利用三電極系統測試工作電極與參考電極間的電位差，觀察陰極在發生反應時的電化學特性變化。為了減少氧氣在裝置中的氧化還原影響實驗數據，要另外使用 Parafilm 包住燒杯口和通入氫氣減少電解液與大氣的接觸。使用白金電極是因為鎳網會在電解液當中氧化還原反應。

三、 實驗三：利用 Flow Cell 進行二氧化碳還原

(一). 實驗背景

Flow Cell 技術在電化學研究與應用領域中扮演著重要角色，特別是對於涉及氣體如二氧化碳轉化的反應過程。這種技術的核心優勢在於其能夠透過流動的電解液持續地將反應物送達電極表面，同時也將生成的產物從電極表面移走，這樣不僅提高了反應效率，也減少了反應物的積累和產物對反應的抑制效應。Flow Cell 的設計允許更高效的質量傳輸，對於那些受質量傳遞限制的反應來說，這一點尤其重要，因為它能夠有效提升反應速率。

此外，Flow Cell 系統的另一大優勢是其提供了對反應條件如流速、溫度和壓力的精確控制，這對於優化反應過程和實現反應的規模化非常關鍵。這種控制能力，結合其對質量傳輸

的改善，使 Flow Cell 成為一種靈活且高效的電化學反應平台，適用於從二氧化碳轉化到水分解、有機合成乃至金屬回收等一系列電化學反應。

Flow Cell 技術的發展為電化學領域帶來了新的研究方向和應用可能，不僅提高了特定反應的經濟效益和實用性，也為實現更加環境友好和資源高效的化學轉化過程開闢了道路。隨著技術的不斷進步和創新，Flow Cell 有望在電化學能源轉換和存儲、環境治理等多個重要領域發揮更大的作用。

(二). Flow Cell 反應裝置介紹

Flow Cell 裝置設計擁有三個腔室分別通入氣體、陰極電解液和陽極電解液，與 H-Cell 的不同之處是他引入氣體擴散層的概念。氣體擴散層可以減少二氧化碳擴散的距離，增加反應效率。Flow Cell 的三電極系統放置方式如下圖所示，工作電極具備氣體擴散層並置於氣體與電解液的交界處，而離子交換膜和標準的 H-Cell 裝置形式一樣，是置於陰極電解液和陽極電解液交界處。

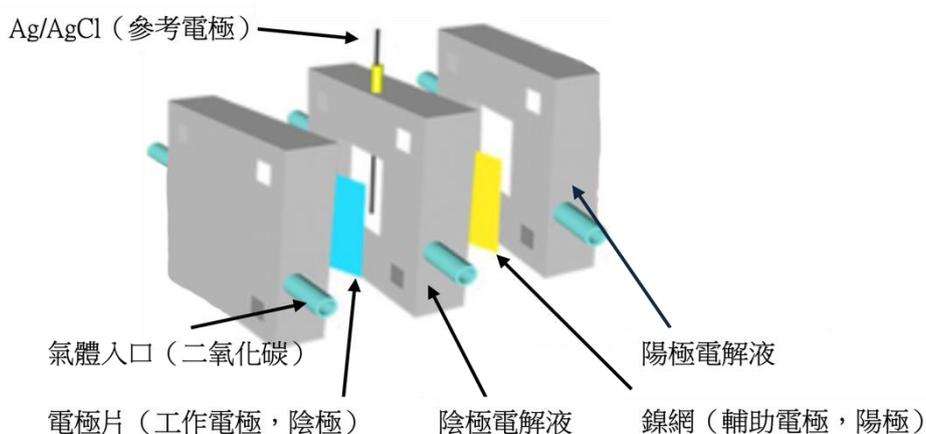


圖 6、Flow cell 裝置示意圖

四、 實驗四：利用 3D 列印製作 Flow Cell 反應裝置

(一). 實驗背景

傳統的機械製造方法是將材料透過銑床、車床加工，將塊材進行裁切、鑽孔、打磨等加工後成為工具元件，此製造過程稱由於將多餘的材料去除而稱為減材製造。相對於減材製造，增材製造則採用了相反的邏輯，利用液態或軟性的材料由下而上、由小而大的製造出所需的

工具元件；其中 3D 列印技術即是增材製造的典型例子。現在所使用的 3D 列印技術最早可追溯到 1981 年名古屋工業研究所的小玉秀男的發明，並且該技術在 1980 年代開始蓬勃發展。於今已有超過四十年的發展歷程，技術也逐漸成熟、可靠，並逐漸將使用範圍擴展到各個領域，包含機械、醫療相關的製造上。

增材製造的生產過程與傳統方式不同。以 3D 列印來說，第一步是在電腦輔助設計(CAD)軟體上設計產品；接著將產品相關的設計數據，匯出 / 下載 STL 檔，以便後續 3D 列印時使用。

(二). 反應器設計

當設計用於 3D 列印的圖樣時，我們需要考慮許多關鍵因素，以確保最終裝置的功能性和耐用性。墊片的尺寸必須精準，以便電解液不會溢出。這不僅涉及外部尺寸，還包括厚度和內部孔洞的大小，這對於確保組件穩定性和密封性至關重要。

接下來，開孔的位置、大小和形狀必須根據電極的具體要求仔細規劃。這一點尤其重要，因為任何偏差都可能影響電極的性能或與其他部件的連接。確保這些開孔的精確度是保障整體設計功能性的關鍵。

連接管線的方式也需細心考量。管線連接不僅要確保緊密無漏，還要方便未來的維護和更換。這可能需要設計特殊的接頭或考慮使用特定材料來增強接合處的耐久性。此外，管線布局應盡量簡潔，避免不必要的彎曲或縮短，以減少潛在的磨損和壓力損失。

最後，使用傳統螺絲固定時可能會遇到一些麻煩，特別是當它們不是方形的時候，這使得鎖緊過程變得更加困難。因此，我正考慮改用卡榫連接方式。在這種情況下，墊片的厚度和卡榫的緊密度變得尤為關鍵。這要求卡榫的設計必須精確，以確保它們既能夠緊密結合，又不會因過於鬆弛而導致電解液溢出。

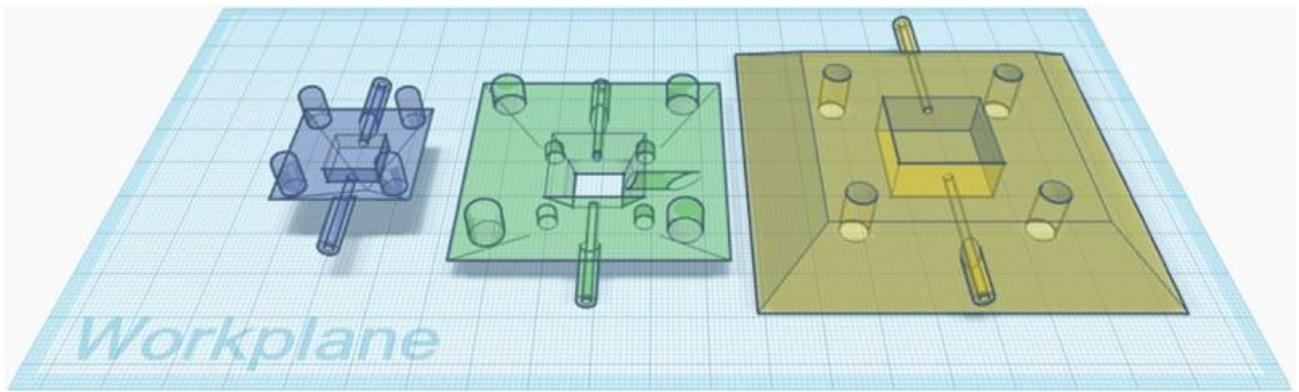


圖 7、卡榫設計的 Flow-Cell 反應裝置

(三). 實驗步驟

1. 利用免費的 3D 建模軟體設計反應裝置
2. 透過光固化式的 3D 列印機將模型列印備用
3. 組裝後測試反應裝置的可行性

五、 實驗五：Flow cell 產物測試

(一). 實驗背景

氣相層析法由於其高靈敏度、高分辨率和快速分析的特點，被廣泛應用於環境監測、工業生產、食品安全、藥物分析等領域。對於二氧化碳的分析，GC 技術可以提供準確和可靠的測定，對於碳排放的監測、氣候變化研究以及食品和飲料工業中碳酸含量的檢測等都非常重要。利用適當的層析管柱和檢測器，GC 可以對二氧化碳進行高效的分離和精確的定量分析。

(二). 實驗原理

1. 樣品輸入：樣品通常是在一定壓力下通過注射器注入 GC 裝置的。如果樣品是氣態的，如二氧化碳，則可以直接注入。如果樣品是液態或固態，則需要先將其轉化為氣態。
2. 載氣：GC 裝置使用載氣（通常是氮或氫）來攜帶樣品通過一根填充有固定相（固體或液體）的層析管柱。載氣與樣品混合後一起進入層析管柱。
3. 分離：在層析管柱內，樣品中的不同組分會因為與固定相的相互作用而以不同的速率移動，從而被分離。二氧化碳和其他可能存在的氣體在層析管柱內的移動速率不同，因此

可以被分離。

4. 檢測：分離後的組分會依次進入檢測器。對於二氧化碳的檢測，常用的檢測器是熱導檢測器（TCD）和火焰離子化檢測器（FID）。熱導檢測器是基於氣體導熱性的變化來檢測組分的，而火焰離子化檢測器則是利用組分在火焰中燃燒產生離子，從而檢測到組分。
5. 數據處理：檢測器產生的信號被轉化為電子數據，通過電腦軟件處理後，以層析圖的形式展現。每一個峰代表一種特定的組分，而峰的面積或高度與該組分的濃度相關。

(三). 實驗步驟

1. 將利用 3D 列印的 flow cell 反應裝置組裝並通入電解液及反應氣體
2. 利用電化學工作站提供特定電流進行二氧化碳還原反應，並將 flow cell 氣室的出口端通過緩衝瓶和冷凝管再進到氣相層析儀
3. 將氣相層析儀分析的數據結合檢量線計算產物法拉第效率(FE%)



圖 8、利用 flow cell 測試產物裝置圖

伍、研究結果

一、 二氧化碳溶解度

二氧化碳 (CO_2) 在水中的溶解度相對較低，這意味著水只能溶解有限量的二氧化碳。當二氧化碳氣體遇到水時，它們會進行一種稱為物理溶解的過程，一部分二氧化碳分子會進入水中，形成所謂的碳酸 (H_2CO_3)。

二氧化碳在水中的溶解會使水的 pH 值下降，因為溶解的二氧化碳 (CO_2) 與水 (H_2O) 反應形成碳酸 (H_2CO_3)，碳酸是一種弱酸，它能夠進一步離解成氫離子 (H^+) 和碳酸根離子 (HCO_3^-)，

從而增加了水中的 H^+ 濃度，導致 pH 值下降。pH 值與 H^+ 濃度呈對數關係，pH 值下降表示 H^+ 濃度增加。

利用紀錄的二氧化碳加入的時間與 pH 值的關係圖可以利用公式來推斷二氧化碳在水中的溶解量。

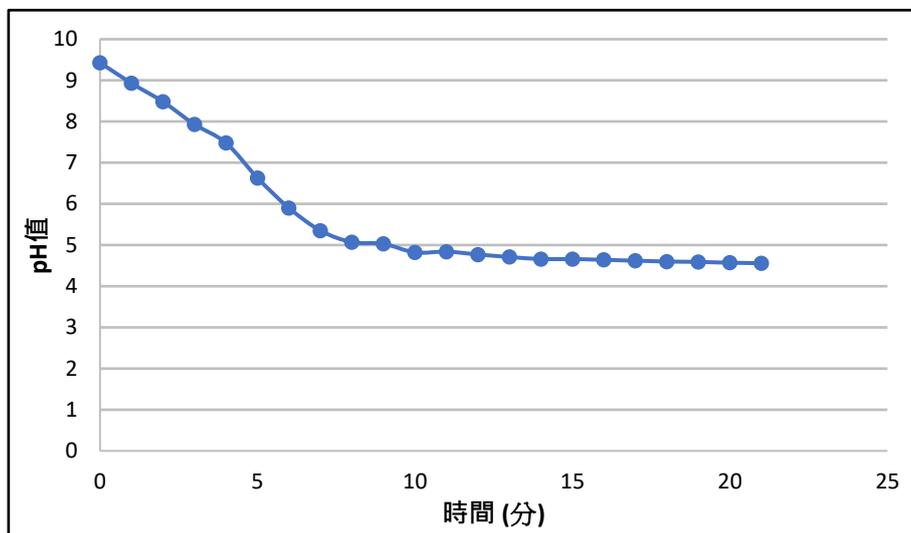
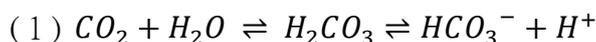


圖 9、二氧化碳通入時間與 pH 值關係圖

要利用 pH 值推算 CO_2 的溶解率，可以透過以下關係和步驟：

(一). 碳酸的解離平衡：



(二). 亨德森-哈塞爾巴爾赫方程 (Henderson-Hasselbalch equation)：

$$(2) pH = pKa + \log \left(\frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} \right)$$

(3) 在 CO_2 溶解系統中，pKa 是碳酸的酸解離常數的負對數，約為 6.35

根據上述方程，如果知道水中的 pH 值、碳酸的 pKa 值以及相關離子的濃度，就可以計算出二氧化碳在水中的溶解度。



$$pH = 4.56 \Rightarrow [H^+] = 10^{-4.56} = 2.75 \times 10^{-5}$$

$$pH = pKa + \log \frac{[HCO_3^-]}{[H_2CO_3]}$$

$$\Rightarrow 4.56 - 6.35 = \log \frac{[2.75 \times 10^{-5}]}{[H_2CO_3]}$$

$$\Rightarrow [H_2CO_3] = 10^{6.35-4.56} \times 2.75 \times 10^{-5} = 0.0017 M$$

$$CO_2 = 0.0017 + 2.75 \times 10^{-5} = 0.001723 M$$

從實驗數據可觀察出，二氧化碳在純水當中溶解度很低。

二、不同反應裝置間的電化學表現比較

銀/氯化銀(Ag/AgCl)參考電極校正成可逆氫電極公式如下

$$V_{RHE} = V_{Ag/AgCl} + 0.197 + 0.0592 \times pH$$

在我的實驗中使用銀/氯化銀電極 (Ag/AgCl) 作為參考電極進行循環伏安法 (CV) 測試是一種常見的做法。參考電極在電化學測量中起著關鍵的作用，因為它提供了一個穩定的參考點，以測量工作電極的電位。銀/氯化銀電極因其穩定性和準確性而廣泛應用於各種 pH 值下的電化學測量。在循環伏安法測試中，當在不同的 pH 值下進行實驗時，掃描的電位範圍 (即 CV 圖的範圍) 會有所不同。

三、H-Cell 中的二氧化碳還原反應活性測試

二氧化碳在水溶液當中溶解度極低，導致在使用 H-Cell 時會影響到效率，即使電極片的反應效率極佳，低濃度的二氧化碳也會影響到它的反應效率。

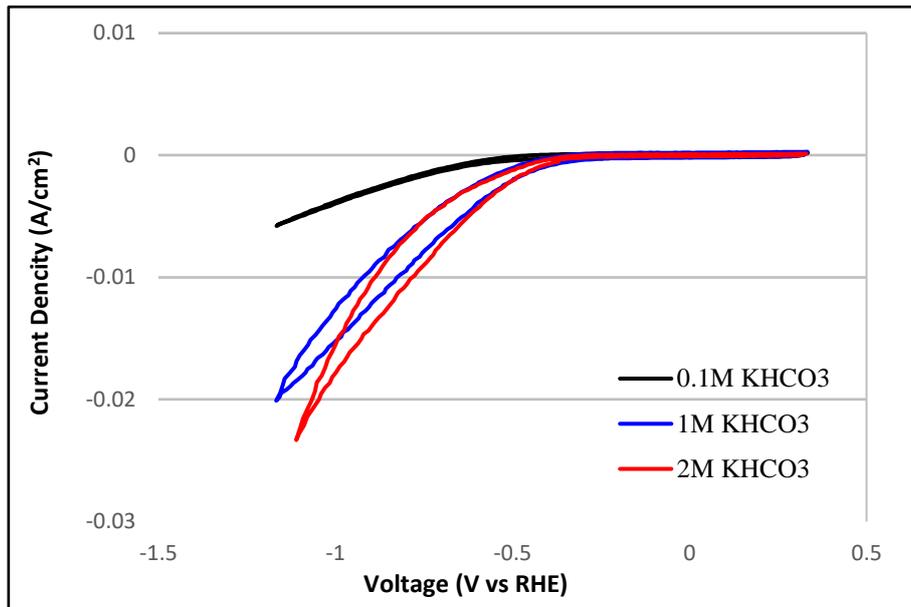


圖 10、H-Cell 在不同電解液濃度的電化學表現

在使用 0.1 M KOH 電解液時，其較高的電阻（約 55.0）可能會限制二氧化碳還原反應的效率，主要原因是 KOH 的導電性不足。而在 1 M KOH 電解液中，電阻降至大約 11.0，這提高了導電性。由於 2 M KOH 和 1 M KOH 的電阻相近，因此使用 1 M KOH 更為合適。在 H-Cell 設計中，二氧化碳需要溶解在電解液中，以便與電極片進行還原反應。然而，由於電解液中二氧化碳的溶解度相對較低，這也會影響電極片達到其最高效率的能力。

四、 Flow Cell 中的二氧化碳還原反應活性測試

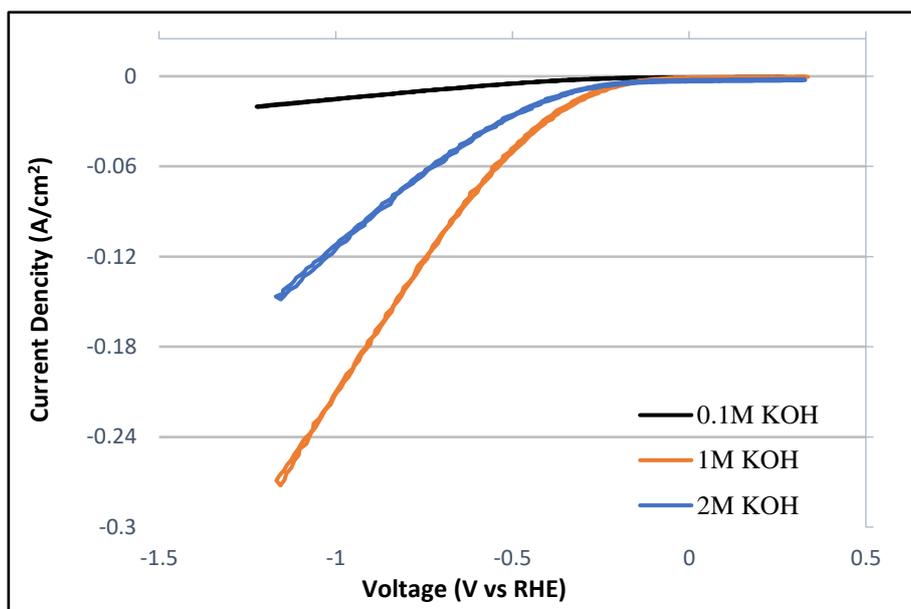


圖 11、Flow cell 在不同電解液濃度的電化學表現

當在 Flow Cell 中使用高濃度的電解液時，的確會遇到與 H-Cell 類似的情況，即隨著電解

液濃度的提高，反應效率也隨之提升。這是因為在較高濃度的氫氧化鉀(KOH)電解液中，電解質的濃度增加，進而提高了離子的傳導性。這意味著在電解過程中，離子在電極之間的移動速度更快，從而增加了反應速率和整體效率。

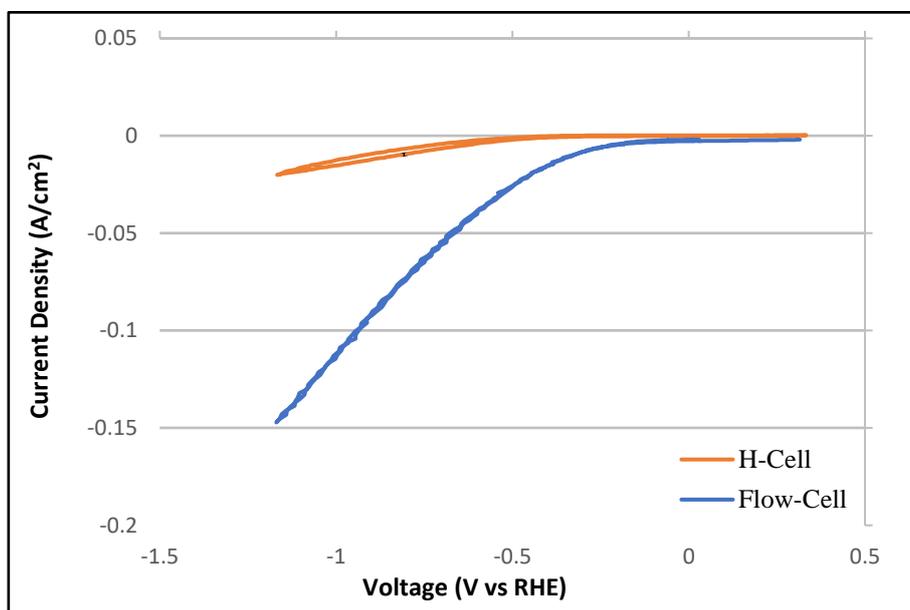


圖 12、不同反應裝置的電化學表現比較

Flow Cell 確實是一種進階的電化學反應器設計，旨在解決傳統 H-Cell 設計中遇到的問題。在 Flow Cell 的設計中，特別注重改善氣體與電解液之間的交互作用，這在二氧化碳還原反應中尤為重要。

在 Flow Cell 中，氣體不需要穿過厚厚的液體層就能接觸到電極。這樣的設計縮短了二氧化碳分子進入電解液並到達反應表面的距離，因此 Flow Cell 相較於傳統的 H-Cell 在電阻方面通常具有較低的值，從而加快了二氧化碳的溶解速率和電化學反應的進行。此外，流動式的設計還允許連續或控制地供應新鮮的二氧化碳，這對於維持反應效率和穩定性至關重要。

總之，Flow Cell 提供了一種有效的方法來提高電化學反應的效率，特別是在二氧化碳還原和類似的過程中。這種設計通過改善氣體和電解液之間的交互作用，不僅加快了反應速度，還提高了整體過程的效率。

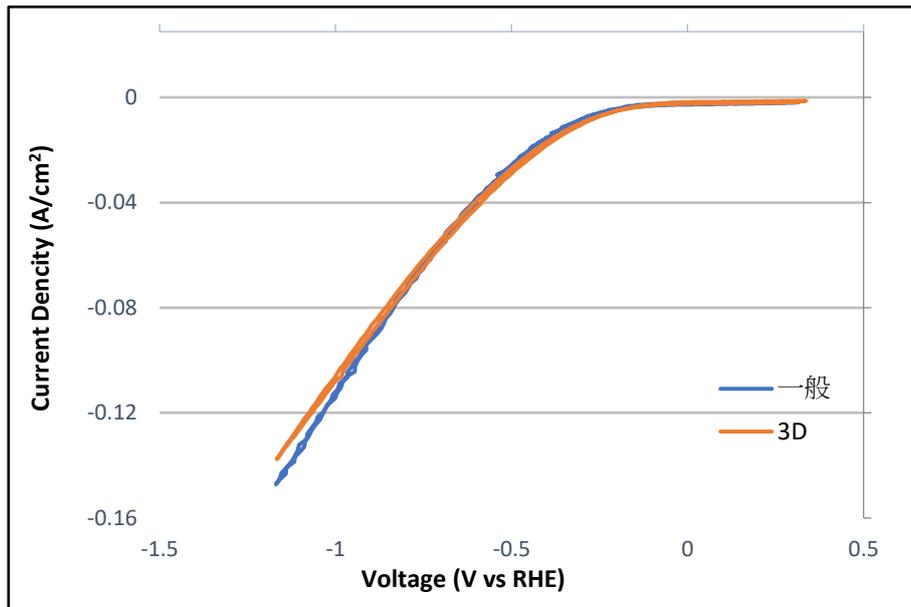


圖 13、利用 3D 列印製作 flow cell 的電化學表現

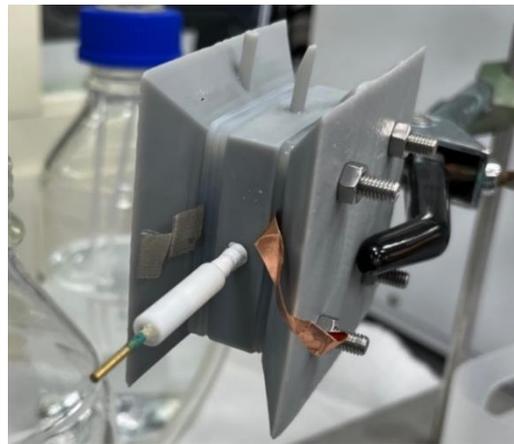


圖 14、螺絲設計的 3D 列印 flow cell

我製作的裝置沒有顯示出顯著的效率損失，這是一個積極的發現，表明 3D 列印技術在此類應用中的可行性。然而，我面臨的主要挑戰是如何有效地將 3D 列印出來的部件固定在一起。嘗試解決這一問題的過程中，我最初選擇了使用卡榫的方法來連接各部件，因為這種方法不需要額外的空間就能將部件固定在一起，看似是一種節省空間且簡便的解決方案。然而，卡榫連接方式存在一定的局限性，包括公差問題，這可能會影響組件間的精確配合，從而影響裝置的密封性能。此外，長期使用卡榫連接的部件可能會出現磨損，進一步降低裝置的穩定性和密封性。這種連接方式還可能無法有效防止電解液等流體從裝置的隙縫中溢出，對裝置的性能和可靠性構成挑戰。因此，雖然 3D 列印提供了創新和靈活的製作 Flow-Cell 反應裝置的方法，但連接技術的選擇對於確保裝置的穩定性和密封性非常關鍵，顯示在這種應

用中可能需要探索其他更適合的固定或密封技術。

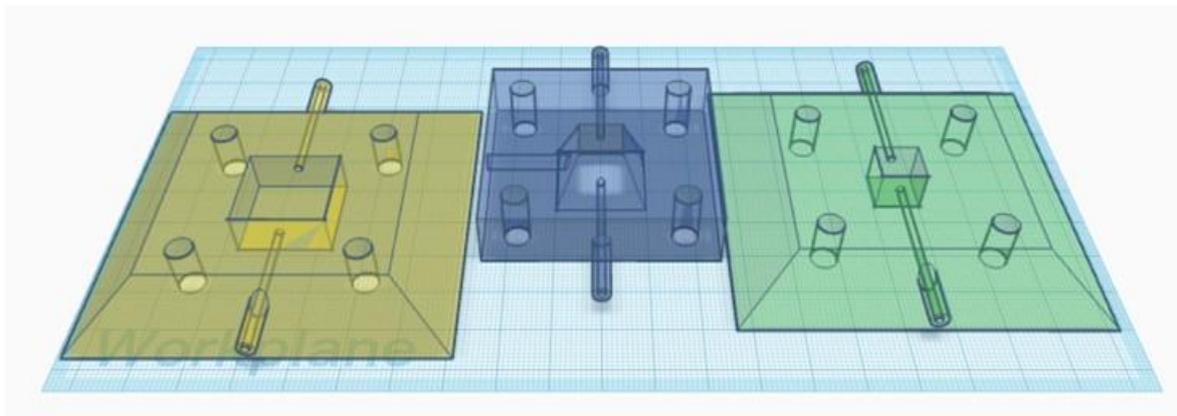


圖 15、螺絲設計的 3D 列印 flow cell 3D 圖

設計理念在實際應用中可能會遇到的問題。在 3D 列印領域，這種問題尤為常見，因為原型製作的便利性有時會讓設計者忽視物理界限或材料的限制。在你的案例中，卡榫連接作為一種無需額外固定件的快速和簡便的裝配方式，理論上是一個很好的解決方案，特別是考慮到 3D 列印允許複雜形狀的無縫集成。在使用此設計結構的做法，可以增加反應裝置的置的做法是利用摩擦力來使三層的裝置可以和在一起可以使

然而，實際應用中，卡榫的精度和緊密度可能受到列印材料特性、列印解析度以及設計公差的影响，這些都可能導致無法達到完全密封的狀態。



圖 16、卡榫設計的 3D 列印 flow cell

轉向使用螺絲設計是一種解決這一問題的實用方法，它提供了更強的密封能力和重複使用性。螺絲連接可以精確控制緊固力度，從而在保證密封性的同時，也允許了裝置的可拆卸性和維護性。

五、 Flow Cell 產物測試

在使用流動式反應裝置(Flow Cell)反應器進行化學反應時，了解反應最終生成的還原產物是非常重要的。這意味著，對於任何在流動式反應裝置中進行的反應，不僅要關注反應的進

程和條件，如反應時間、溫度、壓力、反應物濃度等，還需要對反應完成後生成的產物有一個清晰的認識。

使用銀觸媒製備的電極片來還原二氧化碳是一種高效的方法，因為它只會將二氧化碳還原成一氧化碳。這個過程的關鍵在於選擇合適的電極材料來控制化學反應的路徑。在電化學還原二氧化碳的過程中，電極材料的性質會影響反應的選擇性和效率。

銀電極在這方面表現出色，因為它們能夠高選擇性地促進二氧化碳向一氧化碳的轉化。這種選擇性的原因是銀電極表面對於形成一氧化碳相較於其他可能的產物提供了一個更優勢的反應路徑。因此，當使用銀電極時，產生的主要產物是一氧化碳，而不是其他副產物。至於氫氣的生成，它通常來自於水的電解過程，而不是二氧化碳的還原。在電解水過程中，水分子被分解成氧氣和氫氣。理論上，如果電解系統中只有二氧化碳還原反應發生，並且使用的是銀電極，那麼不應該產生氫氣。氫氣的產生可能表示系統中同時進行了水的電解，或者使用的電解條件促進了水分子的分解。

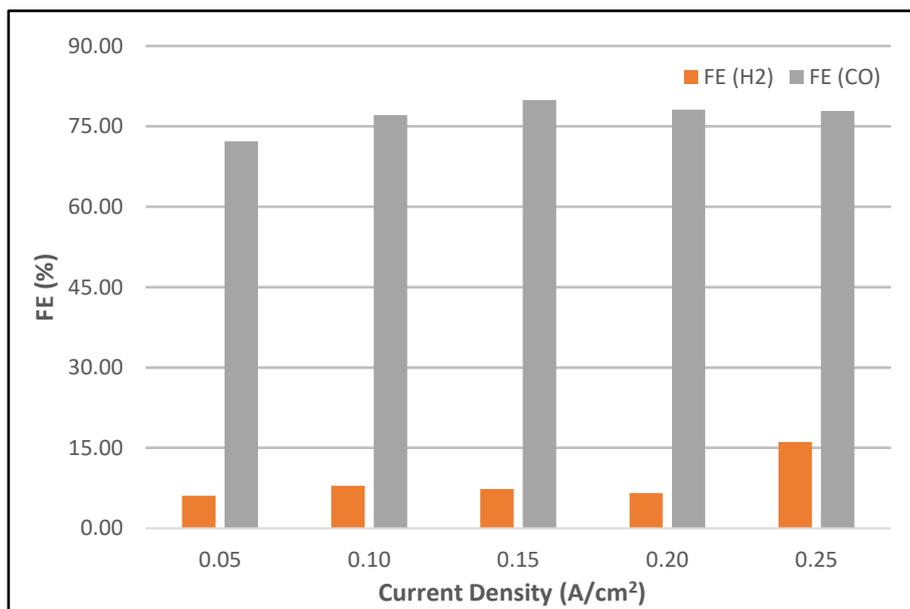


圖 18、flow cell 在不同電流密度下的產物比例

陸、討論

➤ 實驗一

H-Cell 之所以在效率上比 flow cell 更高的一個主要原因，在於二氧化碳在水中的溶解度

不足。在靜態電解槽的設計中，由於二氧化碳與電解液的接觸時間相對較長，這有助於二氧化碳在有限的條件下盡可能多地溶解於水中，從而提高反應的可進行性。相反，在流動電解槽系統中，由於液體流動的設計，二氧化碳與電解液的接觸時間較短，可能導致二氧化碳的溶解度不足，進而影響到整體的電化學轉換效率。因此，二氧化碳在水中的溶解度成為了影響這兩種電解系統效率差異的關鍵因素之一。

➤ 實驗二

在室溫條件下，二氧化碳在水中的溶解度非常低，這對於使用 H Cell（靜態電解槽）進行電化學實驗形成了一個顯著的限制。這種低溶解度限制了二氧化碳與電極片的接觸機會，導致無法充分利用電極的潛在催化效能。H Cell 的設計特點在於它包含兩個分開的腔室，這使得實驗中生成的產物可以有效地被分離，從而防止產物再次發生氧化反應，這對於提高反應的選擇性和產物的純度是非常有益的。

在實驗中使用鎳網作為電極材料時，可能會遇到鎳網本身參與反應，進而導致鎳離子釋放到水中，這會對實驗數據的準確性產生負面影響。為了解決這一問題，將鎳網替換為鉑（Pt）電極是一種有效的策略。鉑電極具有優良的化學穩定性和催化性能，不會像鎳網那樣參與反應或釋放金屬離子，因此可以提高實驗的可靠性和穩定性。此外，氧氣在電解液中的存在對反應過程也有顯著影響，它甚至在低電壓條件下也能引發氧化還原反應，這不僅會干擾主要的電化學反應，還可能降低產物的選擇性。因此，在進行電化學實驗時，控制和管理實驗條件以減少氧氣的影響是提高反應效率和產品純度的關鍵因素。通過精心選擇和管理電極材料以及優化實驗條件，可以顯著提高電化學轉化過程的性能。

➤ 實驗三

氣體擴散層是提供二氧化碳氣體、催化劑表面和電解質三相邊界的一種手段。利用這種方法可以加速二氧化碳融入水中的速度，讓電極片可以反映更多的二氧化碳增進反應效率。在不同的電解液濃度當中也會影響到看他在氧化還原的過程。

氣體擴散層是一種特別設計的結構，用於促進二氧化碳氣體、催化劑表面和電解質之間的有效接觸，從而形成一個三相邊界。這種設計有助於加快二氧化碳在水中的溶解速度，使

得電極表面能接觸到更多的二氧化碳，從而提高反應的效率。此外，使用不同濃度的電解液會影響這個過程，包括氧化還原反應的進行，這意味著電解液的選擇和濃度是影響整體反應效率的一個重要因素。

➤ 實驗四

利用卡榫結構在某些情況下確實可能無法達到完全密封的效果，尤其是在需要高度密封性的應用中，如電解槽這樣的電化學設備，不夠嚴密的結合可能會導致電解液洩漏，進而影響實驗結果或者設備的安全運行。

轉而使用鎖螺絲固定結構是一個很好的解決方案。鎖螺絲提供了一種既穩固又可調整的方式來確保設備各部分之間的密封。當配合適當的墊片使用時，鎖螺絲能夠均勻地施加壓力，從而使墊片發揮最大的密封效益。這種方法不僅可以有效地防止電解液洩漏，還能夠根據需要調整壓力，以適應不同的工作條件和維修需求。

使用軟管來代替螺絲固定是一個創新且實用的方法，尤其是在處理 3D 列印部件時。3D 列印材料，根據其類型和打印參數，可能不夠堅固，對於壓力和應力的承受能力有限。特別是當使用螺紋和螺絲進行固定時，過大的壓力可能會導致 3D 列印的接口處斷裂或損壞，這會影響組件的整體結構穩定性和使用壽命。

軟管的使用提供了一種更加柔和且靈活的連接方式。軟管可以在一定程度上吸收和分散施加於接口的壓力，減少直接對 3D 列印部件造成的應力。此外，軟管連接的方式也能夠提供一定的密封性能，有助於防止電解液洩漏，且安裝和拆卸過程相對更為簡便和快速。

此外，軟管連接方式還具有調整靈活、安裝方便的優點。它可以根據需要輕鬆地調整長度和方向，適應不同的設計和空間限制，從而在保護 3D 列印部件的同時，也提高了整體結構的適應性和實用性。

➤ 實驗五

實驗表明，使用銀製的電極片進行二氧化碳還原反應時，可以高度選擇性地生成一種產物，即一氧化碳。這是因為銀電極具有特定的表面性質和催化活性，能夠促進二氧化碳向一氧化碳的轉化，同時抑制其他可能的反應路徑，從而達到高選擇性的效果。

變更不同的電極片材料，例如使用金、銅、鎳等材質，可以實現對二氧化碳還原反應的產物種類的調控。不同的電極材料由於其獨特的電化學性質和表面催化特性，對反應的選擇性和效率會有顯著影響。例如：銅電極在二氧化碳還原過程中，能夠生成多種碳基產物，包括甲醇、乙烯和甲烷等，這是由於銅具有獨特的催化活性，能夠促進多電子轉移反應。

通過選擇電極材料，可以根據需要調節二氧化碳還原反應的方向和產物的種類，從而開發出高效能、高選擇性的電化學轉化系統。這種方法在合成燃料和化學品的電化學製造過程中具有重要的應用前景，有助於提高資源的利用效率和實現化學品的可持續生產。

柒、結論

➤ 實驗一

通過定速將二氧化碳慢慢引入水中，我們可以根據亨利定律預測其在電解液中的溶解度。亨利定律表明，在一定溫度下，溶解於液體中的氣體濃度與其在液體上方氣體的壓力成正比。然而，這一定律也顯示了二氧化碳在水中的溶解度相對較低，這種低溶解度限制了二氧化碳能夠到達電極表面參與反應的量。

低溶解度的結果是，即使通過控制氣體的流速來儘量增加二氧化碳的溶解，其在電解液中的實際濃度仍然不足以讓電極片發揮最大的工作效率。這意味著在電化學系統中，尤其是在旨在通過電解液還原二氧化碳的系統中，僅靠調節二氧化碳的供給速率是不足以解決低效率的問題的。因此，要提高電極片的效率，需要採取其他方法來增加二氧化碳在電解液中的有效濃度，如改進電解系統的設計、使用氣體擴散層等技術來促進氣體與電解液的接觸。

➤ 實驗二

在典型的 H-Cell 設置中，為了進行電化學實驗，首先需要將二氧化碳氣體溶解在電解液中，直到達到飽和狀態。相比傳統的 H-cell 配置，使用氣體擴散層（GDL）作為電極的主要優勢在於它提供了更佳的質傳特性和更短的擴散路徑，這有助於提高反應的效率和效果。

使用氣體擴散層的主要運作原理是在傳統的 H-Cell 的基礎上，保留其主要的兩個腔室結構，並增加一層氣體擴散層。這層設計的目的是允許氣體，如二氧化碳，不需要完全溶解於

電解液中，就可以直接從電極片的另一邊接近電極表面，從而縮短了氣體到達反應界面的距離，使得氣體更易於在電極表面附近溶解和參與反應。這種設計有效減少了由於二氧化碳溶解度不足所可能導致的效率損失，因此，氣體擴散層的引入是提高電化學系統中氣體反應效率的一種有效方法。透過這種方式，即便在二氧化碳的溶解度較低的情況下，也能夠保證足夠的反應物接觸電極，從而提高整體的轉換效率。

➤ 實驗三

流動式電池反應裝置和電極片在二氧化碳的還原轉化過程中扮演著關鍵角色，通過選擇適當的電極材料，不僅能夠實現高效的二氧化碳轉化，還能根據需求定製化學產品，同時對環境保護作出貢獻。隨著這項技術的不斷發展和優化，其在未來減緩氣候變化和推動綠色化學產業發展中的作用將越來越重要。

氣體擴散層（GDL）的設計是為了促進二氧化碳，與電解液之間的有效傳輸和接觸，從而加速氣體在電解液中的溶解和參與反應的速率。這一層通常由多孔材料構成，其獨特的結構不僅允許氣體穿過，還提供了大量的接觸面積，使得氣體能夠更均勻且高效地分布在電極表面附近。這種設計有助於縮短氣體到達電解液和電極接觸面的距離，加快二氧化碳的溶解過程。

氣體擴散層的多孔結構不僅增加了反應的接觸面積，從而使得更多的二氧化碳分子能夠同時接觸到電解液，提高了單位時間內參與反應的氣體量，還促進了氣體和電解液的有效混合。這樣的混合作用提高了反應的均勻性和效率，使得二氧化碳能夠更有效地轉化為所需的產物。

➤ 實驗四

利用自製的 3D 列印 Flow cell 反應裝置和電極片還原二氧化碳，不僅是一種能夠高效率地將二氧化碳轉化為其他有利的化學產品的方法，同時也是一種緩解二氧化碳溫室效應的策略。在眾多可用於此目的的金屬電極片中，使用銀製電極片僅僅是一個簡單的方法來測試還原效果，實際上還有許多其他類型的金屬電極片可以被探索和利用，以發揮更大的還原二氧化碳的潛力。

利用 3D 列印不僅能夠測試不同幾何形狀對反應效率的影響，還可以優化反應器的流體動力學特性，例如提升氣體與電極的接觸面積，從而提高二氧化碳還原的效率。此外，3D 列印技術還讓研究人員能夠輕鬆修改設計，探索更加方便高效的裝置結構，即使是初步嘗試中的某些設計，如卡榫結構未達到預期效果，也能迅速找到替代方案並進行測試。

➤ 實驗五

探索和使用不同金屬作為電極片在還原二氧化碳的過程中，不僅可以提升轉化效率，還可以擴展產物的種類。例如，除了銀電極，銅電極在二氧化碳還原過程中能夠產生多種碳氫化合物，如甲烷、乙烯等，而金或鉑電極則可能專注於產生特定類型的化學品。這意味著，通過精確控制電極材料的選擇，我們不僅能夠提高二氧化碳的轉化率，還能針對特定的市場需求生產定制化的化學產品。

捌、參考資料及其他

1. (2024年2月24日) 在維基百科 Electrochemical reduction of carbon dioxide :
https://en.wikipedia.org/wiki/Electrochemical_reduction_of_carbon_dioxide
2. by Roger Lin Scilit Preprints.org Google Scholar ORCID, Jiaxun Guo, Xiaojia Li, Poojan Patel ORCID and Ali Seifitokaldani (2020年4月26日) Electrochemical Reactors for CO2 Conversion :
<https://www.mdpi.com/2073-4344/10/5/473>
3. iBuyCNC : CNC 加工 OR 3D 列印? 比較減材製造與增材製造的優缺點
<https://ibuycnc.com/cnc-or-3d-printing/>