

花蓮縣第 66 屆國民中小學科學展覽會

作品說明書

科 別：化學科

組 別：國中組

作品名稱：鋅空氣紙電池的效能研究與應用探討

關 鍵 詞：紙電池、鋅空氣電池

編 號：

作品名稱：鋅空氣紙電池的效能研究與應用探討

摘要

我們參考一篇瑞士研究機構(Empa)的論文，探討利用鋅粉和氧氣作為電極材料，以及使用食鹽水為電解液的紙電池效能。首先根據該文獻作法，重現論文中加水啟動、開路電壓 **1.19V** 的紙電池。之後研究各種做法，包括使用竹炭粉為陰極助導劑、添加二氧化錳作為催化劑、利用摺疊法進行電池串聯、以及單面雙電極的折疊式電池設計。連接 **1kΩ** 電阻進行負載放電測試，發現透過 **20%** 二氧化錳的催化配方，可將開路電壓提升至 **1.4V** 以上，初始負載功率密度達 **235 μW/cm²**。運用折疊式、單面雙電極電池設計搭配紙板夾具，能優化電極密合度、提升功率輸出及長時間穩定放電，且具備加水再活化之能力。此電池製作簡便、具環保特質、可藉由串聯提供足夠電壓，具有應用在一次性低功耗電子設備上的潛力。

壹、前言

一、研究動機

我們在發想科展主題時，首先上網搜尋過去科展的作品，才發現有紙電池這種東西，覺得很新奇引起我們的興趣。在幾篇有關紙電池的科展作品中，發現他們大多都是使用各類金屬作為陽極及陰極材料。但根據一篇由瑞士聯邦材料科學與技術研究院(Empa)所發表的研究論文，他們成功地製作出利用鋅粉和氧氣作為電極以及使用食鹽水為電解液的紙電池，我們覺得這個電池很環保且有發展潛力，所以我們想用這個電池為基礎再進行改良創造出效能更高的電池。

二、研究目的

- (一)驗證以鋅粉和氧氣為電極材料及中性氯化鈉電解液製作的紙電池的可行性。
- (二)初步探討各種設計對紙電池效能的影響，並製作出適合本次實驗之紙電池版本，包括：簡化電極塗料配方、使用不同紙質作為電池紙、電解液的施加方式、利用紙張摺疊達成串聯效果、以及折疊式的單面雙電極紙電池設計。
- (三)設計用於實驗的標準鋅空氣紙電池製作法、建立合適且一致的效能測試環境，並決定需量測之效能指標。
- (四)探討三種陰極塗料配方(標準石墨片、竹炭粉、添加二氧化錳作為催化劑)對電池效能的影響，並與原始論文作比較。

三、文獻回顧

- (一)鋅空氣電池(**Zinc-Air Battery**)，被科學家稱為「會呼吸的電池」。它並不將所有的反應物質都裝在電池裡面，電池內部存放金屬鋅作為陽極，但陰極反應物則是利用大氣中的氧氣，從空氣中不斷補充，不佔用電池空間與重量，具有能量密度高、重量輕、體積小等優點，理論電壓為 1.65 伏特。鋅空氣電池是目前唯一被商業用量化生產的金屬空氣電池，多用於助聽器的電池使用。
- (二)電池的基本構造：

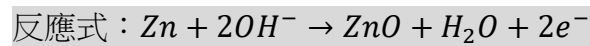
- 1. 金屬陽極（負極）：主要成分是金屬鋅粉(Zn)。
- 2. 空氣陰極（正極）：這是一層多孔性的結構，含有催化劑，負責讓空氣中的

氧氣進來並參加反應。

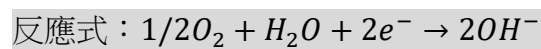
3. 電解液：作為離子傳導的橋樑，鹼性電解液的效果較好，氫氧化鉀(KOH)水溶液是常用的成分。

(三)發電原理：當電池開始放電時，內部會發生氧化還原反應：

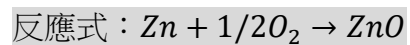
1. 陽極(鋅)：金屬鋅釋放出電子，被氧化變成氧化鋅(ZnO)。



2. 陰極(氧氣)：空氣中的氧氣進入電池，在催化劑的幫助下獲得電子，產生氫氧根離子(OH⁻)。



3. 全反應：金屬鋅與氧氣結合，產生電能並留下氧化鋅。



(四)鋅空氣電池的優點：

1. 電力強大：能量密度極高，提供的電力約為傳統鎳鎘電池的 10 倍。
2. 安全環保：鋅金屬蘊含量豐富且價格低廉，且相較於鋰電池更不容易發生爆炸，對環境也比較親和。
3. 輕量化：因為不需要攜帶陰極反應物(氧氣)，電池可以做得非常輕巧。

(五)鋅空氣電池面臨的挑戰：

1. 在多次充放電後，鋅金屬表面會長出像樹枝一樣的結晶，可能會刺穿電池內部導致短路。
2. 電解液如果長時間接觸空氣，水分會蒸發，或是與空氣中的二氧化碳反應產生碳酸鹽，導致電池失效。
3. 鋅在鹼性液體中容易發生副反應產生氫氣，造成電池自放電，浪費電力。

貳、研究設備及器材

一、藥品

藥品名稱	狀態	用途
鋅(Zn)	粉末	陽極電極
碳黑(Cabon black)	粉末	助導劑
石墨片(Graphite flake)	粉末	陰極助導劑
讚炭工房竹炭粉	粉末	陰極助導劑
蟲膠(Shellac)	固體	黏著劑
乙醇(Ethanol)	液體	溶劑
聚乙二醇(Polyethylene glycol 400)	液體	助溶劑
蠟(Wax)	固體	絕緣劑
油菜籽油(Rapeseed oil)	液體	溶劑
氯化鈉(NaCl)	晶體	電解質
二氧化錳(MnO ₂)	粉末	催化劑

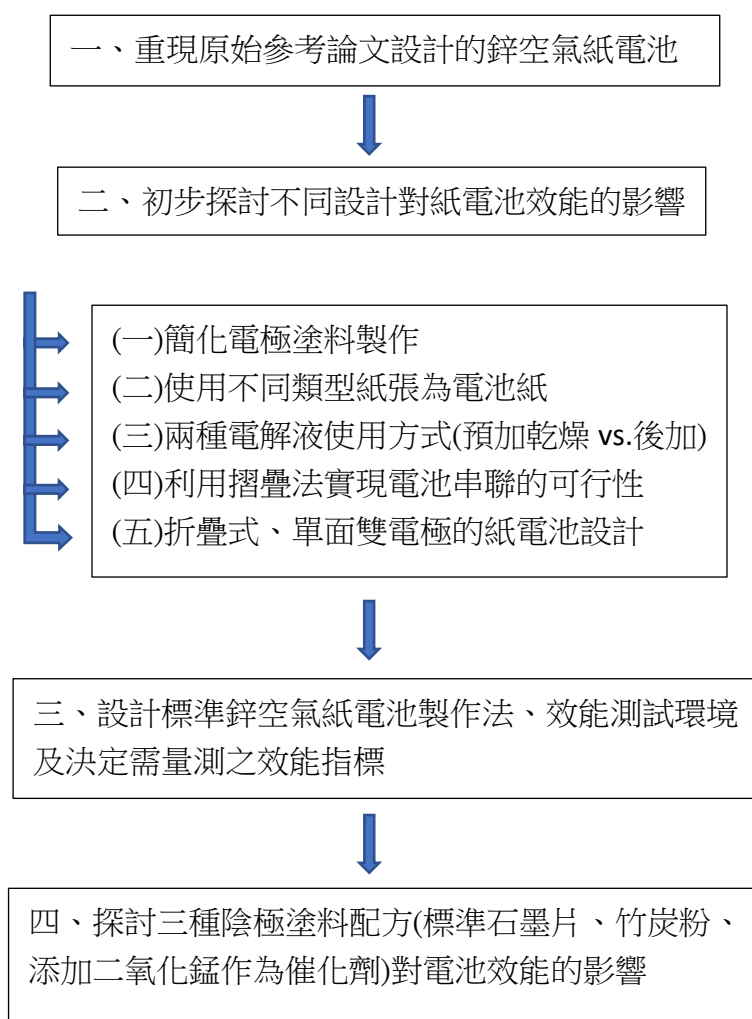
表一、實驗用藥品列表(作者自製)

二、器材與設備

器材名稱	用途
三用電表	測量電壓及電流
電子秤	測量重量
不鏽鋼濾網	篩選鋅粉
濾紙、擦手紙、宣紙、衛生紙	電池容器
麵包板	建立電池量測電路
1000 歐姆電阻	測量電池負載效能
紅光 LED 燈(1.8V)	測試電池實際運作效能
自閃爍型紅光 LED 燈(1.8V)	測試電池實際運作效能
100μF 電容	提高 LED 燈發光亮度

表二、實驗用器材與設備列表(作者自製)

參、研究過程及方法：流程圖如下(圖一)



圖一、實驗流程圖(作者自製)

一、重現參考論文的鋅空氣紙電池

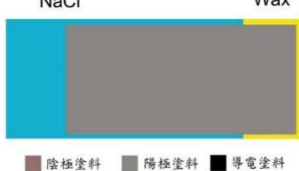
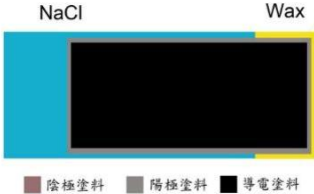
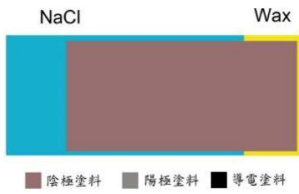
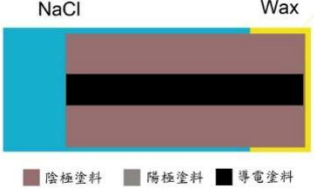
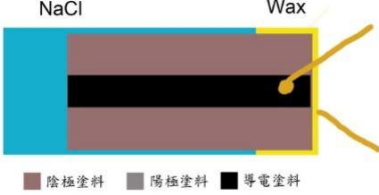
(一)這次實驗所要探討的金屬空氣電池設計，如同多數的研究，採用鋅金屬作為陽極反應物，空氣中的氧氣為陰極反應物，但具有兩點很大的差異。首先我們使用中性的氯化鈉(NaCl)溶液作為電解液，優點是較鹼性電解液來的安全、環保及減少產生氫氣的副反應。第二點則是運用紙張作為電池容器，優點是輕薄及電池可塑性大。但這兩項差異同時也為電池效能帶來極大的影響。

(二)根據下表(表三)配製陽極塗料、陰極塗料、導電塗料、中性電解液及絕緣蠟。

並依照以下圖示(圖二)，分別於濾紙的兩面塗上陽極及陰極塗料製作紙電池。

wt% (重量百分 濃度)	電極材料	碳黑 (carbon black)	石墨片 (graphite flake)	蟲膠 (shellac)	乙醇 (ethanol)	聚乙二醇 (PEG 400)
陽極塗料	89.5% (鋅粉)	無	無	2.5%	5.5%	2.5%
陰極塗料	無 (氧氣)	無	47%	15%	30%	8%
導電塗料	無	6.5%	26.5%	21.5%	41.5%	4%
絕緣蠟	蠟 (50%) + 油菜籽油 (50%)					
電解液	3M (mol/L) NaCl 水溶液 (7.0g NaCl + H ₂ O 至溶液體積 40ml)					

表三、原始參考論文電極塗料配方(作者自製)

實驗步驟 (三).1		實驗步驟 (三).2 之一	
實驗步驟 (三).2 之二		實驗步驟 (三).3 之一	
實驗步驟 (三).3 之二		實驗步驟 (三).4	

圖二、原始參考論文紙電池製作方法(作者自製)

(三)實驗步驟：如圖二

1. 裁剪一張 5x2cm 的濾紙，一端約 1cm 長的範圍浸入融化之絕緣蠟，待其凝固後，再將另一端 4cm 長的範圍浸泡 NaCl 水溶液後，以吹風機吹乾。
2. 陽極面製作：以陽極塗料在紙張的一面上塗抹 4x2cm 的範圍，待塗料乾燥後於陽極塗料層上，再以導電塗料塗抹 4x2cm 的範圍。
3. 陰極面製作：以陰極塗料在紙張的另一面上塗抹 4x2cm 的範圍，待塗料乾燥後於陰極塗料層上，再以導電塗料塗抹 4x0.5cm 的範圍。
4. 電線連結：以導電塗料將兩條電線分別黏著於位於絕緣蠟端的陰、陽極導電塗料層上。
5. 電池電壓測量：將紙電池連接三用電表，加 0.5ml 水於無塗料的濾紙處以活化電池，並同時開始計時，紀錄電池開路電壓之變化。

二、初步探討不同設計對紙電池效能的影響

(一)簡化電極塗料製作

1. 製作固定比例之蟲膠液，混和電極材料使用。蟲膠液比例如下：

蟲膠：乙醇：聚乙二醇 = 12g : 30ml (24g) : 6ml (6.6g)

2. 依下表(表四)比例配製電極塗料

比例	電極材料	碳黑 (carbon black)	石墨片 (graphite flake)	蟲膠液 (shellac + ethanol + PEG)
單位	重量 (gw)	重量 (gw)	重量 (gw)	體積 (ml)
陽極塗料	4 (鋅粉)	無	無	1
陰極塗料	無 (氧氣)	無	1	1
導電塗料	無	1	4	10

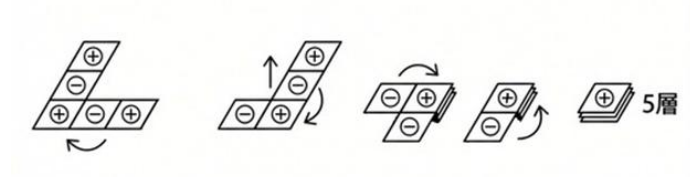
表四、簡化版電極塗料配方(作者自製)

(二)使用不同紙張為電池紙：宣紙、擦手紙

(三)探討下列兩種電解液使用方式的效能差異：(1)電池紙預先浸潤 NaCl 溶液並乾燥，隨後加水啟動電池放電反應。(2)電池紙不預先浸潤 NaCl 溶液，於使用電池時直接加 NaCl 溶液啟動。

(四)探討利用摺疊法實現電池串聯的可行性：製作九宮格紙電池，經過裁剪後，利用摺疊法實現三電池及五電池串聯的形式。單張紙電池重疊有散落的可能性，摺疊法能讓串聯的多張紙電池成為一個整體。

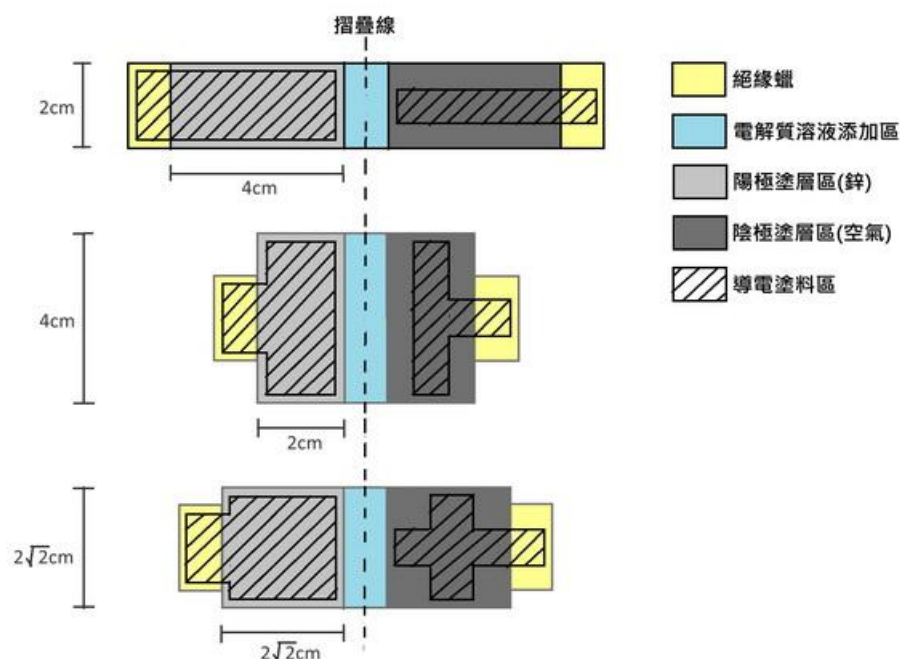
1. 使用擦手紙進行紙電池實驗，設計 3x3 九宮格(每格 1.5x1.5cm)的紙電池。
2. 將紙張用 3M NaCl 溶液完全潤濕後，用吹風機吹乾，留下 NaCl 於紙張上。
3. 將溶化石蠟油塗至紙上九宮格電池的格線及邊界上。
4. 依前述項次(一)之 2 的簡化比例(表四)進行電極塗料製作，但以讚炭工房竹炭粉替代石墨片進行電池製作。
5. 將九宮格電池裁剪成 1 格單電池、3 格及 5 格 L 型紙電池，進行如下(圖三)的折疊串聯。



圖三、5 格 L 型紙電池摺疊串聯法(作者自製)

(五)折疊式、單面雙電極的紙電池設計：

1. 因應紙張雙面都塗抹電極塗料，可能因蟲膠液滲入紙張導致吸納電解質溶液或水分的能力變差而減弱電池效能，我們因此想出這種摺疊式的單面雙電極電池設計。使用擦手紙進行紙電池製作，設計成摺疊形式，所以陰陽極都會塗在紙張的同一邊。設計電極面積為 8 平方公分的三種型式，分別是 4x2 cm 的長方形兩種(#1:連接兩極為短邊 2cm, #2:連接兩極為長邊 4cm)，及邊長為 $2\sqrt{2}$ cm 的正方形(#3)，如以下圖示(圖四)，沿摺疊線對折後，就能讓陰陽電極靠近以增加放電反應效率。



圖四、折疊式、單面雙電極的紙電池設計：同尺寸、不同樣式(作者自製)

2. 紙張並不預先浸潤 NaCl 溶液再乾燥，避免電池製作完成即開始放電的現象，紙張中央 1cm 寬度的區域，作為將來施加 NaCl 溶液以啟動電池的位置。
3. 用先前製備的石蠟塊與菜籽油(1:1)混和液，塗至紙上絕緣的部分(2x1cm)。
4. 依前述項次(一)之 2 的比例(表四)製備電極塗料。
5. 按照陽極塗料、陰極塗料及導電塗料的順序塗抹，每塗抹完一種塗料，就使用吹風機吹乾紙張。為了可以完全混合形成均勻膏狀塗料，或塗抹過程因乙醇揮發導致塗料過於黏稠時，也會再度添加少許乙醇恢復塗料流動性。
6. 添加 NaCl 溶液啟動紙電池並測量開路電壓，觀察 30 分鐘內電壓之變化。
7. 串聯三顆紙電池並測試效能，之後連接紅光 LED 燈發光，測試紙電池的工作負載電壓、負載電流以及隨時間的變化。

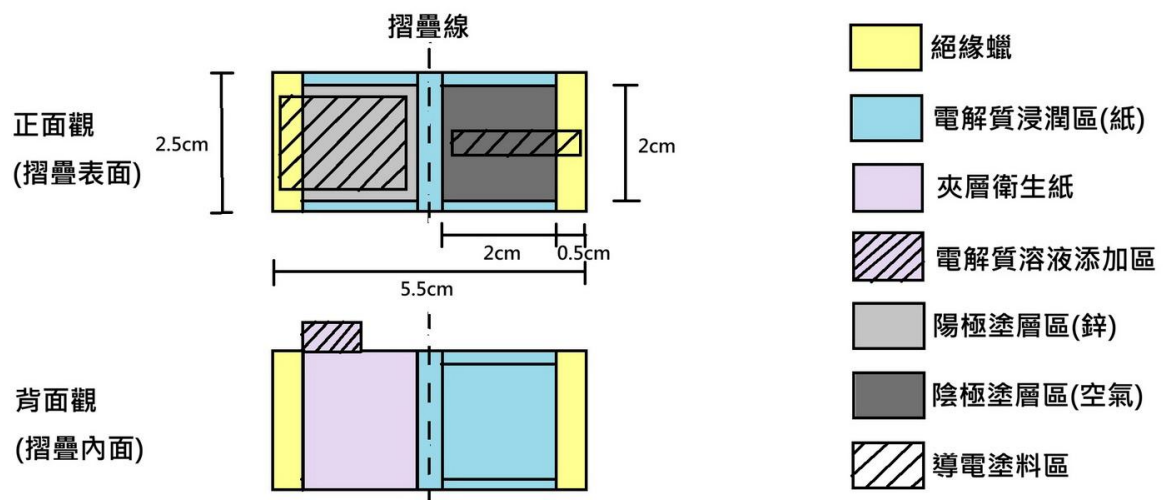
三、設計比較電池性能的標準鋅空氣紙電池製作法、效能測試環境及決定效能指標

(一)標準紙電池製作：單面雙電極塗層、折疊式設計，如以下圖五所示。

1. 裁剪一張 5.5x2.5cm 的宣紙，兩端約 0.5cm 長的範圍浸入融化之絕緣蠟。宣紙中央 0.5cm 寬的範圍做為區隔不做任何處理。此區與塗蠟區之間兩處 2x2cm

的範圍為陰陽極電極區，陰陽極皆位於紙張的同一面。

2. 將 1mm 厚度紙板中間割除 2x2cm，利用此紙板塗抹固定厚度之電極塗料。
3. 陽極面製作：在紙板之輔助下，以陽極塗料在宣紙上塗抹 2x2cm 的範圍，以吹風機吹乾塗料。
4. 陰極面製作：在紙板之輔助下，以陰極塗料在紙張上塗抹 2x2cm 的範圍，以吹風機吹乾塗料。
5. 在紙板之輔助下，在陽極塗料上以導電塗料塗抹 2x2.5cm 的範圍，在陰極塗料上以導電塗料塗抹 2x0.5cm 的範圍，需延伸至絕緣蠟區以用作電極端子。
6. 將宣紙從中央處對半折疊，中間放入 1 及 2 層衛生紙(2.5x2cm 帶有 1x0.5cm 小凸邊)，作為幫助吸收電解液啟動電池及保留電解液，完成電池製作。



圖五、標準折疊式、單面雙電極的紙電池設計(作者自製)

(二)製作測試紙電池效能之工具

1. 製作兩張 3x2.5cm 大小，並黏貼有電線之厚紙板，電線末端設計在接觸紙電池位於絕緣蠟的電極端子處。測試時將紙電池夾在這兩張厚紙板之間，三用電表則接觸電線測量，減少觸碰紙電池之機會以避免損傷電池，並利用紙板壓迫提供縮短且穩定的電極間距。

(三)優化測試紙電池效能之環境及決定量測的效能指標

1. 使用麵包板(免焊萬用電路板)進行測試，避免過長線路造成額外負載。

2. 使用 1000 歐姆(1kΩ)電阻，量測下列指標：

(1)開路電壓(Open-circuit Voltage, OCV, Voc)：電池在未接任何負載(斷路)時，正負兩極間的電位差，反映了化學能的位階。

(2)短路電流(Short-circuit current, Isc)：負載電阻趨近於零時的電流，反映電池輸出的動力學極限與內阻。

(3)負載電壓(Load Voltage, VL)：當電池接上 LED 或電阻後，兩端實際測得的電壓。

(4)負載電流(Load Current, IL)：在特定負載下通過電路的實際電流。

3. 根據上述資料，計算下列指標：

(1)最大輸出功率(Pmax)： $P_{max} = V_{oc} \times I_{sc} / 4$ ，代表這顆電池瞬間能提供的能量上限。

(2)最大功率密度(Power Density)： $PD = P_{max} / A$ (單位： $\mu W/cm^2$)，等於最大輸出功率除以紙電池面積，這讓我們能與原始參考論文中提到的 $150\mu W/cm^2$ 進行比較。

(3)負載功率密度(Load Power Density)： $PDL = V_L^2 / (R \times A)$ (單位： $\mu W/cm^2$)，為紙電池在實際負載狀態下的輸出功率。若以負載 1kΩ 的電阻為例，紙電池面積為 $4cm^2$ ，則負載功率密度(PDL)為 $V_L^2 \times 250 \mu W/cm^2$ 。

四、探討不同陰極配方(標準石墨片、竹炭粉、添加二氧化錳作為催化劑)製作陰極電極對電池效能的影響

(一)以項次三的紙電池設計及測試環境，製作石墨片為陰極塗料的標準紙電池三張、利用讚炭工房竹炭粉取代石墨片製作陰極塗料的紙電池三張，以及二氧化錳取代部分石墨片，佔比分別為 10%、20%及 30%的紙電池各一張(如以下表五)，並正式測試性能。紙電池的電極塗料塗抹，利用厚度約為 0.3mm 的紙隔板進行，以求達成相同的電極厚度。

比例	二氧化錳 (催化劑)	石墨片 (graphite flake)	竹炭粉	蟲膠液
單位	重量 (gw)	重量 (gw)	重量 (gw)	體積 (ml)
陰極塗料(標準)	無	1	無	1
陰極塗料(竹炭粉)	無	無	1	1
陰極塗料(錳 10%)	0.1	0.9	無	1
陰極塗料(錳 20%)	0.2	0.8	無	1
陰極塗料(錳 30%)	0.3	0.7	無	1

表五、三種陰極塗料配方：標準石墨片、竹炭粉、添加二氧化錳作為催化劑(作者自製)

(二)實驗共進行三次，每次包含三組不同陰極塗料的電池各一張。加 0.1ml 3M NaCl 溶液啟動電池後，分別於 1, 5, 10, 20 分鐘後測量開路電壓(Voc)，30 分鐘後接上 1k Ω 電阻進行負載放電測試，分別於 30, 60, 90, 120 及 300 分鐘後(皆以電池啟動時間為基準)測量開路電壓(Voc)、短路電流(Isc)及負載電壓(VL)，並計算最大功率及功率密度等指標，所以實際負載測試時間為 4.5 小時。。

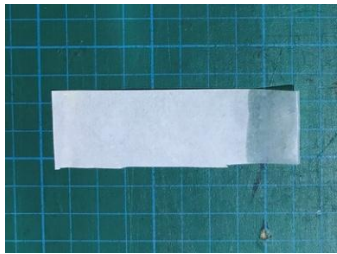
(三)於啟動紙電池進行實驗的十幾個小時之後，再度加水 0.1ml 進行電池的再活化實驗，分別於 1, 5, 10 分鐘後測量開路電壓(Voc)，10 分鐘後接上 1k Ω 電阻進行負載放電測試，分別於 10, 30 及 60 分鐘後(皆以電池啟動時間為基準)測量開路電壓(Voc)、短路電流(Isc)及負載電壓(VL)，並計算相關效能指標，所以實際負載測試時間為 50 分鐘。

肆、研究結果

一、重現參考論文的鋅空氣紙電池

(一)我們依照參考論文提供之電極塗料比例及方法，製作出紙電池，並在添加水啟動電池後，測得 1.19V 的開路電壓(Open Circuit Voltage, OCV)，相關過程及結果如下圖六所示。。

(二)我們曾嘗試使用鹼性電解液(濃度為 7.1M 的氫氧化鉀溶液)製作紙電池，後來因為覺得強鹼具有危險性，所以還是決定放棄此作法。

		
蟲膠	秤取石墨片	塗蠟之濾紙
		
陰極塗料塗抹	陰極面導電塗料塗抹	
		
陽極(鋅)塗料塗抹	陽極面導電塗料塗抹	測量電池電壓(OCV)

圖六、根據參考論文配方製作電池的過程及結果(作者自攝)

二、探討不同設計對紙電池效能的影響

(一)簡化電極塗料製作：

我們依實驗方法配製固定比例之蟲膠液(12g 蟲膠 + 30ml 乙醇 + 6ml 聚乙二醇)，順利混和小份量的電極材料使用，相關過程如以下圖七所示。但因為是在開放環境下使用水彩筆進行混合及塗抹，乙醇常快速揮發導致塗料黏稠不易塗抹，因此過程中會適量添加額外乙醇維持塗料流動性。

		
固定比例的蟲膠液	盛裝電極材料空盒	鋅粉 (1g)
		
不鏽鋼濾網	陽極塗料(已混合)	陰極塗料(未混合)

圖七、固定比例蟲膠液及簡化版配方電極塗料的製作(作者自攝)

(二)使用不同紙張為電池紙：

當我們使用宣紙製作紙電池，發現當施加水份要啟動電池時，水會在紙面形成水珠，無法立即滲進紙張。除此之外，水份更因此流到陰極電極表面，如此一來將會妨礙空氣進入陰極電極進行反應。當使用擦手紙製作紙電池時，吸水性良好，可大幅改善這情況。但擦手紙的表面不平整，會影響電極塗料的塗抹，相較之下宣紙則非常適合塗料塗抹。

(三)探討電解液使用方式的效能差異：

當我們預先將紙張浸泡 NaCl 溶液，進行乾燥後再製成紙電池時，即使尚未添加水份，也會測得電壓。但是如果未事先浸潤 NaCl 溶液，因完全缺乏電解質，故製作完成的紙電池無法測得電壓。兩種電解液的施加方式對電池啟動的速度並無明顯差異，電池紙能否順利將施加之溶液或水吸收，對電池的啟動具有更大的影響。

(四)九宮格電池及利用摺疊法實現串聯實驗：相關過程及結果如以下圖八所示

1. 九宮格電池因兩格塗抹錯誤塗料，將導致無法執行摺疊串聯，因而剪除，故實際只有七格電池，可製作成兩個單格電池及一個 L 型五格電池。在完成陰

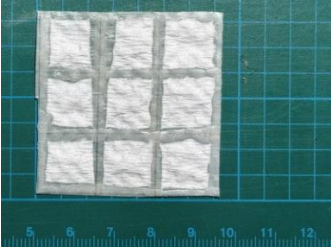
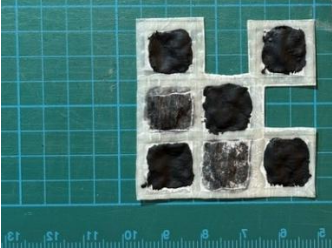
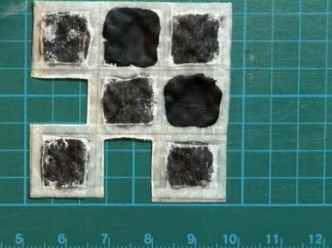
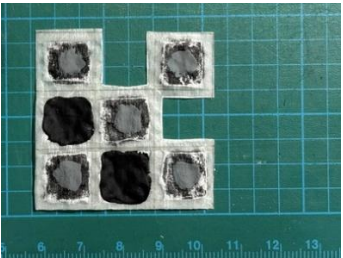
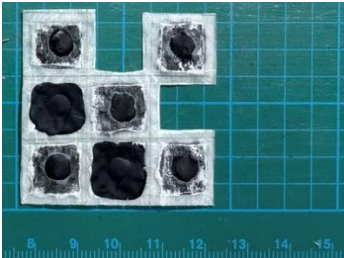
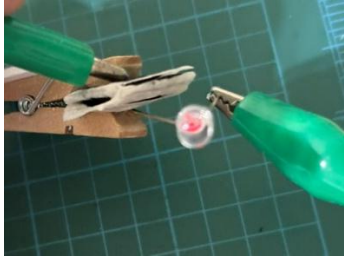
陽極電極塗料塗抹，尚未塗抹導電塗料時，即使目測乾燥就己能測得電壓。九宮格的電池，共七格分別測得 0.98, 1.07, 1.08, 1.09, 1.13, 1.14, 1.14V 的電壓。

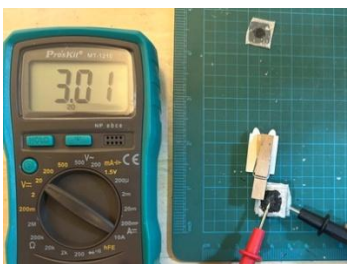
2. 紙電池製作完成十天後，在未加水的狀態下仍能測得開路電壓(OCV, Open Circuit Voltage)，九宮格電池加水後電壓也約只有 0.45~0.75V 之間。其中一格電池因為雙面皆被電極塗料塗滿，導致無法加水，所以電壓特別低。

3. 九宮格電池串聯實驗：

(1)L 型五格電池在三格摺疊串聯狀態下，OCV 可達 1.28V；五格摺疊串聯 OCV 可達 2.15V，並可讓紅光 LED 燈發亮，負載電壓為 1.55V。

(2)排除一顆低效能電池，總共串聯 6 格九宮格電池，開路電壓可達 3V，並使 LED 燈發亮。

		
含 NaCl 及塗蠟之擦手紙	陰極塗料(電池一面)	陰極塗料(電池另一面)
		
陽極(鋅)塗料	電壓 1.13V(未加水)	紙電池完成圖
		
摺疊串聯電壓 1.28V(三格)	摺疊串聯電壓 2.15V(五格)	紅光 LED 燈發光

		
串聯負載電壓 1.55V(五格)	串聯開路電壓 3V(六顆)	

圖八、九宮格紙電池製作及摺疊串聯實驗(作者自攝)

(五)折疊式、單面雙電極的紙電池設計：

1. 紙電池製作完成當天晚上進行測試，相關數據如以下表六所示，相關過程如以下圖九。在未加 NaCl 溶液(3M)的狀態下測得開路電壓為零。加入 NaCl 溶液後，一分鐘內電壓可達 1.2V，十分鐘後電壓降至約 0.9~1.0V，30 分鐘後依然可維持在 0.9~1.0V。短路電流約為 0.14~0.21mA。

時間(分) \ 電池電壓 OCV(V)	#1 (4x2cm)	#2 (2x4cm)	#3 (正方形)
1 min	1.23	1.225	1.166
10 mins		0.906	1.009
20 mins	0.9	0.91	1.081
30 mins	0.928	0.905	1.074

表六、折疊式、單面雙電極紙電池效能：面積 8cm²、三種不同樣式(作者自製)

2. 原本預計將紙電池摺疊，變成在電極間有兩層紙的形式，以增加電解液的量，但紙之間的吸附性極差，實際測試變成陰陽電極皆位於紙電池同一面的形式，反而造成陰陽極之間的距離變遠。

3. 紙電池串聯及一顆紅光 LED 燈發光實驗：

(1)三張紙電池串聯測得 OCV 為 2.46V，短路電流為 0.14mA。連接 LED 燈珠發光，負載電壓為 1.65V，負載電流為 0.036mA。

(2)連結 LED 43 分鐘後測得 OCV 降至 2.07V，而負載電壓則降至 1.63V，可

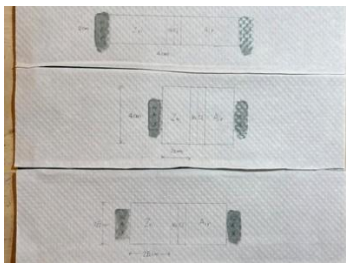
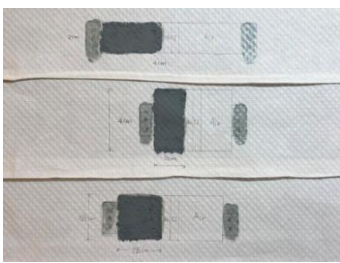
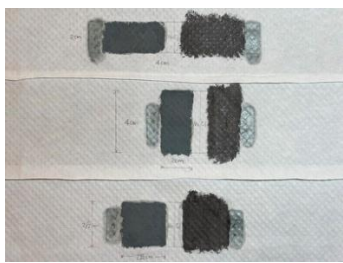
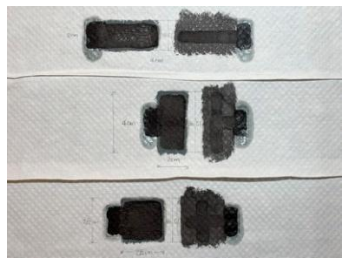
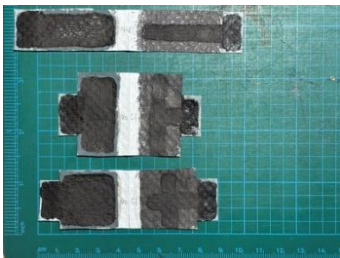
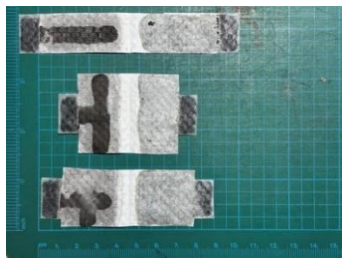
讓 LED 發亮，但亮度減弱。

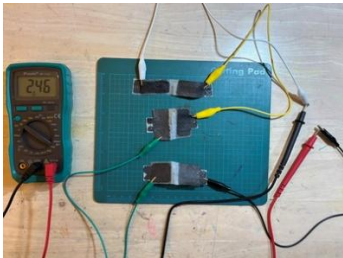
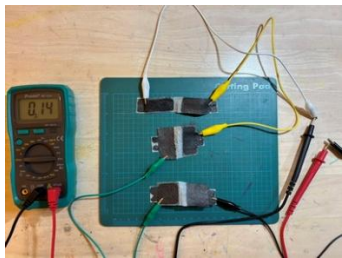
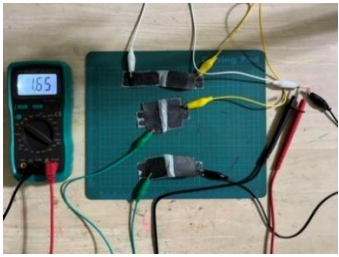
4. 紙電池串聯及兩顆 LED 燈發光實驗：

(1)三電池串連並連結 LED 燈珠發光一小時後，改並聯兩顆 LED 燈珠實驗，測得負載電壓為 1.59V，可讓 LED 發亮，但亮度減弱。

(2)連結兩顆 LED 燈珠發光二小時後，負載電壓降至 1.56V，可讓 LED 發亮，但亮度已經很弱。

(3)連結兩顆 LED 燈珠發光七小時後，負載電壓降至 1.51V，LED 目視無發亮，但近距離可見極微弱之亮光。

		
塗蠟之擦手紙	陽極(鋅)塗料(左側)	陰極塗料(右側)
		
導電塗料	紙電池完成圖(電極面)	紙電池完成圖(紙張面)
		
#1 電壓 0V(未加 NaCl 溶液)	#1 電壓 1.23V(加 NaCl 後)	#3 電壓 1.166V (未折疊)

		
#3 電壓 1.09V (折疊狀態)	串聯開路電壓 2.46V	串聯短路電流 0.14mA
		
串聯負載電壓 1.65V	一顆 LED 發光	兩顆 LED 發光(7 小時後)

圖九、三種樣式的折疊式、單面雙電極紙電池製作、效能測試及串聯實驗(作者自攝)

三、設計比較電池性能的標準紙電池製作法、測試環境及效能指標

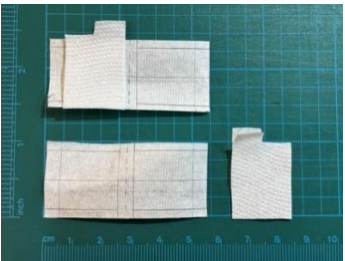
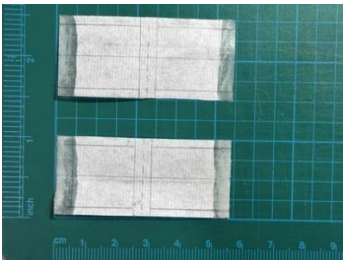
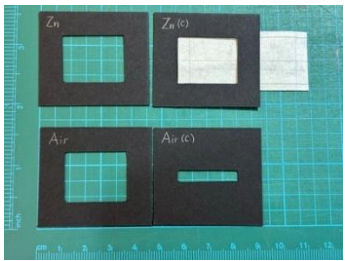
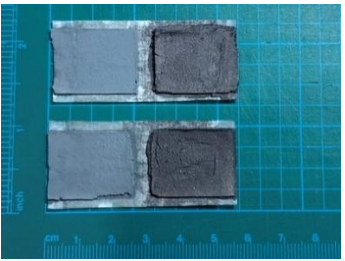
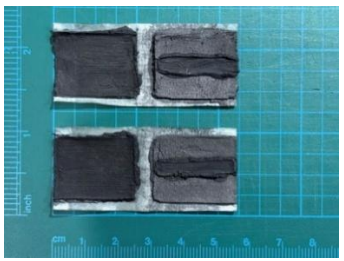
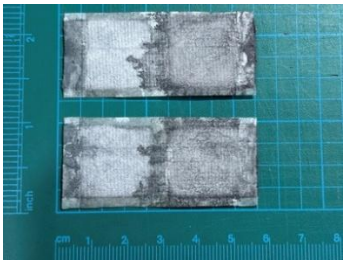
(一)標準紙電池及測試紙板：折疊式、單面雙電極設計。相關效能測試數據及過程如以下表七及圖十所示。

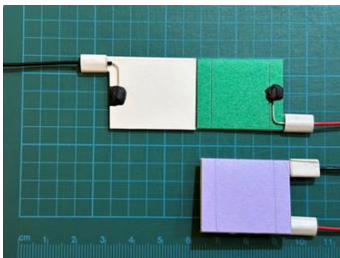
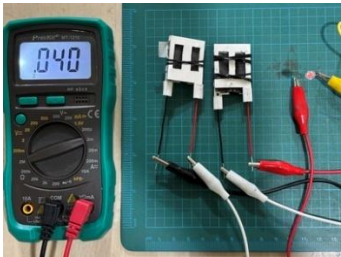
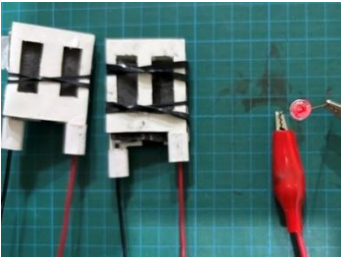
1. 紙電池#1 測試過程較不順利，一開始誤加純水，因不含電解質無法啟動電池，所以把折疊的電池打開，直接添加 0.4ml NaCl 溶液於紙張上。十分鐘後開路電壓可達 0.96V，短路電流(I_{sc})為 0.247mA。隨後把電池夾進測量紙板之間，雖測得電流大幅增加至 1.127mA，但電壓卻下降至 0.69V，推測是因為測量紙板緊貼空氣電極導致空氣接觸減少所致，於是直接改成未摺疊狀態測量。
2. 因為測試紙電池#1 時所發現的問題，於是立刻把接觸空氣電極的測試紙板挖出兩個長方形空洞，讓空氣能夠進入。電池#2 測試過程完全按照計畫順利進行，全程都是夾在測試紙板之間，NaCl 溶液也是添加於夾層衛生紙的小凸邊上滲入，一開始添加 0.2ml，後續又添加 0.2ml。電壓上升的速度較之前的實驗慢，十分鐘後開路電壓才達 0.72V，20 分鐘後為 0.95V，最終在 30 分鐘後達到 1.01V，而短路電流可達到 3.16mA。

3. 電池啟動約兩個半小時後，兩張紙電池都分別夾在測試紙板之中進行串聯實驗，開路電壓為 1.778V，短路電流為 0.84mA。緊接著進行串聯及連接一顆 LED 燈發光實驗：兩張紙電池串聯就可讓 LED 燈珠微弱發光，負載電壓為 1.669V，負載電流為 0.04mA。LED 發光兩小時後，負載電壓降至 1.632V，負載電流降至 0.0169mA，仍可讓 LED 發亮，但亮度極弱。
4. 串聯電池並讓 LED 發光兩小時後(電池啟動 5 小時後)，電池#1 的 OCV 為 0.85V，短路電流為 0.32mA，電池#2 的 OCV 為 0.75V，短路電流為 1.64mA。

時間	#1 電壓(Voc) V	#1 電流(Isc) mA	#2 電壓(Voc) V	#2 電流(Isc) mA
10 mins	0.96	0.247	0.719	
20 mins	0.8	0.126	0.952	
30 mins	0.63		1.01	3.16
30m - 5hrs	串聯及 LED 發光實驗			
5 hrs	0.85	0.32	0.75	1.64

表七、標準折疊式、單面雙電極紙電池於測試紙板夾具下的效能(作者自製)

		
電池紙：宣紙及衛生紙	塗蠟之宣紙	輔助塗料塗抹之紙板(1mm)
		
陽極(左)及陰極(右)塗料面	紙電池完成圖(電極面)	紙電池完成圖(紙張面)

		
原始測試紙板設計	#2 開路電壓 1.01V (30 分鐘)	#2 短路電流 3.16mA (30 分鐘)
		
串聯負載電壓 1.67V	串聯負載電流 0.04mA	串聯 LED 發亮

圖十、標準折疊式、單面雙電極紙電池及測試紙板製作、效能測試及串聯實驗(作者自攝)

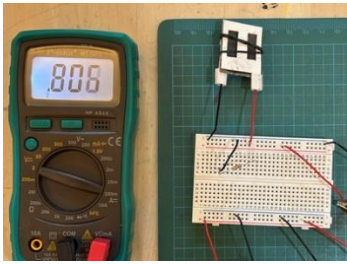
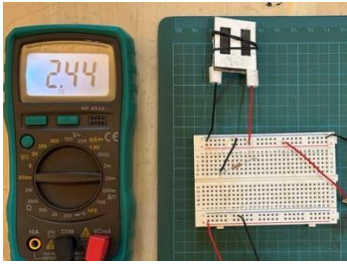
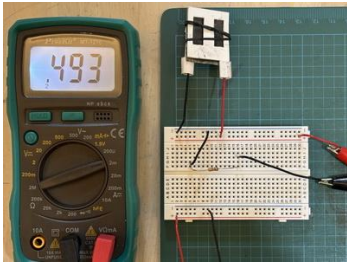
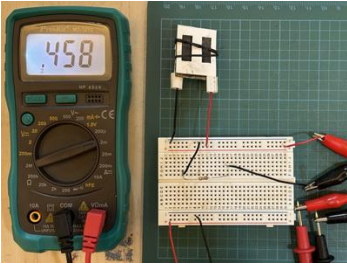
(二)優化測試紙電池效能之環境及量測的效能指標

1. 因為紅光 LED 的導通電壓約為 1.8V，而串聯兩顆我們所製作的紙電池，所能提供的電壓只有約 1.6V 左右。此時雖然能使 LED 發光，但因為電阻太大導致負載電流太小，所以並不適合用來進行效能測試，因此我們決定使用 1000 歐姆的電阻以及麵包板來建立測試環境，如以下圖十一所示。

2. 我們利用前述實驗所用過的紙電池(啟動後四天)，添加 0.2ml 3M NaCl 溶液重新啟動：

(1)十分鐘之內可測得開路電壓為 0.806V，短路電流為 2.44mA。連接一顆 1kΩ 的電阻進行測試，負載電壓為 0.507V，負載電流為 0.493mA，隨時間逐漸下降，40 分鐘後為 0.458mA。

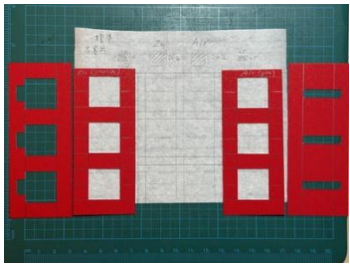
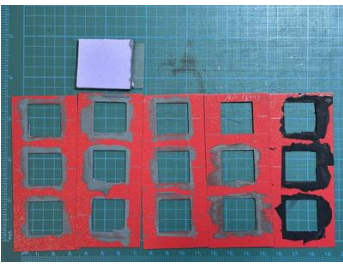
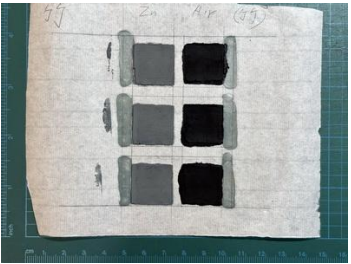
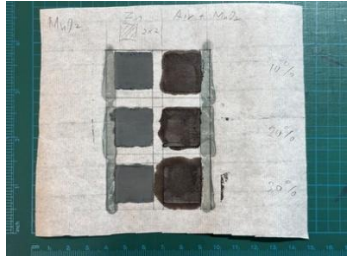
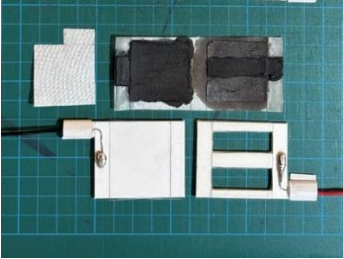
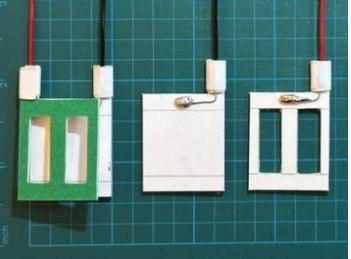
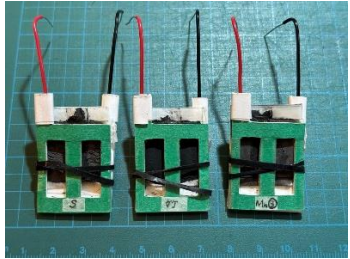
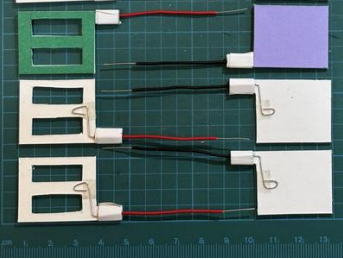
(2)以負載電壓 0.507V 及負載電流 0.493mA 進行計算，輸出功率 $P = V_L \times I_L$
 $= 0.25 \text{ mW} = 250 \text{ } \mu\text{W}$ ，功率密度(PD)等於 $250/5 = 50 \text{ (}\mu\text{W/cm}^2\text{)}$ 。

	
開路電壓(V_{oc}) 0.806V	短路電流(I_{sc}) 2.44mA
	
1k Ω 負載電流(I_L) 0.493mA	負載電流(I_L) 0.458mA (40 分鐘)

圖十一、利用 1k Ω 電阻及麵包板進行效能測試(作者自攝)

四、探討利用不同陰極塗料(標準石墨片、竹炭粉、添加二氧化錳作為催化劑)製作陰極電極對電池效能的影響

(一)第一次實驗的組別(石墨片及竹炭粉及 30%二氧化錳催化劑紙電池各一張)，因為用來夾住紙電池的測試紙板的電線接點處有額外焊錫導致有突出點，造成導電塗料受壓迫易碎，而且摺疊紙電池也無法貼合，導致實驗結果效能低於預期，所以我們製作新版本的測試紙板來改善這些問題。此外，第一次實驗使用橡皮筋來固定紙板，也可能造成紙電池受壓不一致，因此我們在後續第二、三次實驗改用同規格塑膠夾來固定，希望降低效能測試條件的誤差。所以最終的實驗結果，在石墨片及竹炭粉的組別，我們只使用第二及第三次實驗的兩張電池的平均值來呈現。相關紙電池製作過程、不良及優化後的測試紙板及組裝情形如以下圖十二所示。

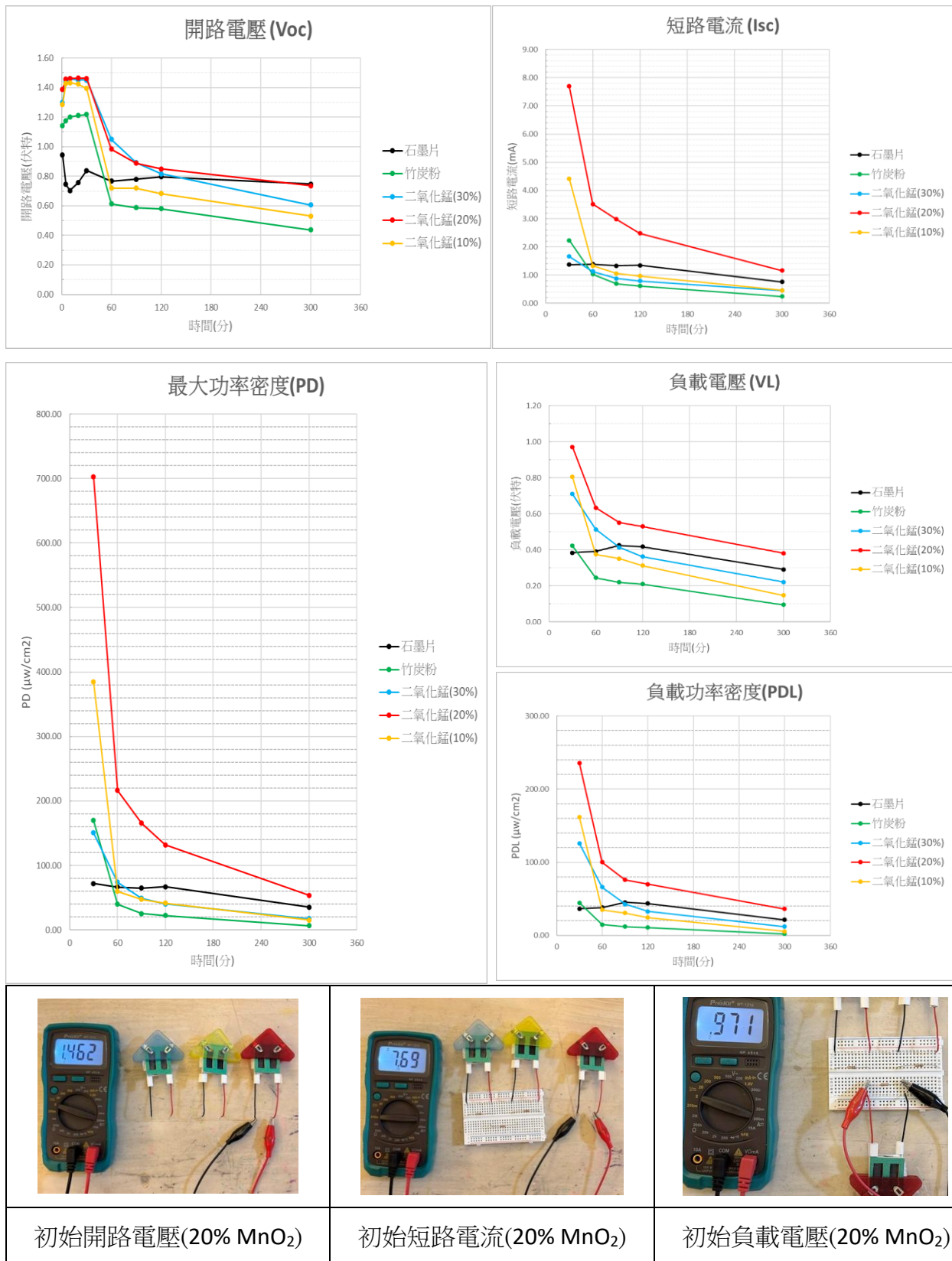
		
輔助塗料塗抹紙板(0.3mm)	輔助塗料塗抹之紙板	陰陽極塗層(竹炭組)
		
陰陽極塗層(MnO ₂ 組)	紙電池組件及測試紙板	測試紙板(含焊錫點)
		
塗蠟區導電塗料碎裂	優化後的測試紙板設計	紙電池與測試紙板組裝

圖十二、三種陰極塗料配方的電池製作及優化之測試紙板(作者自攝)

(二)我們將 0.1ml 3M 氯化鈉溶液加在突出之衛生紙上，溶液迅速被吸收進去而且開路電壓隨即急速上升，於啟動 30 分鐘後接上 1k Ω 電阻進行負載測試 4.5 小時，相關開路電壓(Voc)、短路電流(Isc)、負載電壓(VL)、最大功率密度(PD)及負載功率密度(PDL)數據如以下圖十三所示。簡述結果如下：

1. 於石墨片中加入二氧化錳(20%)當作催化劑，可得到最好的電池效能，開路電壓可達 1.46V，初始負載功率密度更可達 235 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，接近原始論文的 4 倍。放電 1.5 小時後負載電壓仍有 0.53V，而負載功率密度為 70 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。
2. 與原始參考論文同配方的石墨片標準電池效能次之，開路電壓在啟動 1 分鐘之後就達到 0.95V，放電 1.5 小時後負載電壓仍有 0.42V，而負載功率密度為 43 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

3. 竹炭粉雖然啟動後開路電壓迅速上升，最終可稍高於 1.2V，但於負載下的效能最差。



圖十三、三種陰極塗料配方電池的首度啟動效能圖表(作者自製)

(三)於首次 5 小時的測試後，我們分別於 15.5、18 及 10 小時後(以首次啟動時間為基準)，對三組電池添加 0.1ml 水，進行一小時的再活化效能測試，相關數據如以下表八所示。簡述結果如下：

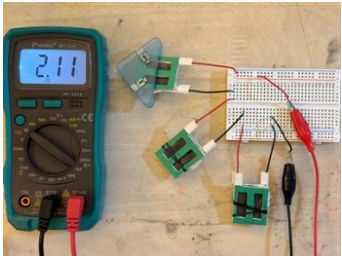
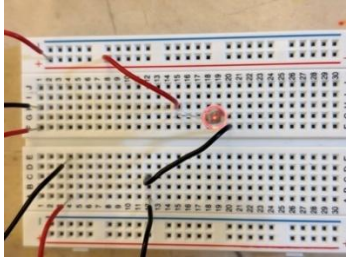
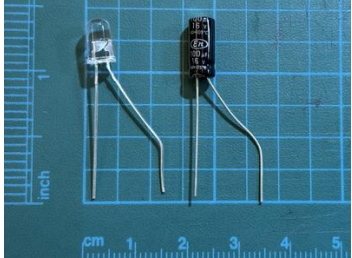
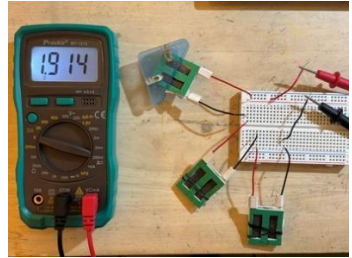
1. 石墨組的極致穩定性：展現了極佳的電壓維持度，在補水重啟後，其負載電壓恢復率高達 93.1%，這說明了石墨電極的物理結構在乾燥循環中極為穩定，較適合需要長效、多次重啟的應用場合。
2. 二氧化錳(20%)組雖然功率密度恢復率看來較低(因首日巔峰值極高)，但其再活化後的負載電壓仍維持在 0.46V，這比石墨片、竹炭組及二氧化錳(10%)組的首日巔峰值還要高，這意味著催化劑在休止後依然保有強大的反應活性。
3. 二氧化錳(30%)組在再活化後的負載電壓恢復率高達 79.7%，且負載功率密度高達 $80 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。這可能是因為 30%這顆電池別是三個二氧化錳電池中，第一組接受測試的組別，受限於焊錫接點碎裂與摺疊不密合導致的高接觸電阻，使其在第一次放電時的輸出能力被嚴重抑制。

實驗組別	初始負載電壓 (啟動後 30min)	再活化負載電壓 (再啟動後 10min)	電壓恢復率(%)	負載功率密度	
				數值($\mu\text{W}/\text{cm}^2$)	恢復率(%)
石墨片	0.38 V	0.36 V	93.1 %	31.7	86.6 %
竹炭粉	0.42 V	0.19 V	45.6 %	9.3	20.8 %
二氧化錳 (30%)	0.71 V	0.57 V	79.7 %	80.1	63.6 %
二氧化錳 (20%)	0.97 V	0.46 V	47.4 %	52.9	22.4 %
二氧化錳 (10%)	0.81 V	0.32 V	39.3 %	24.9	15.4%

表八、三種陰極塗料配方電池的再活化效能數據(作者自製)

(四)緊接在第三次電池測試的再活化實驗後，我們串聯使用一顆石墨組電池，搭配兩顆第二次測試的電池(石墨組及 20%二氧化錳組，已完成 5 小時首度測試及 1 小時再活化測試，添加 0.1ml 3M NaCl 溶液進行第二次再活化)，提供電力可讓一顆自

閃爍型紅光 LED 發光，而在搭配一顆 $100\mu\text{F}$ 電容的情況下，還可更些微提高 LED 亮度，如以下圖十四所示。三顆電池串聯開路電壓一開始是 2.1V ，讓 LED 燈發光兩小時後，降至 1.9V 。

		
串聯電壓 2.1V	自閃型紅光 LED 發亮	自閃 LED(1.8V)與 $100\mu\text{F}$ 電容
		
LED 於暗室內發光	LED 發光強度	1.9V (LED 發光 2 小時後)

圖十四、二度再活化電池的串聯及 LED 發光實驗(作者自攝)

伍、討論

一、重現原始參考論文的鋅空氣紙電池

(一)我們依照參考論文所提供的方法，的確能製作出紙電池，並在加水啟動電池沒多久後，測得 1.19V 的電壓，此結果與論文的電池電壓 1.2V 相近。

(二)我們一方面驗證了利用氯化鈉溶液為電解液的鋅空氣紙電池可行性，另一方面我們也因此證明了我們執行實驗的能力。如此一來，當我們改變某些變因時，例如陰極塗料的組成成分，如果沒有得到更好的結果，我們才能推論是此項變因無法帶來電池效能的優化，而非是實驗過程的問題。

二、不同設計對紙電池效能的影響

(一)簡化電極塗料製作：

1. 蟲膠就算使用乙醇，也不是可以立刻溶解，而且乙醇的量如果太少，即使是依照參考論文提供的比例也不容易均勻混合電極材料。但如果配製大量的電極塗料，未使用將會形成浪費，而且也不利於我們使用不同的材料及組成來探討電池效能，所以我們採用預先製作固定比例的蟲膠與乙醇製作蟲膠液使用，並簡化電極塗料的比例配方，而製作出的電池效能也很好。雖然蟲膠在本實驗中可勝任黏合劑的角色，但畢竟這還是一種天然的生物原料，若需大量進行商業運用，仍需考量對生態之影響。

2. 我們是在開放環境下進行電極材料的混合，再加上採小量製作，過程中面臨因乙醇揮發而需額外補充才能讓材料均勻混合的情形，若是使用封閉試管混合較大量的材料，並運用震盪器，應該能得到更精準的電極塗料。

(二)使用不同紙張為電池紙：

紙張的吸水性會影響電池啟動的速度，但紙張的強度也必須能乘載電極塗料。我們選擇生活中較容易取得的紙張進行實驗，而非實驗室等級的濾紙。宣紙平整適合塗抹電極塗料，但是單純滴加水分於紙上不會立即吸收，所以我們想出將宣紙摺疊並於其中添加一張衛生紙的做法，不但啟動電池時吸收迅速，且能涵納更多電解液。

(三)電解液使用方式的效能差異：

1. 我們在紙電池製作完成後，尚未添加水啟動電池時，就已經能夠測得電壓。推測是因為我們在塗抹電極塗料後，只有用吹風機進行乾燥，並沒有像參考論文的作法，在每一次塗抹塗料後，都在 60°C 的環境下進行十分鐘的乾燥程序。可能因殘留的水分，加上預先留置在紙上的 NaCl ，因而引發放電反應。
2. 空氣中也有水分子，若紙電池的紙張中有預先添加氯化鈉，則可能會自然引發放電反應，但若是在商業化的運用時，應該能利用真空包裝避開氧氣及水分的接觸而解決這個問題。
3. 我們的實驗發現，只要紙電池吸收液體的速度夠快，添加純水或氯化鈉溶液對於啟動電池的速度並無太大的影響。使用預先添加氯化鈉成分於紙張的做法，主要的考量應該是為了在啟動電池時的便利性。

(四)九宮格紙電池的摺疊串聯實驗：

九宮格紙電池彼此之間必須確實絕緣才能避免短路現象，也因此啟動電池時必須逐格添加水分較不方便，但我們仍初步驗證了摺疊串聯的可行性，若想具實用性則在紙電池的設計上需有更進一步的優化改良。

(五)折疊式、單面雙電極的紙電池設計：

我們發現施加水分於紙電池時，有時紙張吸水性很差，部分原因可能是因為額外添加的乙醇，造成蟲膠液滲入紙張所導致。因此我們嘗試使用單面電極塗層的折疊式設計，單面塗布的優勢在於能保留紙張另一面的孔隙率，優化水分的自然毛細行為而幫助水分吸收。

三、設計比較電池性能的標準紙電池製作法、測試環境及效能指標

(一)折疊式的紙電池設計，若是紙張無法緊貼，反而會增加兩極之間的距離或減少接觸面積，因而影響效能。所以我們在紙電池之間再加入柔順度及吸水性都更好的衛生紙，除了有助於折疊式紙電池陰陽極的貼附外，也能增加保水性，而且啟動電池的能力相當好，所有組別的電池皆於啟動一分鐘時，可達到其最大開路電壓的90%以上。此外，當摺疊得越緊，陰陽極與中間鹽橋的接觸面積越穩定，通常能獲得更穩定的電壓輸出，因此我們設計將折疊式紙電池夾在紙板之間來測試效能，以期能得到穩定的電壓。

(二)因為我們是使用水彩筆進行電極塗料的塗抹，可能造成電極厚度的差異而影響效能，所以我們利用紙板輔助進行標準化的塗料塗抹，以減少探討不同電極材料時的誤差。

(三)我們因為曾經用紙板蓋住陰極(空氣電極)導致開路電壓急速下降，所以注意到陰極必須與空氣接觸良好以發揮電池效能。

(四)雖然 LED 發光比起利用三用電表得到的生冷數據更能展示紙電池的發電效果，但因為紅光 LED 的導通電壓約為 1.8V，單張紙電池並無能力驅動，而且 LED 屬於非歐姆式導體，也不適合用來進行效能的比較。我們採用 1k Ω 電阻進行負載放電測

試，不但能評估真實環境下的放電能力，而且換算數據方便。另外採用麵包板建立測試環境，也能降低因實驗操作而損傷電池的機會。

(五)我們整理原始參考論文(參考資料一)的相關電池規格及性能表現如下，並與我們所製作的紙電池效能做比較。

1. 加水啟動電池，20 秒可達穩定開路電壓 1.2V。
2. 測量提供負載電流 0.1~1mA 時的負載電壓，發現於 0.5mA 時，可得到最大功率為 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。我們根據 $P = V \times I$ 計算此時的負載電壓應是 0.3V。
3. 電池於提供 0.1mA 的條件下放電一小時，因電池紙逐漸乾燥負載電壓由 0.6V 逐漸下降。添加 100mg 水分後，可於負載電壓 0.5V 及電流 0.1mA 的條件下繼續放電超過一小時。我們計算此時的電池功率應該是 50~60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。

四、三種塗料(標準石墨片、竹炭粉、添加二氧化錳作為催化劑)製作陰極電極對電池效能的影響

(一)添加二氧化錳作為催化劑可增進電池效能。

1. 於石墨片中加入二氧化錳(20%)當作催化劑，可得到最好的電池效能，開路電壓可達 1.46V，初始負載功率密度更可達 235 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，接近原始論文的 4 倍。放電 1.5 小時後負載電壓仍有 0.53V，而負載功率密度為 70 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，仍高於參考論文的結果。
2. 30%二氧化錳的組別，雖然在 5 小時的效能測試中，表現低於 20%組，但是於 1 小時的再活化測試中表現出最佳的效能，負載功率密度甚至可達到 80 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。這可能是因為 20%組在優化後的測試設備下全力輸出，消耗了大量的鋅與電解質，而 30%組則因硬體受限導致處於低功率運行狀態，這使得它在再活化實驗時擁有更多的燃料存量，從而表現出較高的效能恢復。所以關於添加二氧化錳當作催化劑的最佳比例，仍待後續實驗探討。

(二)石墨片組的效能表現與參考論文相似。

1. 在本次實驗中，與原始參考論文同配方的石墨片標準電池效能次之，開路

電壓在啟動 1 分鐘之後就達到 0.95V，放電 1.5 小時後負載電壓仍有 0.42V，而負載功率密度為 43 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，這個結果與參考論文的數據接近。

2. 至於無法達到 1.2V 的開路電壓，可能是因為我們採取簡化之配方、或是電極塗料製作及塗抹不若參考論文優良所導致。但在負載狀態下時，原始參考論文的負載電壓也是多低於 1.2V(最大功率時的電壓是 0.3V；以 0.1mA 電流輸出進行負載測試時的電壓約為 0.5~0.6V 之間)，所以我們覺得我們所製作的紙電池無法達到 1.2V 的開路電壓並不影響其效能表現。

(三)竹炭粉組表現效能最差，但仍具發展潛力。

1. 雖然竹炭組效能表現最差，但啟動後開路電壓迅速上升，於 30 分鐘時可達 1.23V，甚至高過參考論文的石墨片電池，但是在負載狀態下的效能最差。
2. 我們觀察到竹炭粉能形成三組之中最勻質的塗料，推測是讚炭工房的竹炭粉顆粒太細的關係，但我們沒有相關顆粒大小的規格數據。由細顆粒所製作的電極層可能壓縮了空氣進入的空間，調整電極塗料配方如混合部分石墨片，應仍有改善效能的空間。

五、總結討論

(一)關於塗料的量對於電池效能及持久性的影響，仍須進一步的研究，才能找出最有效率又可減低製作成本的配方。雖然利用中性電解液的鋅空氣紙電池效能較低，但因製作簡便及環保特質，搭配紙張可以有多樣化的設計，利用串聯仍有很大的發展潛力，絕不是只有單一的完美設計。

(二)參考論文中展示了利用兩顆紙電池串聯，為一個 LCD 時鐘供電顯示的例子，他們也提到鋅空氣紙電池具有為一次性低功耗的電子設備供電的潛能。我們在本次實驗中，利用串聯三個於 1k Ω 負載下，經過 4.5 小時放電及 50 分鐘再活化放電的紙電池，成功讓自閃爍型紅光 LED 發光兩小時，而且在黑暗環境中仍具有明顯辨認之亮度，若是使用初次啟動且高效能的電池(添加二氧化錳作為催化劑)，也許可降低串聯電池數量並提高性能表現。

陸、結論

我們參考一篇國外論文，探討利用鋅粉和氧氣作為電極材料，以及使用食鹽水為電解液的紙電池效能。除了依照文獻方法重現效能相近的紙電池外，我們也研究各種做法的紙電池，包括利用讚炭工房竹炭粉作為陰極助導劑以及添加二氧化錳為催化劑的設計。我們發現透過添加 20% 二氧化錳的催化配方，可將使用中性氯化鈉電解液的鋅空氣紙電池開路電壓提升至 1.4V 以上，初始負載功率密度達 $235 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 。運用折疊式、單面雙電極電池設計搭配紙板夾具，能優化電極密合度、提升功率輸出及長時間穩定放電，而且具備加水再活化之能力。雖然利用中性電解液的鋅空氣紙電池效能較低，但因製作簡便及環保特質，仍可藉由串聯形式提供足夠電壓，具有應用在一次性低功耗電子設備上的潛能。

柒、參考文獻資料

一、Poulin, A., Aebly, X. & Nyström, G. (2022). Water activated disposable paper battery.

Scientific Reports, 12, 11919. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-15900-5>

二、Suchocki, J. (2020)。觀念化學 3。遠見天下文化。

三、李柏潔、胡啟章（2015）。鋅空氣電池的發展現況與研發。化工，62(4)，3-18。

[https://doi.org/10.29803/CE.201508_62\(4\).0002](https://doi.org/10.29803/CE.201508_62(4).0002)

四、廖彥森、李耕宇（2017）。利用摺紙藝術製作發電裝置。中華民國第 57 屆中小學科學展覽會。

五、李欣穎（2018）。「紙」能生電？！—自製薄膜電池效能分析。中華民國第 58 屆中小學科學展覽會。

六、楊詠蓁、薛宜珊、陳育堂（2020）。只（紙）是（式）電池。中華民國第 60 屆中小學科學展覽會。