

新竹市第四十四屆中小學科學展覽會
作品說明書

科 別：化學

組 別：國中甲組

作品名稱：「鋅」球崛起-製作出三維球體結晶

關 鍵 詞：鋅球、鋅花、結晶

編號：115JA-C001

摘要

本研究以電解硫酸鋅水溶液為主軸，想透過不同變因，做出最堅固且形狀固定的三維鋅金屬結晶。我們參考了歷屆科展中製作電解硫酸鋅之鋅金屬結晶的作品，透過電鍍的原理，將溶液中的鋅離子還原成鋅金屬，逐漸沉積在不同負極材料上，長出鋅金屬結晶。

我們自製實驗裝置，製作出三維結晶，利用三視圖，並運用體積公式，估算三維的鋅球大小。實驗就施加不同電壓（3V、5V、7V）、溶液濃度（0.5M、0.25M、0.125M）及負極材料（錫線、銅線、白鐵線）進行討論。

實驗數據顯示當固定正、負極材料時，結晶大小均會與電壓、濃度大小成正比；而當改變負極材料時，結晶生長的大小趨勢為：銅>錫>白鐵；濃度越小則結晶越容易鬆脫。

壹、研究動機

在校內資優社團課老師上課時有補充到鋅銅電池與電鍍的比較，相較於自發氧化還原的鋅銅電池，鋅銅電鍍是靠外接電源，去強迫其發生氧化還原，進而使溶液中的金屬陽離子以固體形式還原於負極材料上。

而目前在學校自然課本中，尚未學習過有關於電池與電鍍的知識，因此我們都保持非常高的好奇心和疑問。我們思考了許久，決定依照鋅銅電鍍往外延伸，從歷屆科展中，看見鋅能夠在特定條件下形成如「鋅花」的晶體，既有藝術價值，也展現化學的樂趣。

許多人都已經有在二維結晶上研究，並有成功做出二維結晶，延伸出了許多新奇的研究。但我們參考了許多文獻和歷屆科展報告，他們的研究，結晶都是以平面為主，尚未嘗試過立體圖形，所以我們想要試試看透過鋅銅電鍍的原理使鋅金屬結晶在負極材料上，是否能做成立體形狀的晶體。若是成功了，是否能控制其大小、形狀呢？因此，本研究希望在固有的研究基礎上，嘗試改變電極配置、濃度或電壓，使鋅結晶能成為立體的三維晶體，並探討不同實驗參數對其大小的影響。

貳、研究目的

- 一、製作鋅結晶實驗裝置。
- 二、找出讓鋅結晶形成立體結構的方法。
- 三、探討不同電壓對鋅結晶大小的影響。
- 四、探討不同硫酸鋅濃度對鋅結晶大小的影響。
- 五、探討不同負極材料對鋅結晶大小的影響。

參、研究設備及器材

燒杯	量筒	電子秤	硫酸鋅
			
供電器	秤量紙	壓克力盒	滴管
			
漏斗	容量瓶	玻棒	鱷魚夾
			
尖嘴鉗	剪刀	方格紙	水

			
鉗片	漆包銅線	刮勺	白鐵線
			
膠帶	錫線	漏斗架	磨砂紙
			
護貝機	護貝膜	計時器	培養皿
			
銅棒	熱溶膠槍	熱溶膠條	尺

			
標籤貼紙	美工刀	衛生紙	
			

肆、研究過程或方法

一、實驗原理

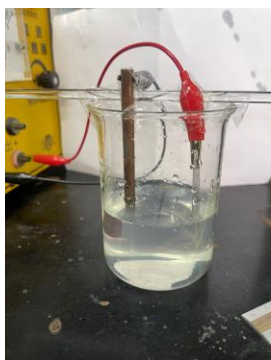
我們製作鋅金屬結晶的原理同電鍍概念，將欲鍍之金屬（鋅）放置於正極，而被鍍物（銅線、錫線、白鐵線）放置於負極，並使用含有欲鍍金屬離子（ Zn^{2+} ）的溶液，使溶液中的鋅離子還原成鋅金屬，逐漸沉積在不同負極材料上，長出鋅金屬結晶。

二、實驗裝置設計與改良

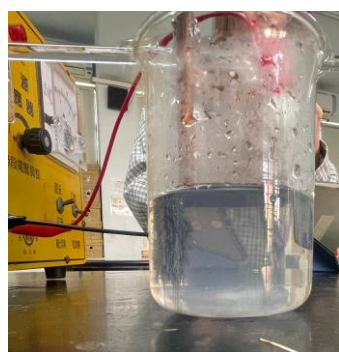
（一）實驗試做與反應槽設計

1. 使用 500 mL 的燒杯，裝入 0.5 M 的硫酸鋅水溶液 150 mL。
2. 銅棒當作負極、鋅片作為正極，分別連結電源供應器的負、正極，放入硫酸鋅水溶液中。
3. 杯口上方橫著放玻棒以固定銅棒及鋅片，並用膠帶固定，如圖一。
4. 使用直流電，將電壓開到最大的 35V，成功做出的鋅金屬結晶。

此次嘗試的結果結晶形狀偏長，且會掉殘渣，雖然並非我們所想的形狀，但依然證明了實驗的可行性，如圖二、圖三。



圖一：實驗初步裝置



圖二：實驗初步成果



圖三：實驗初步結晶型態

（二）發現問題

通過此試驗我們發現裝置問題：

1. 金屬棒直徑過大難以用鱷魚夾固定，容易鬆動掉入反應槽。
2. 正極和負極材料需要使用大量膠帶才能固定，每次換取材料時，都需要重新固定膠帶，非常不方便也不環保。
3. 拍攝實驗成果時，燒杯的曲面有放大效果，不方便測量出鋅金屬結晶之體積。

（三）實驗裝置改良

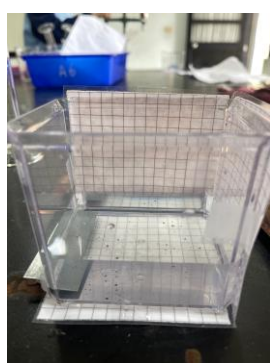
為了方便後續實驗，並讓結晶能夠有足夠生長的空間，我們決定自製實驗裝置，改良這些問題，讓設備更完善。

1. 使用 7.4 cm x 9.5 cm 的壓克力盒，並在右側底部鋸出一條厚度約為 0.05 cm 的縫隙，以放入長 5 cm x 寬 3 cm x 厚度 0.03 cm 的鋅片作為正極，並將空隙使用熱熔膠封好，確保裝置密封性。
2. 分別壓克力盒底部、正面、右側面貼上方格紙，方格紙每小格邊長為 0.65 cm，方便測量體積。
3. 更改各種不同金屬的負極材料，正極材料控制為鋅片。將銅線（負極）凹折出一個圓形，使用鐵製漏斗架固定。
4. 漏斗架為金屬材質，我們在負極材料與漏斗架之間用絕緣體（衛生紙與膠帶）隔開，保障實驗過程無其他導電因素影響，如圖四。鋅片（正極）連接正極鱷魚夾，銅線（負極）連接負極鱷魚夾。

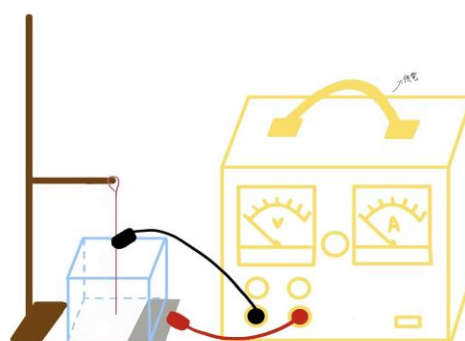
此實驗裝置能保持每次實驗中，**負極材料與鋅片的距離皆一致**，在更換負極材料時和測量體積時也更加方便，能大大減少實驗誤差。實驗裝置如圖五和圖六。



圖四：使用絕緣體



圖五：實驗反應槽



圖六：實驗裝置示意圖

使金屬架不影響實驗

（四）找出讓鋅結晶形成立體結構的方法

我們想要做出更立體更完整的三維結晶，於是想改變負極放入硫酸鋅水溶液中的狀態。我們以負極材料為銅線、電壓 5V、電鍍時長兩分鐘、0.5M 的硫酸鋅水溶液為控制變因進行實驗。實驗結果如表一。我們分為**三種負極末端狀態**：

1. 依照原狀，鉛直下垂：

形成的結晶球體，如表一，但因為泡入硫酸鋅水溶液中的長度過長，呈現的有點類似長條圓柱體，並非我們所想像的正圓立體球狀。

2. 將末端捲成球體：




將銅線末端捲成直徑 0.65 cm 的球體（利用邊長約 0.65 cm 的正方格量測而得），形成結晶之球體跟第 1 種狀態所形成的結晶形狀相似，大小略有不同。但因白鐵線、銅線的硬度有些大，很難操作，並且也很難捲成完全實心的球體，導致

在銅線捲成的球體空隙中有硫酸鋅水溶液結晶，這樣在之後計算體積時非常不易分辨，實驗誤差也會變大。

3. 將末端捲成垂直環狀：

形成的結晶繞著環形圈長，生長不均勻，中間為空心的，形狀並非我們所想像的立體球狀。

表一：不同電極末端形狀，施加電壓 5V 兩分鐘，電解 0.5 M ZnSO₄(aq)，鋅金屬之生長情形

電壓	5 V		
ZnSO ₄	0.5 M		
電鍍時長	2 mins		
負極末端	鉛直下垂	球體	圓環
金屬生長情況			

(五) 確定實驗裝置與變因

1. 決定負極末端型態：

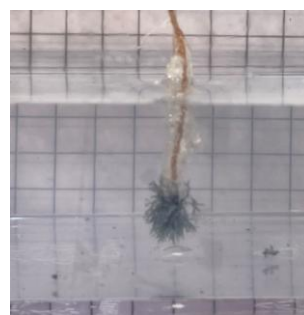
經過以上實驗，我們以「觀察是否更方便省時」、「外觀形狀更接近於圓球體」、「實驗誤差越小」為依據，得出的結論為——依照原狀、鉛直下垂的負極材料狀態——更為合適。

2. 改善硫酸鋅水溶液液面下之電極長度難以控制之問題：

我們使用熱溶膠把下方電線幾乎封起來，留最下面約 0.05 cm 極小的空隙，如圖六。這樣用熱溶膠（絕緣體）封住的地方無法導電，因此上端不會產生鋅金屬結晶，這樣末端產生出的鋅金屬結晶更為立體球狀，如圖七。



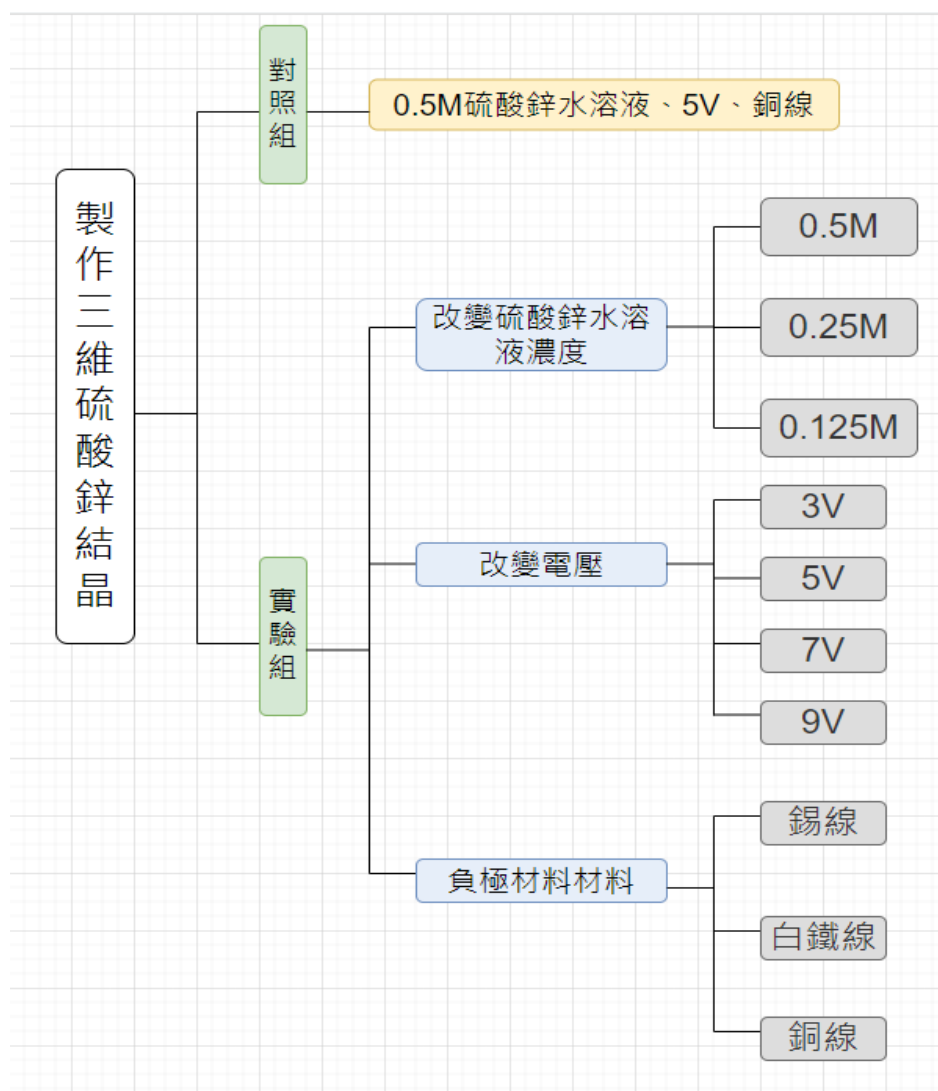
圖六：以熱溶膠封住負極金屬，留下末端



圖七：金屬生長情況

三、 鋅金屬結晶實驗

我們實驗大致分為四個部分，以 0.5M 硫酸鋅水溶液、5V 電壓、負極材料銅線為對照組，之後再分別改變硫酸鋅水溶液濃度、電壓、負極材料延伸出變因，列為實驗組。而我們每個實驗結果都從正面、側面、上面，分別拍了圖片，來觀察不同電壓、硫酸鋅水溶液濃度、不同負極材料所產生的硫酸鋅水溶液結晶的體積變化。



圖八：實驗架構圖

(一) 對照組

以 0.5 M 硫酸鋅水溶液、5 V 電壓、負極材料銅線為對照組。

學校所提供的銅線為漆包線，因此，我們用砂紙將預導電處磨掉，並先測試過能夠成功導電後，才開始實驗。

(二) 實驗一：改變不同電壓對結晶大小的影響

控制變因：0.5 M 硫酸鋅水溶液、負極金屬材料、電鍍時長。

操縱變因：3V、5V、7V、9V。

比較結晶的大小。

(三) 實驗二：改變不同負極材料對三維結晶大小的影響

控制變因：0.5 M 硫酸鋅水溶液、電壓、電鍍時長。

操縱變因：銅線、白鐵線、錫線

比較結晶的大小。

(四) 實驗三：改變不同硫酸鋅水溶液濃度對三維結晶大小的影響

控制變因：電壓、電鍍時長、負極金屬材料。

操縱變因：0.5 M、0.25 M、0.125 M 硫酸鋅水溶液

比較結晶的大小。

1. 0.25 M $ZnSO_4(aq)$ 配置：

使用 0.5 M $ZnSO_4(aq)$ ，逐步稀釋，用量筒測量出 250 mL 的 0.5 M $ZnSO_4(aq)$ ，並用 250 mL 的水稀釋，獲得 0.25 M 的硫酸鋅水溶液 500 mL。

2. 0.125 M $ZnSO_4(aq)$ 配置：

用上述相同方式，量出 250 mL 的 0.25 M $ZnSO_4(aq)$ ，並用 250 mL 的水稀釋，可獲得 0.125 M 硫酸鋅水溶液 500 mL。



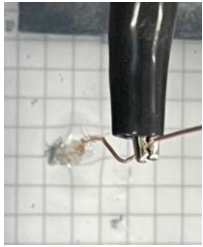
四、初步討論

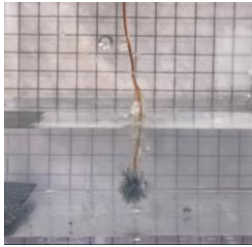

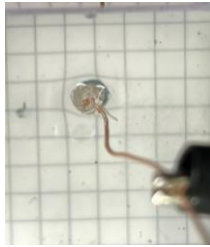


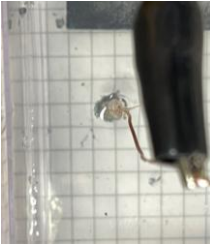
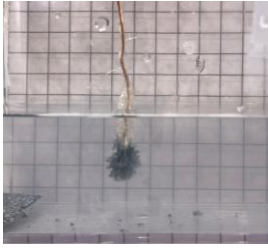
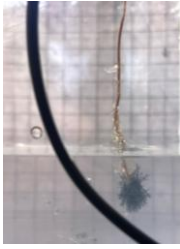
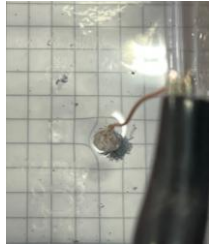
(一) 實驗一、二：改變不同電壓，對各負極金屬材料上結晶大小的影響

以下數據皆以一個正方格邊長為 0.65 cm 去估算體積，得到以下數據。





1. 銅線作為負極材料時在不同電壓下結晶的實驗結果

表二：硫酸鋅水溶液在銅線作為負極材料時在不同電壓下結晶的實驗結果

電壓 (V)	結晶體積 (cm^3)	前視圖	側視圖	俯視圖
3	約 0.060			

5	約 0.09715			
7	約 0.15890			
9	約 0.23051			

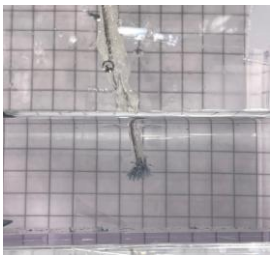
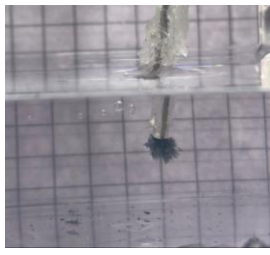
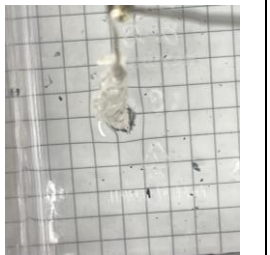
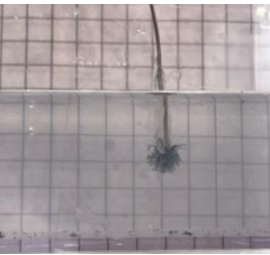
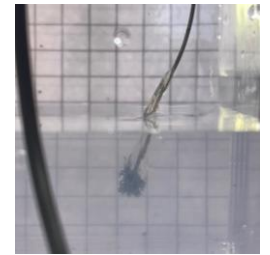


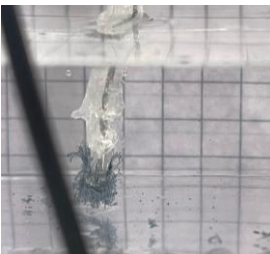
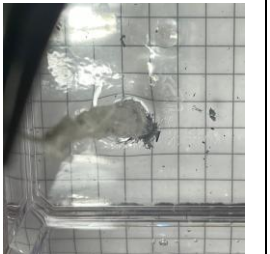
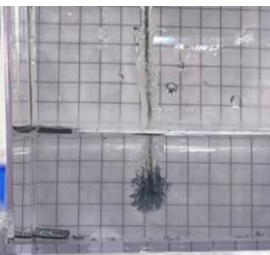
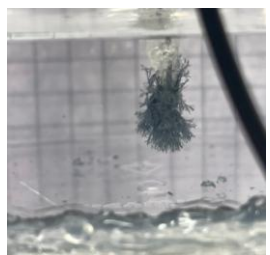
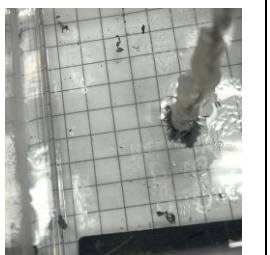
表三：銅線為負極材料時，各電壓下的電流大小

電壓 (V)	3	5	7	9
電流				


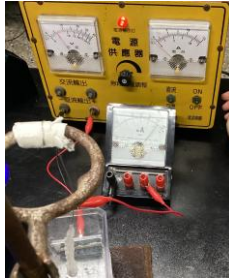


註：下面的孔連結的地方不一樣，3V、5V 是 500 毫安培，7V、9V 是 5 安培

2.錫線作為負極材料時在不同電壓下結晶的實驗結果

表四：硫酸鋅水溶液在錫線作為負極材料時在不同電壓下結晶的實驗結果

電壓 (V)	結晶體積 (cm ³)	前視圖	側視圖	俯視圖
3	約 0.01029			
5	約 0.01960			
7	約 0.01965			
9	約 0.23051			


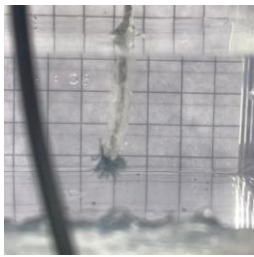
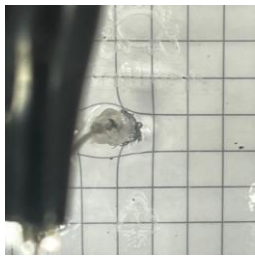
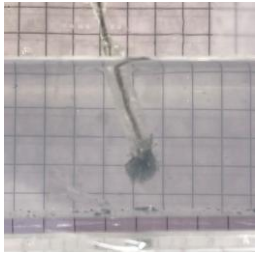
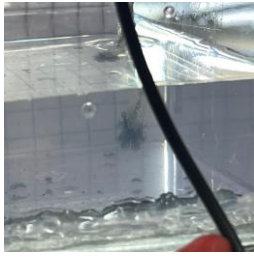
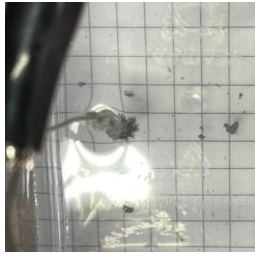
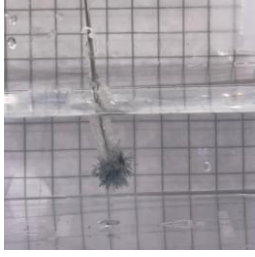

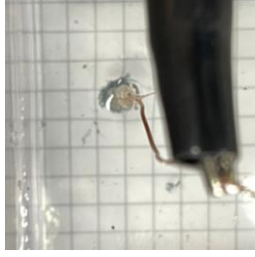
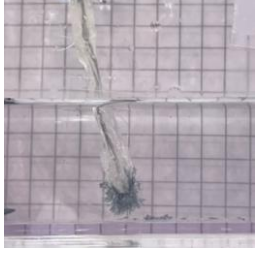

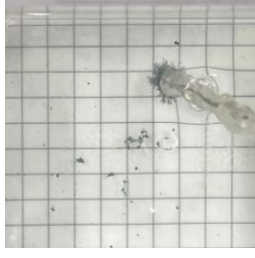
表五：錫線為負極材料時，各電壓下的電流大小

電壓 (V)	3	5	7	9
電流				


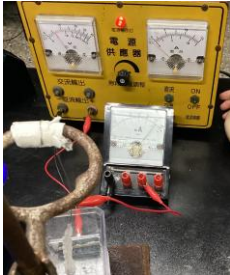

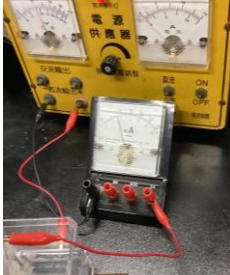
註：下面的孔連結的地方不一樣，3V、5V 是 500 毫安培，7V、9V 是 5 安培

3.白鐵線作為負極材料時在不同電壓下結晶的實驗結果

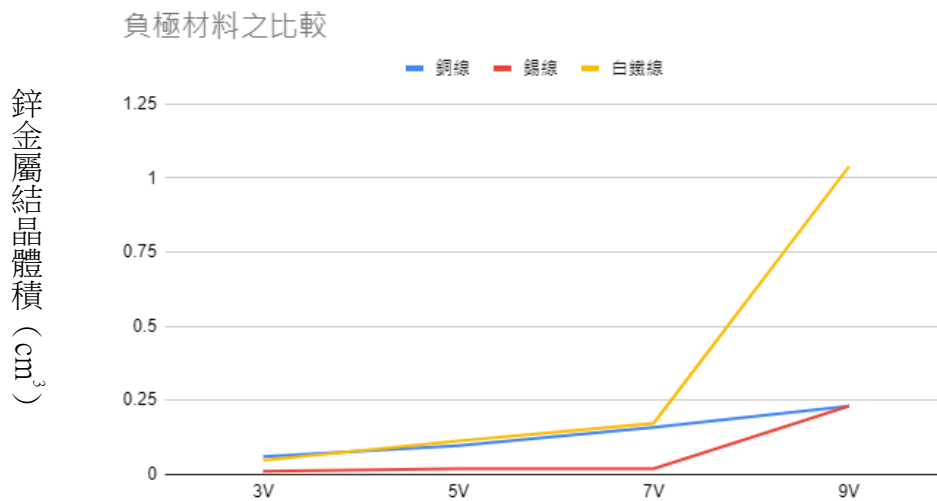
表六：硫酸鋅水溶液在白鐵線作為負極材料時在不同電壓下結晶的實驗結果

電壓 (V)	結晶體積 (cm ³)	前視圖	側視圖	俯視圖
3	約 0.04829			
5	約 0.11321			
7	約 0.17198			
9	約 1.0388			

表七：白鐵線為負極材料時，各電壓下的電流大小

電壓 (V)	3	5	7	9
電流				

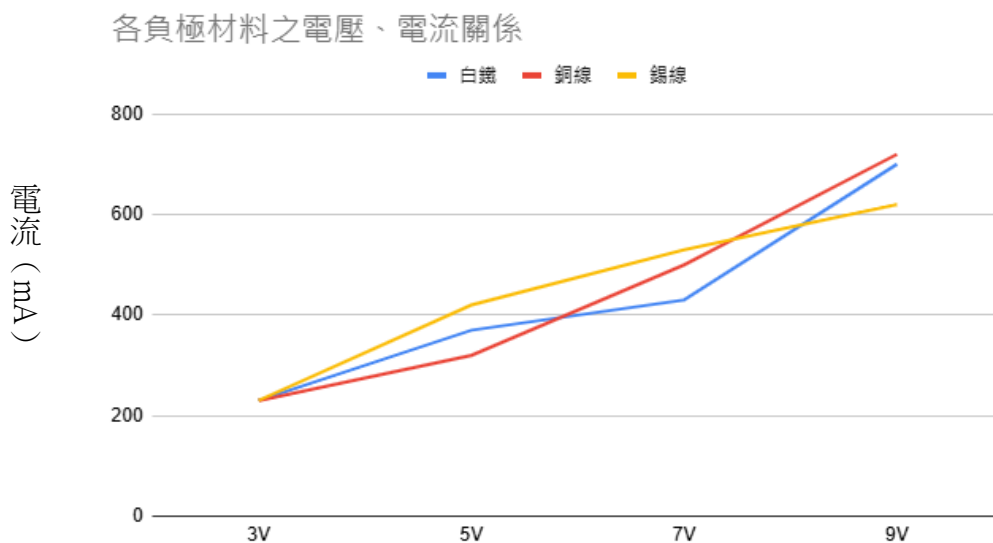
註：下面的孔連結的地方不一樣，3V、5V 是 500 毫安培，7V、9V 是 5 安培
 比較三種負極材料的實驗結果：



圖九：比較不同負極材料在各電壓下的結晶大小

1. 在同為 3V 的情況下，負極材料為**銅**體積最大。
2. 在同為 5V 的情況下，負極材料為**白鐵**體積最大。
3. 在同為 7V 的情況下，負極材料為**白鐵**體積最大。
4. 在同為 9V 的情況下，負極材料為**白鐵**體積最大。






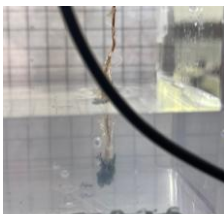

綜合以上，我們認為拿**白鐵線**作為負極材料時，立體結晶的體積最大。



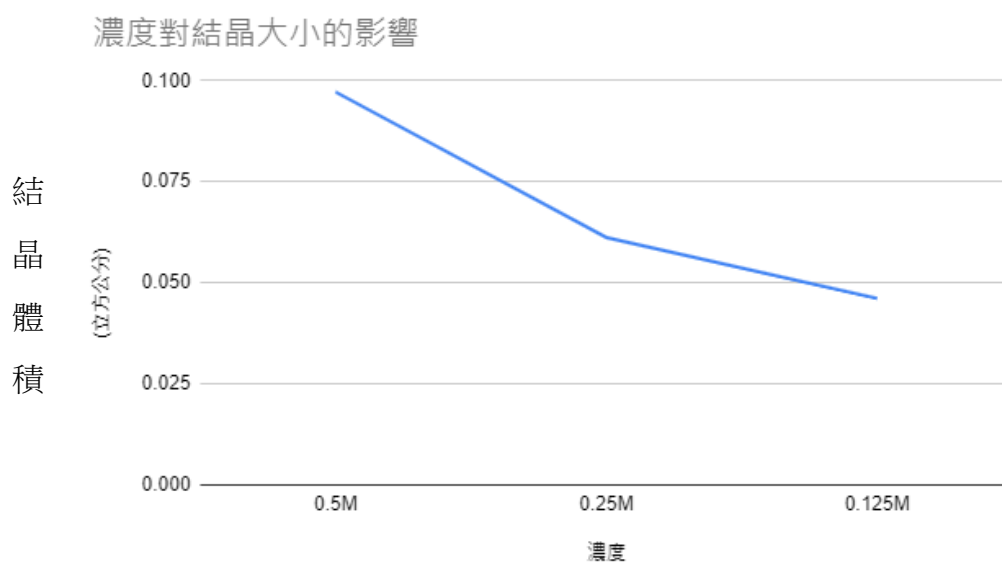
圖十：各負極材料電壓與電流關係圖

(二)實驗三：改變不同硫酸鋅水溶液濃度，對各負極金屬材料上結晶大小的影響

表八：不同硫酸鋅水溶液濃度在相同電壓、負極材料電鍍下的實驗結果

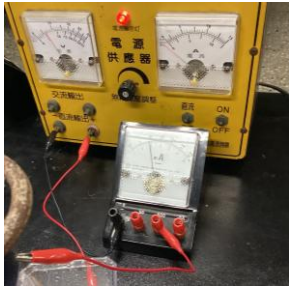

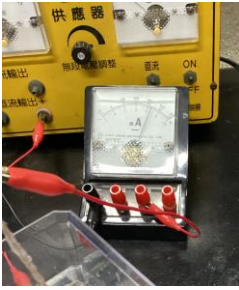
ZnSO ₄ (aq) (M)	鋅金屬 體積(cm ³)	前視圖	側視圖	俯視圖
0.125	約 0.04616		過程中掉落	過程中掉落
0.25	約 0.0612			
0.5	約			

濃度越大球狀結晶就會越鬆散；反之濃度越小球狀結晶就越緊密。

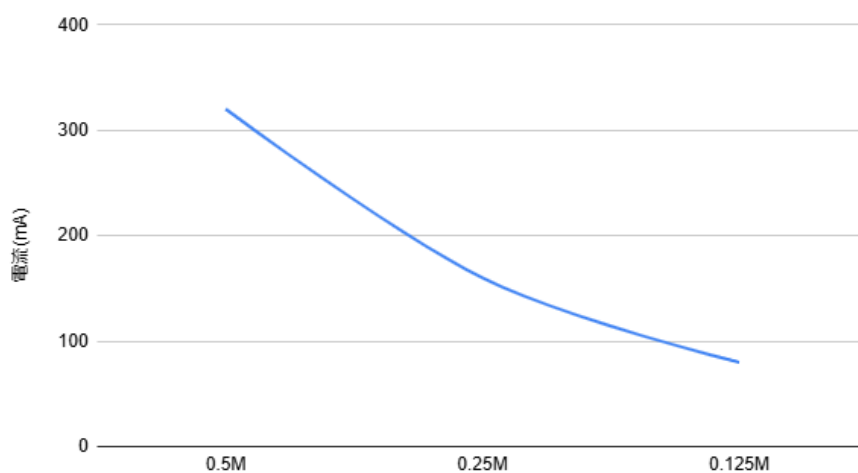


圖十一：不同硫酸鋅水溶液濃度對結晶大小關係圖

表九：不同 ZnSO₄(aq)濃度下的電流

ZnSO ₄ (aq)濃度 (M)	0.125	0.25	0.5
電流			

不同濃度與電流之關係圖



圖十二：硫酸鋅濃度與電流大小關係圖

五、尋找算出較準確體積的方法

雖然成功做出了較圓的鋅金屬立體結晶，但是經過以上實驗我們發現做出來的鋅金屬結晶疏密度不同，呈現不規則形狀，有些偏立體橢圓形，並非每個正立體圓球狀，而且鋅金屬結晶很容易從金屬負極材料上面脫落，各方面都很難控制。因此我們無法得出確切的體積數據，只能以一個方格紙上邊長為 0.65 cm 的方格去估算半徑，並以立體橢圓形公式去計算體積。我們認為這樣算出來的體積數據較缺乏說服力。

因此為了讓體積更準確，我們決定使用「ImageJ」此應用程式，這個軟體是透過計算通過「閾值分割 (Threshold)」後被選中的 3D 像素（即體素）數量。公式如下：

$$\text{體積} = \text{體素總數} * (\text{單個體素的長} * \text{寬} * \text{深度})。$$

我們使用時分為三個步驟，即能測出體積，如下：

1. 告訴軟體 3D 空間的真實尺寸。

在 Image → Properties 中，除了設定 Pixel Width/Height，最重要的是 Voxel Depth（切片厚度

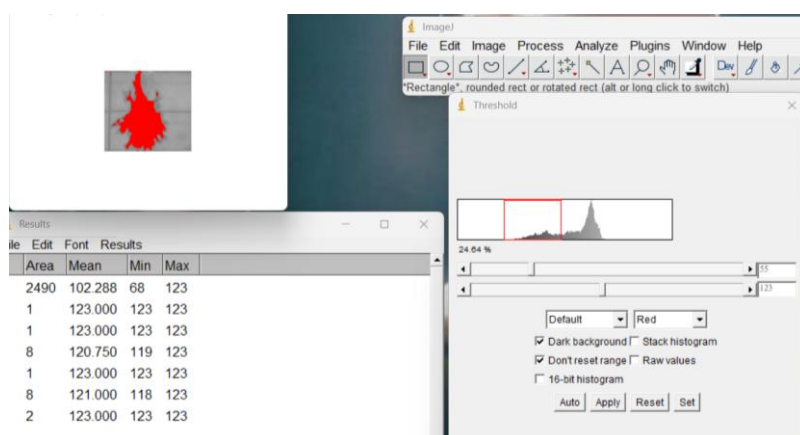
或掃描步進距離），告訴它一個方格的真實尺寸，而我們的方格邊長為 0.65*0.65 公分。

2. 電腦需要知道哪些像素屬於「物體」，哪些是「背景」。

使用 Image → Adjust → Threshold，軟體會將物體染成紅色。只有被紅色覆蓋的像素，才會被納入體積計算。

3. 使用 3D Objects Counter 或 3D ROI Manager 自動過濾掉太小的雜訊。

（例如小於 10 個體素的點不計入）。



圖十三：軟體操作介面

此為實際應用的範例圖，以上所有結果都是以此為基準而算出的，能夠大幅減少誤差和估計的誤差。運用此方法計算出研究結果。

伍、研究結果

一、電壓與負極材料對結晶體積之影響

表十：銅線、錫線、白鐵線作為負極材料，改變電壓結晶體積大小實驗結果

電壓 (V)	鋅金屬結晶體積 (cm ³)		
	銅線	錫線	白鐵線
3	0.060	0.01029	0.04829
5	0.09715	0.01960	0.11321
7	0.15890	0.01965	0.17198
9	0.23051	0.23051	1.0388

隨電壓從 3V 提升至 9V，所有材質上的鋅結晶體積均有增加。

(一) 材質差異討論

1. 銅線：在低電壓 (3V-9V) 時表現最穩定，生長的結晶均勻且隨電壓穩定成長。
2. 白鐵線：在 9V 高電壓下表現異常突出，結晶體積達到 1.0388 立方公分，遠超其他材質。
3. 錫線：生長反應較慢，在 7V 以下體積成長不明顯，直到 9V 才出現較大的增長。

二、硫酸鋅溶液濃度對結晶體積之影響

表十一：固定負極材料 (銅)、電壓 (5V)，不同 ZnSO₄(aq)濃度下結晶體積實驗結果

ZnSO ₄ (aq)濃度 (M)	0.125	0.25	0.5
結晶體積 (cm ³)	0.04616	0.0612	0.09715

濃度正相關：

當濃度從 0.125 M 增加到 0.5 M 時，結晶體積從 0.046164 cm³ 增加至 0.09715 cm³。

三、電壓與負極材料對電流之影響

表十二：銅線、錫線、白鐵線作為負極材料，改變電壓，電流大小實驗結果

電壓 (V)	電流 (mA)		
	銅線	錫線	白鐵線
3	230	230	230
5	320	420	370
7	500	530	430
9	720	620	700

觀察電流數據：

1. 電流隨電壓升高：電壓越高，迴路電流越大。在 9V 時，銅線的電流最高（720mA）。
2. 導電性影響：銅線的優良導電性反映在電流數據上，電流變化也大致呈規律遞增。

表十三：固定負極材料（銅）、電壓（5V），不同 ZnSO₄(aq)濃度下電流的實驗結果

ZnSO ₄ (aq)濃度 (M)	0.125	0.25	0.5
電流 (mA)	320	160	80

陸、討論

我們觀察發現結晶的方向不能控制，有些會往內長變密集，有些卻向外生長較多變稀疏，所以最後算出來的結果沒辦法太準。如果這個實驗需要繼續延伸，我們會想計算出結晶的密度和質量，讓數據更完整的同時，也能減少誤差。因為將三維結晶取出並計算質量會破壞結晶結構，未來，我們會想找出能夠在不破壞結晶的前提下，算出質量的方法，以此計算出密度，讓實驗數據更完整且減少誤差。雖然銅線導電佳，但白鐵線在極高電壓下的表現卻更佳，這一點是值得我們去探討的。

柒、結論

我們利用鋅球在不同角度（前視、側視、俯視）的影像，並透過 ImageJ 軟體進行輪廓選取與體積換算。此方法克服了傳統排水法可能破壞脆弱結晶結構的問題，能更精準地量化不規則球體結晶的體積。

一、實驗結論

(一) 電壓與結晶結構：

由實驗得出，電壓越大，鋅金屬結晶越大；電壓越小，鋅金屬結晶越小。且電壓越小，形成的鋅金屬結晶結構越疏鬆；電壓越大，形成的鋅金屬結晶越緻密。

(二) 負極材料與結晶結構：

在各負極材料當中，銅線的變化最規律，錫線與白鐵線在 3、5、7V 時變化不大且體積偏小，但錫線與白鐵線在 9V 時變化卻突然變大，且以白鐵線體積最大，達到約 1 立方公分。

(三) 濃度的高低與結晶結構：

主要影響更多的是結晶的疏密程度，但也呈規律變化，呈現正相關。濃度越大，結晶越大也越鬆散；濃度越小，結晶越小也越緊密。

(四) 電流與結晶結構：

在測電流的實驗中，銅線導電的電流是成長幅度最大的，其次為錫線最後白鐵線。

(五) 硫酸鋅水溶液濃度與電流之關係：

而硫酸鋅水溶液濃度與電流之關係正好形成公比為 12 的等比數列，具有規律性。

二、未來展望

(一)期望能夠限制球體生長形狀，讓體積能夠更容易計算。

(二)期望能夠算出密度，以探討實驗的規律性，或許也能有更進一步的發現。

(三)我們發現，銅線的變化最為規律，接近正相關，雖然錫線與白鐵線在較大電壓時變化較大，但因錫線與白鐵線變化較不穩定，所以不適合做為實驗器材，但若要追求在電壓大時找到的最大結晶，我們會採用白鐵線的數據做依據。

(四)雖然我們已將負極材料到正極材料的距離固定（電阻），但電流並沒有呈現規律性，或許我們之後能多進行幾次實驗，取平均值來計算電流，能夠更精準並且觀察出電流與電壓比較，也能夠大概計算出結晶生長的規律。

捌、參考資料及其他

1. 中華民國第 58 屆中小學科學展覽會國中組化學科「鋅」花怒放-鋅金屬花電析之研究
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/58/pdf/NPHSF2018-030207.pdf>
2. 中華民國第 59 屆中小學科學展覽會國中組化學科「遊」「銅」花之美
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/59/pdf/NPHSF2019-030210.pdf>
3. 民國第 61 屆中小學科學展覽會國中組化學科銅鋅生長之術~探討電解硫酸鋅溶液之研究
<https://twsf.ntsec.gov.tw/activity/race-1/61/pdf/NPHSF2021-030208.pdf?0.045755603117868304>