

中華民國第 61 屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 化學科

第二名

030208

銅鋅生長之術~探討電解硫酸鋅溶液之研究

學校名稱：臺北市立介壽國民中學

作者： 國二 林威佑	指導老師： 潘俊宏
---------------	--------------

關鍵詞：電解、金屬離子、金屬生長速率

摘要

本研究秉持綠色化學之精神自製反應槽，並探討電解硫酸鋅溶液之研究。實驗就電極距離(1.0 ~ 2.0 cm)、施加電壓(9 ~ 21V)、溶液濃度($1 \times 10^{-3} \text{ M} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ M}$)、不同正極材料和不同金屬溶液(分別包含 Zn^{2+} 、 Sn^{2+} 、 Ag^+ 、 Co^{2+})進行討論。

當電解硫酸鋅溶液且鋅為正極時，電極距離之倒數和鋅金屬生長速率呈正比。當施加較大電壓時，鋅金屬生長速率有越快的趨勢，電解溶液濃度和在 45 秒內析出鋅金屬量成正比，也和鋅金屬生長速率成正比。

當電解硫酸鋅溶液且銅為正極時，除鋅金屬析出外也發現銅金屬析出，溶液濃度越高則銅金屬生長位置距離負極越遠。當電解 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 不同金屬離子溶液時，金屬生長速率快慢為銀>錫>鈷>鋅，而銅金屬生長距負極距離為鋅>鈷>錫>銀。

壹、研究動機

從 58 屆科展作品「鋅」花怒放-鋅金屬花電析之研究中看到電解金屬的照片生成如花朵般薄膜狀的鋅金屬結晶，其研究設備是以立體的反應槽來做，其中反應設備過於龐大，且無法仔細觀察鋅金屬析出的樣子。為利於觀察金屬生長狀況與速率，因此由課本反應槽和周遭容易取得的鋅片為構想，並加以改良為自製反應槽，來作為本實驗的研究器材。希望透過新改良設計出的實驗裝置和減化操作方式與實驗溶液，來探討不同金屬離子電解後之電極距離、電壓、溶液濃度與析出速率之關係。

貳、研究目的

- 一、反應槽設計與製作。
- 二、以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討不同電極距離對鋅金屬生長情況影響。
- 三、以設計的反應槽，在相同電極距離下，探討施加的電壓對鋅金屬生長情況影響。

四、以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討電解不同濃度硫酸鋅溶液對鋅金屬生長和析出質量的影響。

五、以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討使用銅為正極時，對鋅金屬生長影響。

六、以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討電解不同金屬溶液時，對不同金屬生長影響。

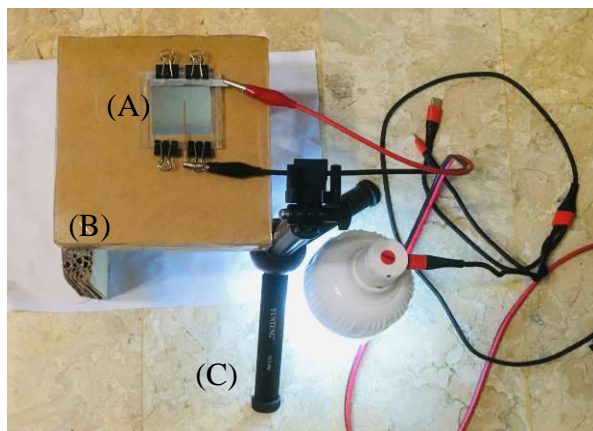
參、研究設備與器材

一、研究試劑與材料：硫酸銅、硫酸鋅、硫酸鈷、硫酸亞錫、硝酸銀、銅片、鋅片、鋅線、銅線、蒸餾水。

二、研究器材：燒杯、攪拌棒、紙製架子、滴管、量筒、定量瓶、手機(或相機)與手機架。

三、研究設備：電子天平、整流變壓器、自製反應槽。

四、裝置示意圖：



註：圖中(A):自製反應槽 (B):紙製架子 (C):手機與手機架

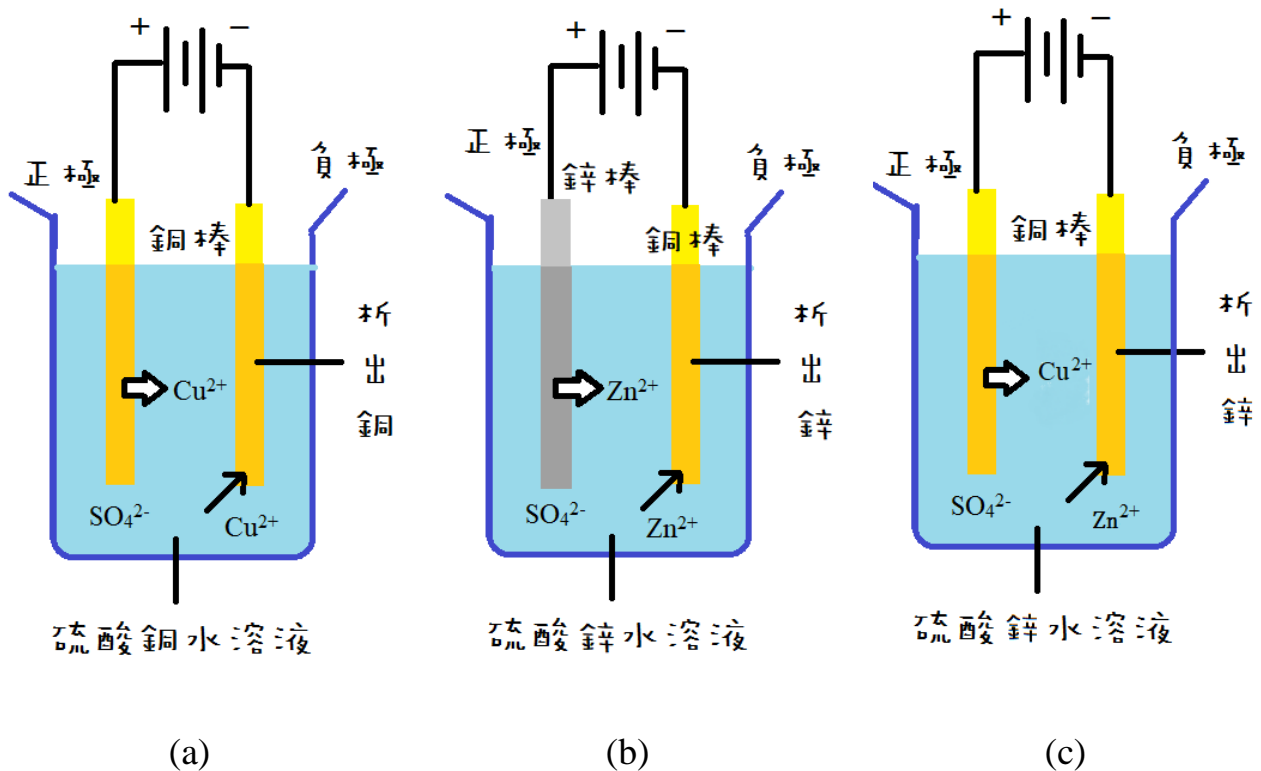
肆、研究過程與方法

一、原理

以銅棒為電極電解CuSO₄溶液：正極消耗銅，負極產生銅，向負極移動的Cu²⁺較H⁺易得到電子，負極反應： $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu}$ ，而此時銅棒(負極)主要作用為導電；在正極銅原子較OH⁻、SO₄²⁻易放出電子，所以正極反應： $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-}$ ，全反應： $\text{Cu}^{2+} + \text{Cu} \rightarrow \text{Cu}(\text{負極}) + \text{Cu}^{2+}(\text{正極})$ ，溶液中的離子Cu²⁺、SO₄²⁻、H⁺、OH⁻ 濃度均不改變。如下圖一(a)。

本實驗中首先以硫酸鋅溶液取代硫酸銅溶液，將正極改為鋅棒，負極仍為銅棒電解硫酸鋅溶液，此時正極反應： $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-}$ ，負極反應為： $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Zn}$ ，全反應為： $\text{Zn}^{2+} + \text{Zn} \rightarrow \text{Zn}(\text{負極}) + \text{Zn}^{2+}(\text{正極})$ ，如下圖一(b)。

其次，將正、負極改成均為銅棒，正極反應： $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-}$ ，負極反應為： $\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Zn}$ ，鋅金屬析出，全反應為： $\text{Zn}^{2+} + \text{Cu} \rightarrow \text{Zn}(\text{負極}) + \text{Cu}^{2+}(\text{正極})$ ，如下圖一(c)。

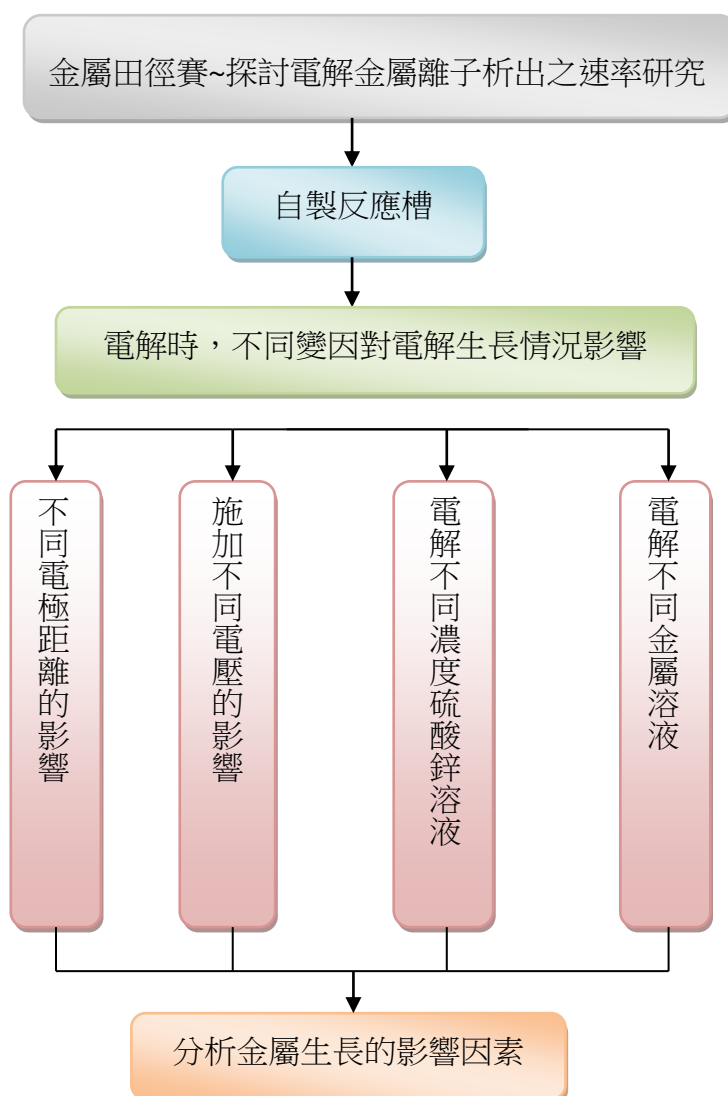


圖一、電解反應槽原理

由參考資料可知，各金屬標準還原電位如下：

電解反應	標準還原電位	電解反應	標準還原電位
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Zn}$	-0.76V	$\text{Sn}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Sn}$	-0.14V
$\text{Co}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Co}$	-0.28V	$\text{Ag}^{+} + \text{e}^{-} \rightarrow \text{Ag}$	0.80V
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu}$	0.34V		

二、實驗架構圖



三、 實驗步驟

實驗一：反應槽設計與製作

本實驗使用實驗室較容易取得之材料，如：壓克力板、銅片、鋅片、銅線等，進而設計出符合本實驗的反應槽。

實驗二：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討不同電極距離對鋅金屬生長情況影響

實驗中採取五種不同電極距離(正、負極間的距離)，分別為 1.0 cm、1.3 cm、1.5 cm、1.7 cm、2.0 cm，使用這五種不同電極距離，以鋅片為正極、銅線為負極，電解硫酸鋅溶液，直到鋅金屬生長長度為 0.5 cm 時，測量其所需時間，進而計算其生長速率。

實驗三：以設計的反應槽，在不同電極距離下，探討施加的電壓對鋅金屬生長情況影響。

實驗中採取五種不同的電解電壓，分別為 9 V、12 V、15 V、18 V、21 V，使用這五種不同電解電壓，以鋅片為正極、銅線為負極，電解硫酸鋅溶液，直到鋅金屬生長長度為 0.5 cm 時，測量其所需時間，進而計算其生長速率。

實驗四：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討電解不同濃度硫酸鋅溶液對鋅金屬析出質量的影響。

實驗中採取八種不同濃度的硫酸鋅溶液，濃度分別為 $3 \times 10^{-3} \text{ M}$ ~ $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ ，使用這八種不同濃度的硫酸鋅溶液，以鋅片為正極、銅線為負極，施加 15 V 電壓，並以 1 cm 為電極距離，電解硫酸鋅溶液，電解 45 秒後過濾析出之鋅金屬並秤重。

實驗五：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討電解不同濃度硫酸鋅溶液對鋅金屬生長影響。

實驗中採取十種不同濃度的硫酸鋅溶液，濃度分別為 $1 \times 10^{-3} \text{ M}$ ~ $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ ，使用這十種不同濃度的硫酸鋅溶液，以鋅片為正極、銅線為負極，施加 15 V 電壓，並以 1 cm 為電極距離，電解硫酸鋅溶液，直到鋅金屬生長長度為 0.5 cm 時，測量其所需時間，進而計算其生長速率。

實驗六：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討以銅片為正極，電解硫酸鋅溶液對鋅金屬生長影響。

實驗中採取十種不同濃度的硫酸鋅溶液，濃度分別為 $1 \times 10^{-3} \text{M}$ ~ $1 \times 10^{-2} \text{M}$ ，使用這十種不同濃度的硫酸鋅溶液，以銅片為正極、銅線為負極，施加 15 V 電壓，並以 1 cm 為電極距離，電解硫酸鋅溶液，直到鋅金屬生長長度為 0.1 cm 或 0.5 cm 時，測量其所需時間，進而計算其生長速率。

實驗七：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討電解不同金屬溶液時對金屬生長影響。

實驗中採用五種不同金屬離子，分別為 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Sn^{2+} 、 Ag^{+} 、 Co^{2+} ，濃度均為 $1 \times 10^{-2} \text{M}$ ，使用這五種不同金屬溶液，以銅片為正極、銅線為負極，施加 15 V 電壓，並以 1 cm 為電極距離，電解不同金屬溶液，直到金屬生長長度為 0.5 cm 時，測量其所需時間，進而計算其生長速率。

伍、研究結果與討論

實驗一：反應槽設計與製作

(一)以電解原理為基礎，進行設計一個反應槽，使它能夠達到重複使用、減少使用電解質溶液，達到綠色化學原則及清楚觀察到金屬生長之情形為目的。

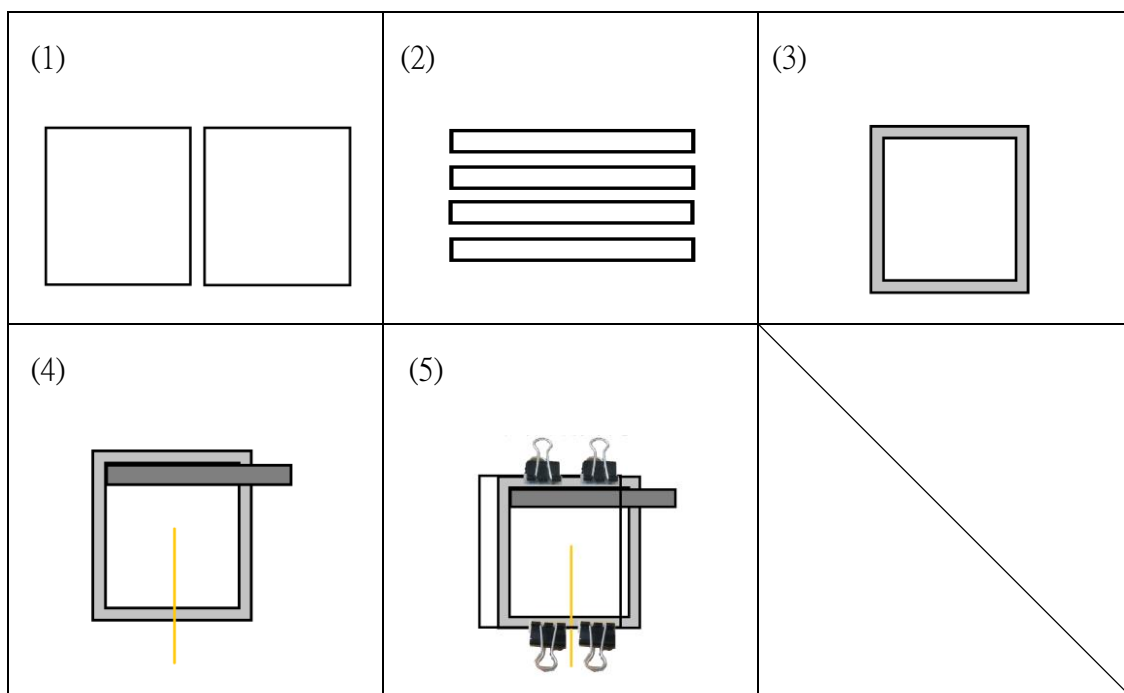
(二)反應槽經設計後其製作方法如下：

1. 以壓克力板為材料，在上面量出兩個 5 cm×5 cm 的正方形，並裁切下來。如圖二(1)
2. 以壓克力板為材料，在上面量出 4 條 0.5 cm×4 cm 的矩形，並裁切下來。如圖二(2)
3. 利用壓克力膠將 4 條矩形壓克力板(0.5 cm×4 cm)黏在一片 5 cm × 5 cm 壓克力板上，並將四周以壓克力膠緊密封，使其成為一個容器，讓溶液不會溢出，如圖二(3)。
4. 將鋅片及銅線置於步驟 3 所做的反應槽中，如圖二(4)所示。
5. 將另一片壓克力板置於步驟 4 反應槽上方，露出一點空隙，始溶液能注入兩片反應槽中，以長尾夾固定兩片壓克力板，並連接電源供應器，將正極接鋅片，負極接銅線，如圖二(5)。
6. 打開電源供應器，通直流電，開始電解電解質溶液，並觀察金屬生長情形。

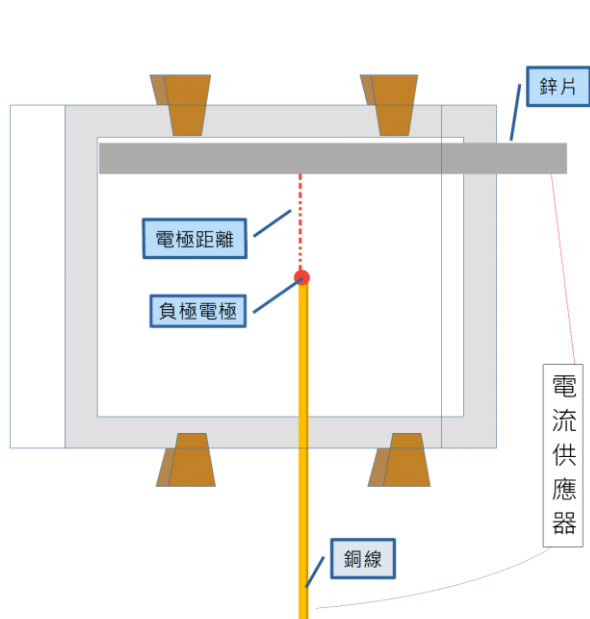
(三)利用此電解反應槽進行實驗。首先將 2~3 mL 硫酸鋅溶液注入反應槽中，開始電解，電解過程可用手機錄製，電解最後結果如圖三所示。電解結束後再將溶液倒掉回收，適當清後，可在下次電解繼續使用，以達到反應槽重複使用的目的，且溶液使用量約 3 mL 即可達觀察、研究效果，因此即採用此自製反應槽來進行後續的實驗。

(四)實驗中負極採用銅線，主要原因是，若使用碳棒時，碳棒較粗大，較不容易作為平面電解；經由查找資料後發現，若電解硫酸鋅使用負極為銅時，銅電極主要用途為導電，而不會參與反應。

(五)觀察金屬生長情況，鋅金屬生長在 0.5 cm 內形狀大致為平面圓形，所以實驗中將觀察鋅金屬生長距離所需時間以計算其生長速率。

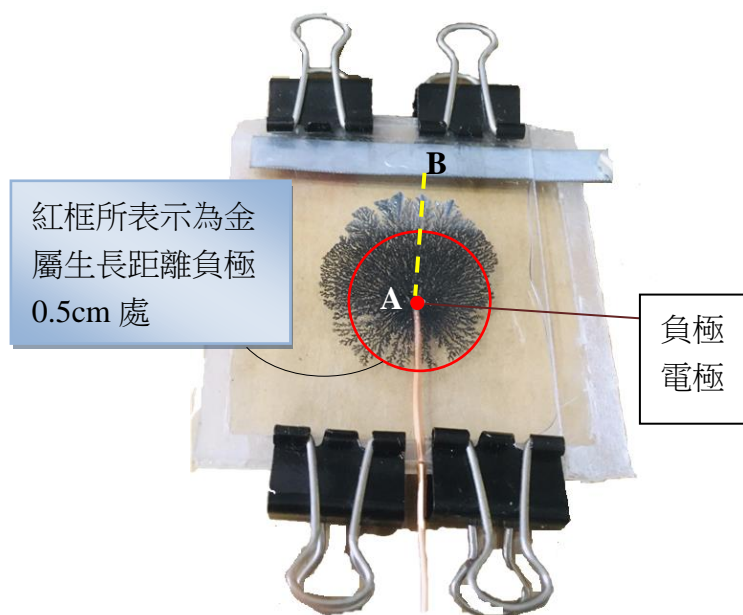


圖二(1)~(5)：反應槽製作過程示意圖



圖二(6)：反應槽示意圖

(註：負極電極只有端點可導電，其餘為漆包線包覆，不可導電)



圖三：電解硫酸鋅，鋅金屬生長圖

(圖中 A 點到 B 點之距離為 1 cm)

實驗二：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討改變不同電極距離對鋅金屬生長影響。

使用反應槽裝置如圖二(6)所示，施加 15V 電壓，改變電極距離(銅線端點到鋅片之垂直距離)，分別為 1cm、1.3 cm、1.5 cm、1.7 cm、2 cm，電解 $1 \times 10^{-2} \text{M}$ 硫酸鋅溶液，觀察鋅金屬生長情況，測量鋅金屬生長至 0.5 cm 所需的時間，進而計算其生長速率。






(一)由表一(1)中我們發現電極距離愈短，析出的金屬越接近圓形，電極距離越長，而且鋅金屬析出的樣態會越接近散狀。

(二)測量鋅金屬生長 0.5 公分所需的時間，進一步算出鋅金屬生長速率，結果如表一(2)。

由表一(2)中我們可以觀察到電極距離愈長，生長所需要的時間越久，生長速率也愈慢。將電極距離與生長速率作圖可得圖四，進一步將電極距離的倒數與生長速率作圖，可得圖五，由圖五觀察可知，鋅金屬生長速率和電極距離的倒數成正比 ($R^2=0.9937$)。

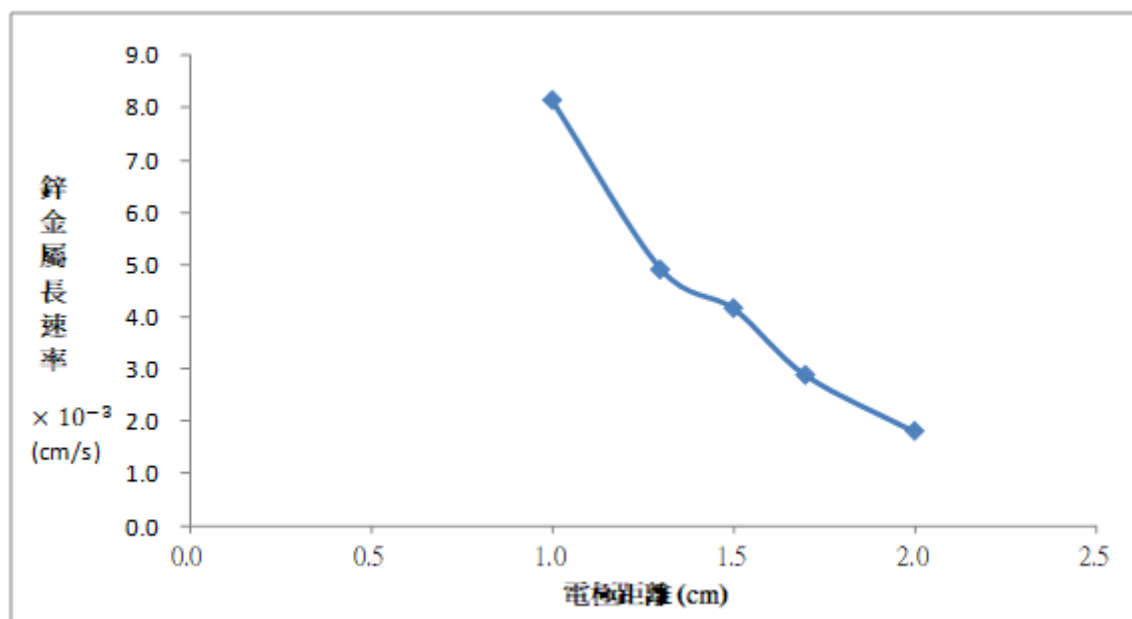
(三)由於電極距離越長時，金屬生長速率越慢且形狀也較分散，因此本實驗採用電極距離為 1 cm 進行電解實驗。

表一(1)：不同電極距離，施加電壓 15V 電解濃度 $1 \times 10^{-2} \text{M}$ 硫酸鋅溶液，鋅金屬生長情形

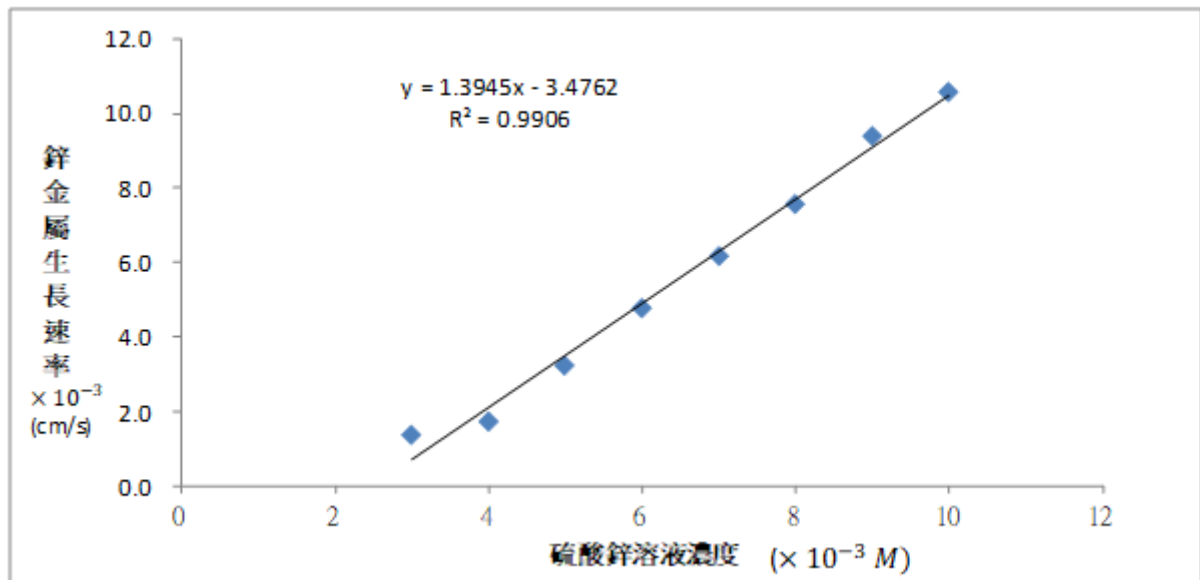
10^{-2}M 硫酸鋅溶液		電極距離				
		1.0cm	1.3cm	1.5cm	1.7cm	2.0cm
金屬生長情況	0.5cm					

表一(2)：以不同電極距離，施加電壓 15 V 電解濃度 1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液，鋅金屬析出 0.5 cm 的時間(秒)與析出速率($\times 10^{-3}$ 公分/秒)

1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液		電極距離(cm)				
		1.0	1.3	1.5	1.7	2.0
時間 (秒)	1	61.7	91.8	121.9	170.4	289.7
	2	65.0	100.3	110.7	166.8	277.6
	3	59.8	111.9	124.3	170.0	267.1
	4	58.7	99.7	118.5	187.7	282.3
	5	62.1	105.9	126.4	176.1	276.7
	平均	61.5	101.9	120.4	174.2	278.7
生長速率 ($\times 10^{-3}$ 公分/秒)		8.1	4.9	4.2	2.9	1.8



圖四：以不同電極距離，施加電壓 15V 電解濃度 1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液，電極距離(cm)與生長速率($\times 10^{-3}$ 秒/公分)關係圖



圖五：以不同電極距離，施加電壓 15 V 電解濃度 $1 \times 10^{-2} M$ 硫酸鋅溶液，電極距離之倒數(cm) 與生長速率($\times 10^{-3}$ 秒/公分)關係圖

實驗三：以設計的反應槽，在不同電極距離下，探討改變施加的電壓對鋅金屬生長影響。

使用反應槽裝置如圖二所示，以 1 cm 作為電極距離(銅線端點到鋅片之垂直距離)，施加不同電壓，分別為 9 V、12 V、15 V、18 V、21 V，電解 $1 \times 10^{-2} M$ 硫酸鋅溶液，直到鋅金屬生長 0.5 cm，觀察鋅金屬生長情況，進一步算出生長速率。

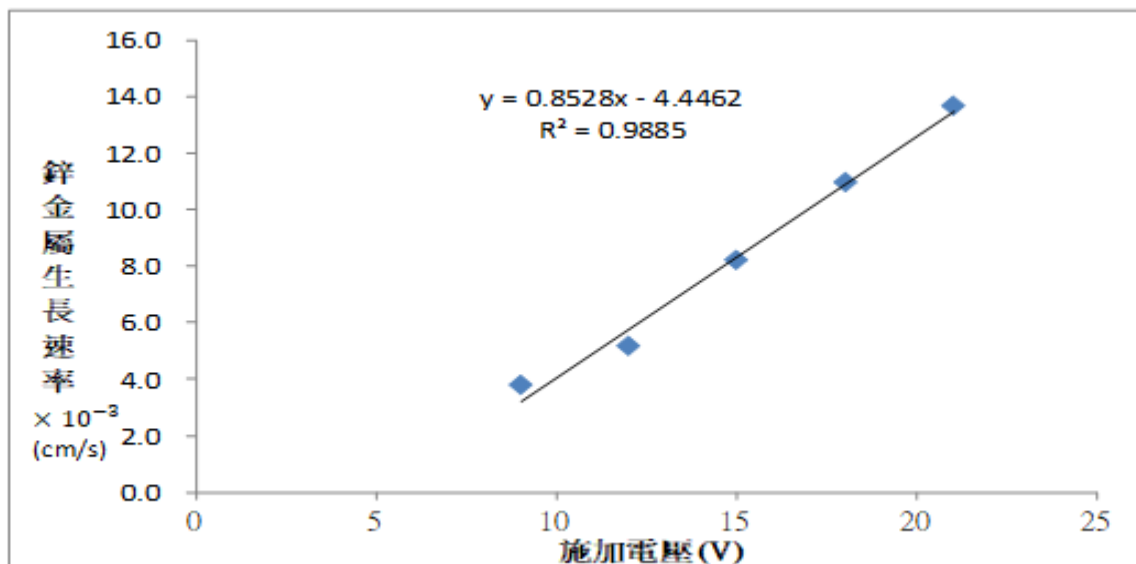
- (一) 鋅金屬生長情況如表二(1)所示，在表二(1)中可以觀察到當電壓越大時，鋅金屬會以越接近圓形的形狀析出，電壓越小時，鋅金屬會以越接近散狀的形狀析出。
- (二) 測量鋅金屬生長 0.5 公分所需的時間，進一步算出鋅金屬生長速率，結果如表二(2)。由表二(2)中我們可以觀察到電壓越高，生長所需要的時間越短。將電壓與生長速率作圖可得圖六，由圖六觀察可知，當施加電壓越大時，鋅金屬生長速率也相對變快。
- (三) 由以上結果，本實驗採用 15 V 為電解電壓。

表二(1)：施加不同電壓(V)，在兩電極相距 1 cm 電解濃度 1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液，鋅金屬生長情形

1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液		施加電壓(V)				
		9	12	15	18	21
金屬生長情況	0.5 cm					

表二(2)：施加不同電壓(V)，在兩電極相距 1cm 電解濃度 1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液，生長 0.5 cm 鋅金屬的時間(秒)與生長速率($\times 10^{-3}$ 公分/秒)

1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液		施加電壓(V)				
		9	12	15	18	21
時間 (秒)	1	138.6	97.3	61.3	49.6	35.3
	2	120.3	83.0	65.0	43.5	35.2
	3	143.5	115.9	59.9	40.8	41.5
	4	138.4	107.4	60.1	48.7	37.2
	5	122.3	97.6	58.7	45.9	33.7
	平均	132.6	98.3	61.0	45.7	36.6
析出速率 ($\times 10^{-3}$ 公分/秒)		3.8	5.2	8.2	10.9	13.7



圖六：施加不同電壓(V)，在兩電極相距 1cm 電解濃度 1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液，施加電壓(V) 與生長速率($\times 10^{-3}$ 公分/秒)關係圖

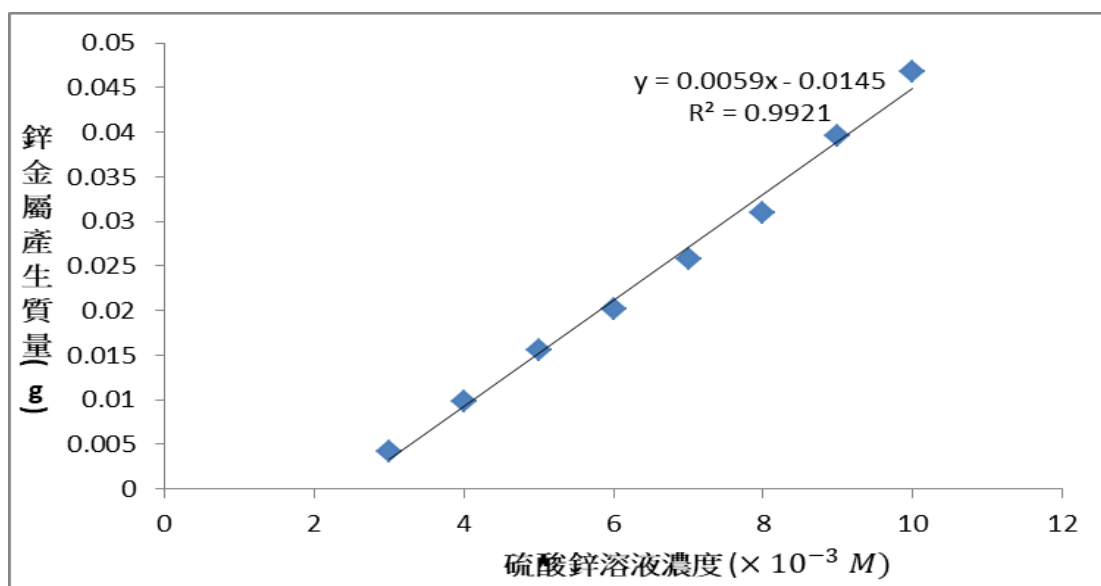
實驗四：以設計的反应槽，在施加相同電壓下，探討電解不同濃度硫酸鋅溶液對鋅金屬質量影響。

利用自製反應槽改變不同電壓，以鋅片作為正極，銅線為負極。使用反應槽裝置如圖二所示，施加 15 V 電壓，改變硫酸鋅溶液濃度，分別為 3×10^{-3} M~ 10×10^{-3} M，共八種濃度，並測量電解時間為 45 秒後，測量析出鋅金屬之質量。

- (一) 測量鋅金屬的質量，結果如表三(1)。由表三(1)中我們可以觀察到硫酸鋅溶液濃度越高，所產生的質量愈多。將質量與硫酸鋅溶液濃度作圖可得圖六，由圖六觀察可知，**鋅金屬生長的質量和硫酸鋅溶液濃度成正比($R^2=0.9921$)。**
- (二) 電解硫酸鋅溶液時，當濃度越大，溶液導電性越佳，造成電解時負極鋅金屬更容易析出，所以鋅金屬生長的質量和硫酸鋅溶液濃度成正比。

表三(1)：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 以鋅片為正極，電解不同濃度硫酸鋅溶液，鋅金屬析出 45 秒的質量。

不同濃度		硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}M$)							
硫酸鋅溶液		3	4	5	6	7	8	9	10
質量 (g)	1	0.005	0.011	0.017	0.017	0.030	0.035	0.044	0.053
	2	0.005	0.010	0.021	0.021	0.026	0.030	0.043	0.039
	3	0.003	0.008	0.012	0.021	0.024	0.029	0.041	0.051
	4	0.005	0.009	0.015	0.019	0.025	0.028	0.039	0.042
	5	0.003	0.011	0.013	0.023	0.024	0.033	0.031	0.049
	平均	0.004	0.010	0.016	0.020	0.026	0.031	0.040	0.047



圖七：施加 15V 電壓，在兩電極相距 1cm 以鋅片為正極電解不同濃度硫酸鋅溶液，鋅金屬生長 45 秒所產生的質量(g)。

實驗五：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，探討電解不同濃度硫酸鋅溶液對鋅金屬生長影響。

利用自製反應槽，以鋅片作為正極，銅線為負極。使用反應槽裝置如圖二所示，施加 15 V 電壓，改變硫酸鋅溶液濃度，分別為 $3 \times 10^{-3} \text{ M}$ ~ $10 \times 10^{-3} \text{ M}$ ，共八種濃度，觀察鋅金屬生長情況，並測量電解至 0.5 cm 所需的時間，進一步算出鋅金屬生長速率。

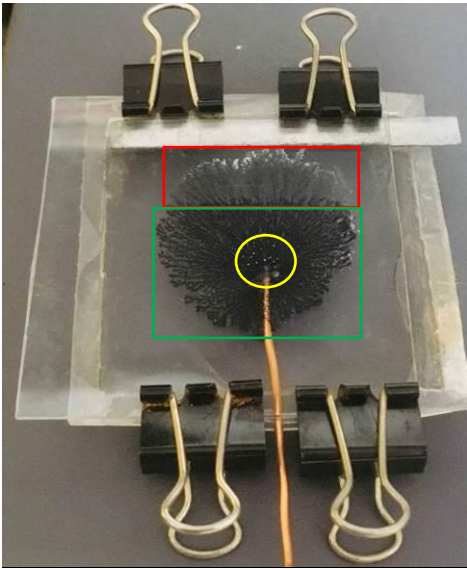
(一) 實驗過程均全程錄影，電解硫酸鋅溶液，鋅金屬生長 0.5 cm 時，其鋅金屬的生長樣貌如四(1)和圖八(1)所示。電解出之鋅金屬形狀都呈現圓形，當濃度越高時，鋅金屬生長的越茂密，在 58 屆科展作品「鋅」花怒放中，電解硫酸鋅濃度較高時，會生成較粗壯的圓形薄膜，但本實驗中想觀察鋅金屬細部的生長情況，故採用濃度較低之硫酸鋅溶液做電解。

(二) 本實驗中觀察鋅金屬生長之速率，鋅金屬生長 0.5 cm 所需要的時間結果如表四(2)所示，發現當硫酸鋅溶液濃度越高時，鋅金屬生長所需時間越短，進一步計算鋅金屬生長速率，發現當硫酸鋅溶液濃度越高時，鋅金屬生長速率越快，將硫酸鋅溶液濃度和生長速率作圖，結果如圖九所示，可以發現**硫酸鋅溶液濃度與生長速率成正比($R^2=0.9912$)**。

(三) 綜和實驗四和實驗五的結果，鋅金屬析出質量和生長速率成正比，而鋅金屬析出質量的多寡表示反應電解速率，換句話說，鋅金屬析出質量越多時生長速率越快，所以可以由生長速率來推測電解速率之快慢。

(四) 電解濃度為 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸鋅溶液時，結果如圖八(1)所示，從圖中發現，電解出鋅金屬有兩種顏色，在剛開始電解時所產生之鋅金屬為黑灰色(如圖八(1)中綠色框內部分)，電解靠近正極時所產生之金屬為銀色(如圖八(1)中紅色框內部分)，且電解過程中也容易產生小泡泡(如圖八(1)中黃色框內部分)，討論其可能原因，電解產生兩種不同顏色之金屬，可能為兩種不同顆粒大小之鋅金屬；而所產生之氣泡可能為過程中電解水所產生之氫氣。

(五) 將電解濃度 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸鋅溶液，鋅金屬生長結果放置一段時間(四天)，結果如圖八(2)，電解硫酸鋅溶液乾掉，而原實驗中綠色框內部份似乎也消失了，紅色框內之金屬變白色。討論其原因，原本黑灰色之鋅金屬消失有兩原因：一，可能黑灰色鋅金屬微奈米等級，溶解在溶液中而乾掉；二，和溶液發生反應。



圖八(1)：電解濃度 1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液，鋅金屬生長結果。

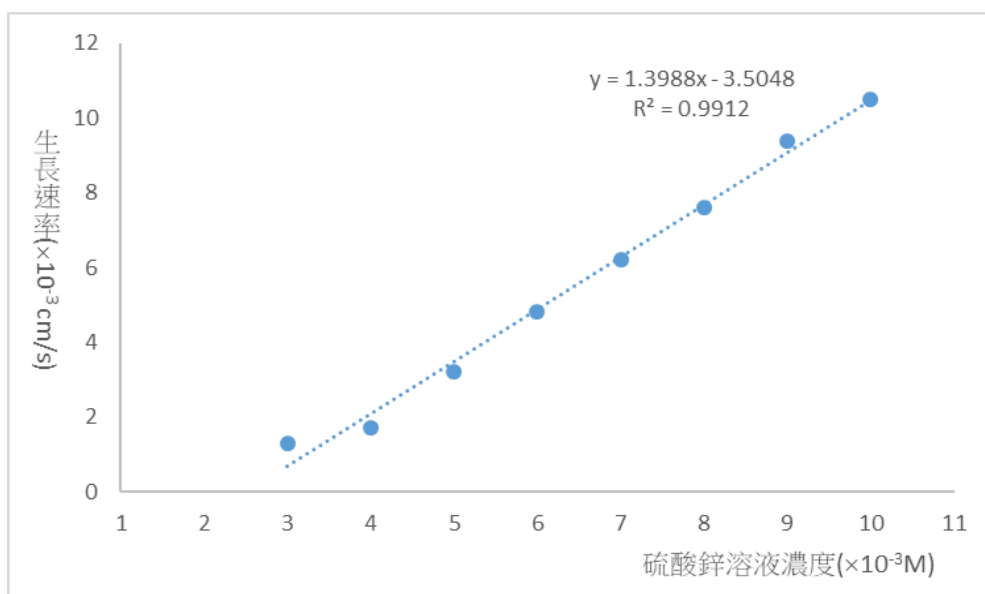
圖八(2)：將電解濃度 1×10^{-2} M 硫酸鋅溶液，鋅金屬生長結果放置四天。

表四(1)：施加電壓 15V 電解濃度 3×10^{-3} M~ 10×10^{-3} M 硫酸鋅溶液，鋅金屬生長情形

		硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}$ M)			
		3	4	5	6
金屬生長情況	0.5 cm				
		硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}$ M)			
		7	8	9	10

表四(2)：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 以鋅片為正極，電解不同濃度硫酸鋅溶液，鋅金屬生長 0.5 cm 所需的時間(秒)。

不同濃度 硫酸鋅溶液	硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}$ M)							
	3	4	5	6	7	8	9	10
1	368.7	300.5	157.3	100.4	79.1	65.2	55.6	45.7
2	372.1	298.6	153.5	103.6	81.8	68.3	47.8	44.9
3	373.5	279.8	155.3	112.5	82.1	65.4	56.0	45.6
4	372.1	293.6	152.8	107.9	79.6	67.2	49.0	47.8
5	369.2	288.0	157.9	99.8	82.5	64.3	58.1	53.2
平均	371.1	292.1	155.4	104.8	81.0	66.1	53.3	47.4
生長速率 ($\times 10^{-3}$ 公分/秒)	1.3	1.7	3.2	4.8	6.2	7.6	9.4	10.5



圖九：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 以鋅片為正極電解不同濃度硫酸鋅溶液，鋅金屬生長 0.5 cm 所需的時間(秒)。

實驗六：以設計的反应槽，在施加相同電壓下，探討使用銅為正極時，對鋅金屬生長影響。

利用自製反應槽，以銅片作為正極，銅線為負極。使用反應槽裝置如圖二所示，施加 15 V 電壓，改變硫酸鋅溶液濃度，分別為 $1 \times 10^{-3} \text{ M}$ ~ $10 \times 10^{-3} \text{ M}$ ，共十種濃度，測量電解至 0.1 公分或 0.5 公分所需的時間，進一步算出鋅金屬生長速率。

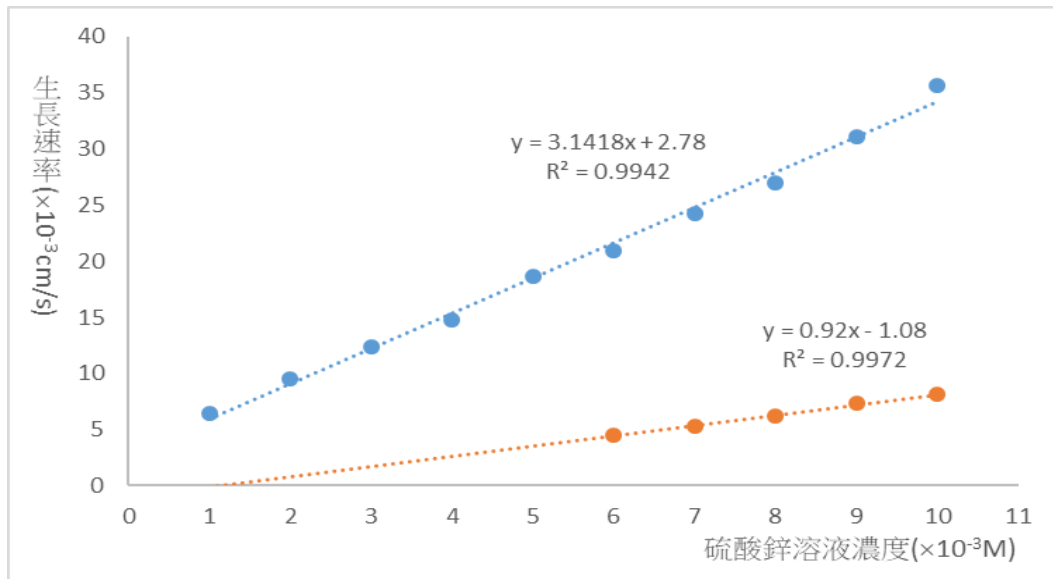
- (一) 由表五(1)和表五(2)之中，濃度越高，生長所需的時間越短，表示析出速率也越快。比較生長 0.1 公分和 0.5 公分速率時，發現析出距離越長時，析出速率越慢，而且析出 0.1 公分析出的速率大約是析出 0.5 公分所需時間的 4~6 倍。
- (二) 將表五(1)和表五(2)作圖，結果如圖十所示。發現**鋅金屬生長速率和濃度成正比**(生長 0.1 公分時，關係式的 $R^2=0.9942$ ；生長 0.5 公分時，關係式的 $R^2=0.9972$)。
- (三) 在實驗中我們觀察銅離子生長情況如圖十一所示。實驗中發現一開始為鋅金屬(銀灰色)析出，而當析出到某一特定距離時，會有銅金屬(紅棕色)析出，使反應槽內有兩種不同的金屬，如圖十一黃色框內部分所示。
- (四) 電解不同濃度硫酸鋅溶液，測量銅金屬開始析出的位置(和負極的距離，如圖十一 A 點到 B 點之距離)，結果如表五(3)所示。由表五(3)中觀察可得，當硫酸鋅溶液濃度越高時，銅金屬開始析出位置距離負極越遠。
- (五) 將表五(3)析出距離與濃度作圖，結果如圖十二。從圖十二可知當硫酸鋅溶液濃度越大時，銅金屬析出位置距離正極越近，因此藉由控制硫酸鋅溶液濃度，可以調整銅金屬析出的距離，進而調整濃度，在反應槽內析出兩種不同的金屬花(金屬析出的樣子)。
- (六) 討論銅生長位置與硫酸鋅溶液濃度之關係，其可能原因為：實驗中，正極為銅，電解時銅會變成銅離子，使得溶液中銅離子濃度增加，而負極中鋅金屬析出，使得溶液中鋅離子濃度減少，當電解進行時，鋅金屬開始生長(即鋅金屬開始析出)，溶液中鋅離子減少，相對地，銅離子濃度增加，直到鋅離子與銅離子濃度達到一定比例，就形成銅金屬的現象，所以當硫酸鋅濃度越高時，銅離子析出的位置就距離負極越遠。

表五(1)：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 以銅片為正極，電解不同濃度硫酸鋅溶液，鋅金屬生長 0.1 cm 所需的時間(秒)。

不同濃度		硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}M$)									
硫酸鋅溶液		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
時間 (秒)	1	20.3	10.0	7.8	6.3	5.7	4.9	3.8	3.0	3.2	2.8
	2	15.7	9.7	8.3	6.7	6.0	4.5	5.0	3.2	2.7	3.0
	3	14.6	9.9	8.0	6.2	5.2	5.0	4.0	4.1	3.3	2.7
	4	12.4	12.4	6.9	6.5	5.0	5.3	4.0	4.2	4.0	3.0
	5	14.7	10.6	9.3	8.0	5.0	4.2	3.9	4.0	2.9	2.5
	平均	15.5	10.5	8.1	6.7	5.4	4.8	4.1	3.7	3.2	2.8
生長速率 ($\times 10^{-3}$ 公分/秒)		6.4	9.5	12.4	14.8	18.6	20.9	24.2	27.0	31.1	35.7

表五(2)：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 以銅片為正極，電解不同濃度硫酸鋅溶液，鋅金屬生長 0.5 cm 所需的時間(秒)。

不同濃度		硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}M$)				
硫酸鋅溶液		6	7	8	9	10
時間 (秒)	1	100.4	90.9	79.2	70.4	61.0
	2	113.7	92.2	80.8	69.3	65.3
	3	115.3	97.4	82.4	68.9	59.6
	4	108.9	93.7	80.1	67.2	58.7
	5	118.0	98.0	83.7	68.5	62.9
	平均	111.3	94.4	81.2	68.9	61.5
生長速率 ($\times 10^{-3}$ 公分/秒)		4.5	5.3	6.2	7.3	8.1



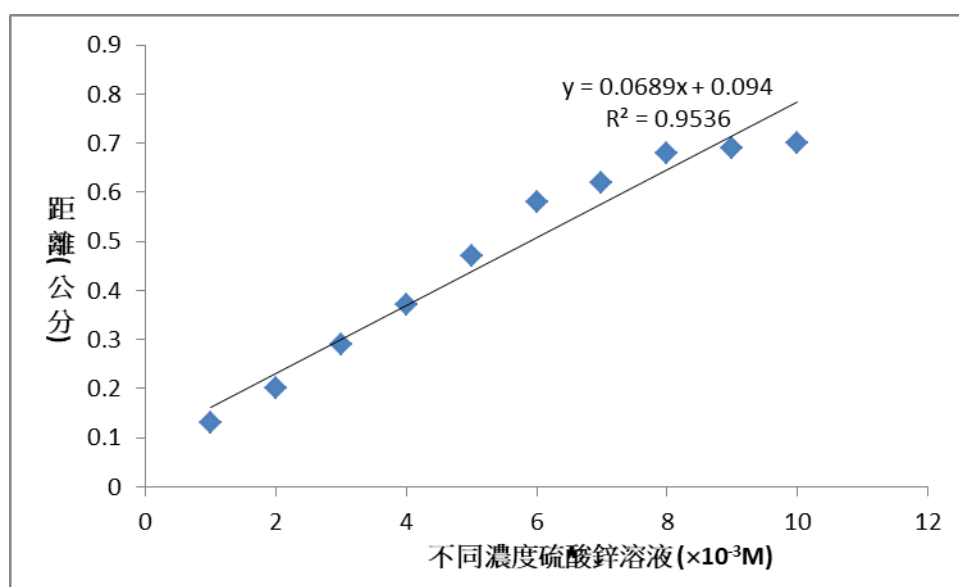
圖十：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 以銅片為正極電解不同濃度硫酸鋅溶液，鋅金屬生長 0.1 cm 和 0.5 cm 所需的時間(秒)。



圖十一：硫酸鋅濃度 $3 \times 10^{-3} \text{ M}$ 之溶液生長情況

表五(3): 施加 15V 電壓，在兩電極相距 1 cm，以銅片為正極，電解不同濃度硫酸鋅溶液，生長出銅金屬的距離(公分)。

不同濃度 硫酸鋅溶液		硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}$ M)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
銅金屬 析出到 負極距 離 (cm)	1	0.18	0.21	0.30	0.39	0.50	0.60	0.62	0.66	0.70	0.71
	2	0.11	0.19	0.29	0.38	0.47	0.60	0.63	0.68	0.69	0.68
	3	0.13	0.19	0.30	0.35	0.48	0.59	0.62	0.69	0.68	0.69
	4	0.12	0.22	0.30	0.36	0.46	0.58	0.62	0.68	0.68	0.72
	5	0.13	0.20	0.26	0.37	0.45	0.55	0.62	0.68	0.70	0.70
	平均	0.13	0.20	0.29	0.37	0.47	0.58	0.62	0.68	0.69	0.70






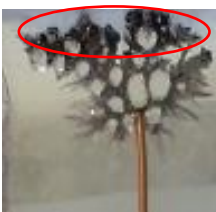
圖十二：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 以銅片為正極電解濃度 1×10^{-2} M 不同金屬離子比例混和，生長出銅金屬的距離(公分)。

實驗七：以設計的反應槽，在施加相同電壓下，電解不同金屬溶液時，對不同金屬溶液生長情況影響。

由實驗六知道，電解硫酸鋅溶液時，正極使用銅片，電解結果可以產生鋅和銅兩種金屬，實驗中改變不同金屬離子，分別電解 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸亞錫溶液、硫酸亞鈷溶液、硫酸鋅溶液和硝酸銀溶液，利用反應槽施加 15 V 電壓，電極距離為 1 cm，探討各金屬生長情況。

- (一) 金屬生長情況如表六(1)所示，在表六(1)的圖片中我們可以觀察到，金屬析出都是圓形，只有錫金屬是較不規則狀，而且錫金屬旁有氣泡產生，其可能原因是電解硫酸亞錫時，除了錫金屬析出外也有氫氣之產生，電解其餘金屬溶液時則較無此現象。
- (二) 各金屬析出的顏色皆為黑或灰色。當金屬析出到某一距離時，會有紅棕色的銅析出，如表六(1)紅色框內部分所示。
- (三) 記錄各金屬析出至 0.5 公分的時間，結果如表六(2)所示，進一步算出各金屬生長速率，結果發現銀金屬生長的速率最快，而鋅金屬生長速率最慢。
- (四) 進一步測量電解不同金屬溶液時，析出銅的位置，結果如表六(3)所示。電解硝酸銀溶液析出銅的距離最接近負極，電解硫酸鋅溶液析出銅的距離最遠離負極。
- (五) 將實驗七結果整理如表六(4)，由表中發現，生長速率分別是銀>錫>鈷>鋅，其可能原因是：生長速率快慢與還原電位有關，當還原電位越高時，析出速率越快；而銅金屬析出距離可能和還原電位有關，當金屬離子還原電位越大時，銅金屬析出的位置距離負極越近，當電解金屬還原電位越小時，銅金屬析出的位置距離負極越遠。

表六(1)：以施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 電解濃度 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 不同金屬離子溶液，金屬析出情形

		電解不同金屬離子			
		Zn^{2+}	Co^{2+}	Sn^{2+}	Ag^+
金屬析出長度	0.5 cm				
	1 cm				

註：紅色框內為紅棕色銅金屬。

表六(2)：施加 15 V 電壓，在兩電極相距 1 cm 電解濃度 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 不同金屬離子溶液，析出 0.5 cm 金屬的時間(秒)與析出速率($\times 10^{-3}$ 公分/秒)

不同溶液濃度(M)	不同金屬離子				
	Zn^{2+}	Co^{2+}	Sn^{2+}	Ag^+	
時間 (秒)	1	68.0	49.0	36.0	23.0
	2	67.0	80.0	30.0	24.0
	3	65.0	60.0	27.0	27.0
	4	66.0	50.0	38.0	25.0
	5	69.0	64.0	29.0	29.0
平均	67.0	60.6	32.0	25.6	
析出速率 ($\times 10^{-3}$ 公分/秒)	7.5	8.3	15.7	19.5	

表六(3)：施加 15 V 電壓，兩電極相距 1 cm 電解濃度 $1 \times 10^{-2} \text{M}$ 之不同金屬離子溶液，銅金屬生長距離。

不同溶液濃度(M)		不同金屬離子			
		Zn^{2+}	Co^{2+}	Sn^{2+}	Ag^{+}
距離 (cm)	1	0.71	0.60	0.57	0.57
	2	0.68	0.55	0.58	0.57
	3	0.69	0.71	0.60	0.58
	4	0.72	0.59	0.65	0.60
	5	0.70	0.62	0.56	0.59
	平均	0.70	0.61	0.59	0.58

表六(4)：實驗七結果整理

電解溶液	硫酸鋅 溶液	硫酸亞鈷 溶液	硫酸亞錫 溶液	硝酸銀 溶液
標準還原電位(V)	-0.76V	-0.28V	-0.14V	0.80V
負極產生	鋅	鈷	錫和氫氣	銀
金屬生長速率 ($\times 10^{-3}$ 公分/秒)	7.5	8.3	15.7	19.5
析出銅和負極距離(cm)	0.70	0.61	0.59	0.58

(六) 由以上實驗結果和 58 屆全國科展作品「鋅」花怒放-鋅金屬花電析之研究做比較，整理於表七中。

表七：本實驗與 58 屆全國科展作品「鋅」花怒放-鋅金屬花電析之研究的比較整理。

	「鋅」花怒放	本研究
電解裝置	傳統燒杯(體積為 500~600 mL)且以鋅片和碳棒為電極。	自製簡易平面反應槽(可重複使用)，以鋅片和銅線為電極。
使用溶液	每次實驗使用兩種溶液(乙酸乙酯和>0.5 M 硫酸鋅溶液)，溶液用量較大(約 100 mL 以上)。	每次使用一種溶液(硫酸鋅溶液)，不超過 3 毫升，且使用較低濃度(1×10^{-3} M~ 1×10^{-2} M)溶液，符合綠色化學精神。
電解過程	立體生長，較不容易觀察細部金屬生長。	平面生長，較容易觀察及記錄金屬生長情況。
電解結果	單種金屬(鋅)析出	兩種金屬 (銅和鋅，或以鈷、錫、銀等金屬代替鋅)析出，亦可控制第二種金屬(銅)析出位置
化學討論	生成花朵般薄膜狀鋅金屬結晶	<ol style="list-style-type: none"> 1. 電解可析出兩種金屬 2. 可探討金屬離子溶液濃度、電壓改變、電極距離改變與金屬速率的關係 3. 符合綠能精神

綜合表七分析結果，本研究設計更符合綠色化學精神，使用溶液體積少、濃度低，且還延伸出許多有趣的科學問題可探究。。

陸、結論

本實驗主要設計一個簡易且可重複使用的反應槽，電解使用此裝置只需較低濃度硫酸鋅溶液($1 \times 10^{-3} \text{ M} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ M}$)，電解可析出兩種金屬(鋅和銅)，若調整硫酸鋅溶液濃度，也可調整銅金屬析出位置，當以其他金屬溶液替代硫酸鋅溶液時，亦有相似結果。本研究整理如下：

一、設計出反應槽，可方便觀察金屬生長的過程，每次電解溶液用量皆小於**3 毫升**，且反應槽可重複使用。

二、當施加電壓為 15 V，電解 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸鋅溶液時，正極為鋅片、負極為銅線，討論電極距離由 1.0~2.0 cm 時，可發現，**電極距離的倒數與金屬生長速率成正比**。

三、當電極距離為 1.0 cm，電解 $1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸鋅溶液時，正極為鋅片、負極為銅線，討論施加電壓由 9~21 V 時，可發現：

(一) 當施加愈大電壓，金屬生長速率有越快的趨勢。

(二) 電壓會影響金屬析出形狀。

四、當電極距離為 1.0 cm，施加 15 V 電壓，正極為鋅片、負極為銅線，討論電解濃度 $3 \times 10^{-3} \text{ M} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸鋅溶液時，電解 45 秒，測量鋅金屬析出之質量，可發現：**電解硫酸鋅溶液濃度越高時，鋅金屬析出之質量越大，且兩者成正比，即表示濃度越高，反應速率越快**。

五、當電極距離為 1.0 cm，施加 15 V 電壓，正極為鋅片、負極為銅線，討論電解濃度 $3 \times 10^{-3} \text{ M} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸鋅溶液時，測量鋅金屬生長 0.5 cm 之時間可發現：**電解硫酸鋅溶液濃度與鋅金屬生長速率成正比**。

六、當電極距離為 1.0 cm，施加 15 V 電壓，正極為銅片、負極為銅線，討論電解濃度 $1 \times 10^{-3} \text{ M} \sim 1 \times 10^{-2} \text{ M}$ 硫酸鋅溶液時，測量鋅金屬生長 0.1 或 0.5 cm 之時間可發現：

(一) 當電解硫酸鋅溶液濃度越大時，鋅金屬生長速率越快，且兩者呈正比。鋅金屬生長 0.1 cm 的速率是生長 0.5 cm 速率的 4~6 倍。

(二) 當電解硫酸鋅溶液且正極使用銅片，則負極會先有鋅再有銅金屬析出，當電解硫酸鋅溶液濃度越大時，銅金屬生長位置越遠離負極。

七、 當電極距離為 1.0 cm，施加 15 V 電壓，正極為銅片、負極為銅線，討論電解濃度 1×10^{-2} M 不同金屬溶液時，測量不同金屬生長 0.5 cm 所需時間，由實驗中觀察到以下幾點：

(一) 電解出之金屬形狀外型和顏色相似，僅電解硫酸亞錫溶液時，析出金屬外型較不同。

(二) 由金屬生長速率發現，銀金屬生長速率最快，鋅金屬生長速率最慢，**生長速率快慢分別是銀>錫>鈷>鋅。**

(三) 電解不同金屬溶液時，比較銅金屬生長位置(到負極距離)時，電解硝酸銀時，銅金屬生長距離負極最近，電解硫酸鋅時，銅金屬生長距離負極最遠，**銅金屬生長和負極之距離分別是鋅>鈷>錫>銀。**

由以上結果得知，本研究方法可用以電解一到二種金屬之生長、位置及快慢，而目前已有文獻探討若有 2 種金屬結合時，會具有特別的催化水分解效益，期盼在未來的研究中可以透過改變實驗變因(如溶液種類等)，可以製作雙(或多)金屬合金，以利未來綠能方面使用。

柒、參考資料

- 一、 林子崴、曾芃臻、徐亞呈(2017)。「銅」樹銀花。中華民國第57屆中小學科學展覽會。
- 二、 許耕閩、劉迎逸、曾于容(2018)。「鋅」花怒放-鋅金屬花電析之研究。中華民國第58屆中小學科學展覽會。
- 三、 王翔鴻、林宥廷、郭芮瑄(2019)。「遊」「銅」花之美。中華民國第59屆中小學科學展覽會。
- 四、 彭璿(2013)。迷霧森林-銅樹銀枝的微觀探討及初步碎形分析。中華民國第53屆中小學科學展覽會。
- 五、 黑恩成、劉國杰。物理化學導讀。P.427~440。
- 六、 自然與生活科技，第六冊。1-5電流的化學效應。南一書局。

【評語】 030208

在這個研究中，同學自製微型反應槽，所以可以大幅減少所需異體的體積，並減少廢棄物，對於金屬活性的研究也有新意，雖然過去有類似的題目，但演顯著的不同及優勢。簡報表現優秀。繼續維持對研究的熱情。

作品簡報



METAL

銅 鋅 生長 之 術



探討電解硫酸鋅溶液之研究

科別:化學科

組別:國中組



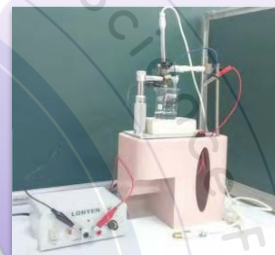
前言



南一版自然科
課本實驗裝置



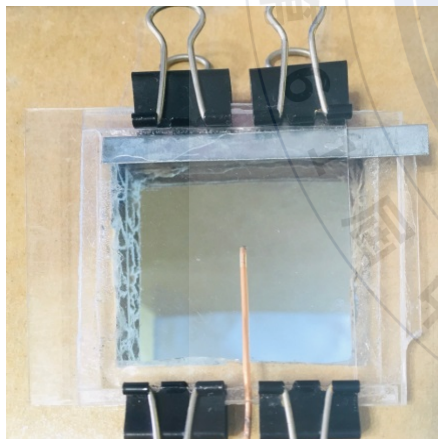
57屆科展
"銅"樹銀花
實驗裝置



58屆科展
「鋅」花怒放-鋅金
屬花電析之研究
實驗裝置

研究問題

- 1) 設計微型簡易反應槽
- 2) 探討影響鋅金屬生長速率的因素
 - 電極距離 • 電壓 • 電解液濃度
- 3) 電解不同金屬離子溶液得到金屬
 - 鋅 • 鈷 • 錫 • 銀



銅鋅生長之術

研究過程與方法



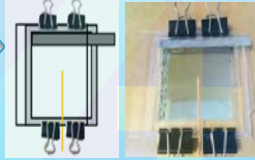
反應槽設計

文獻查閱
與設計反應槽

裁切
並裝置反應槽



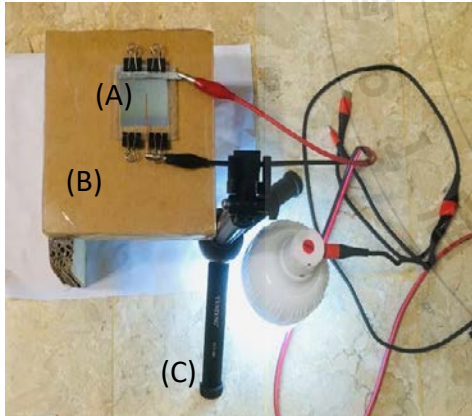
電解裝置



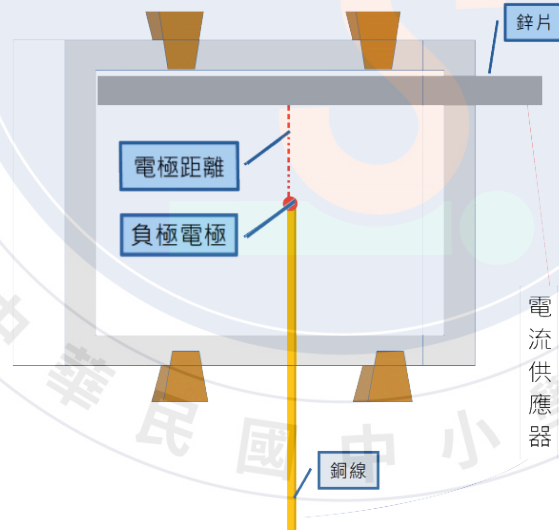
電解結果



- 可觀察金屬生長情形
- 可重複使用
- 電解液用量少

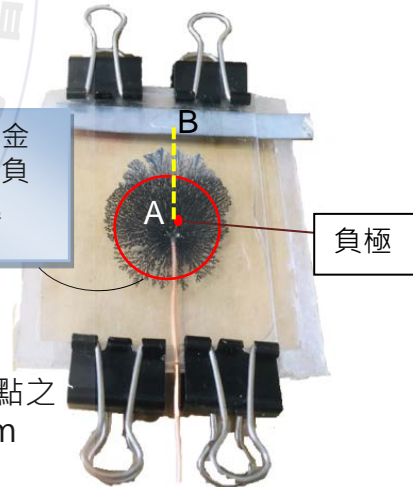


(A) 自製反應槽 (B) 紙製架子 (C) 手機與手機架

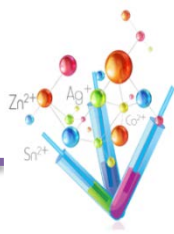


紅框表示為金屬生長距離負極0.5 cm處

圖中A點到B點之距離為1.0 cm



實驗結果與討論



實驗一、電極距離的影響

- 硫酸鋅溶液濃度 10^{-2} M、鋅片正極、銅線負極、施加電壓15 V
- 測量鋅金屬生長至0.5 cm所需時間，並計算鋅金屬生長速率

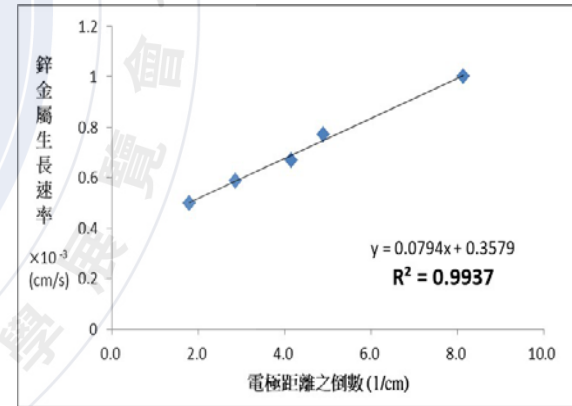


電極距離 1.0 cm & 1.3 cm



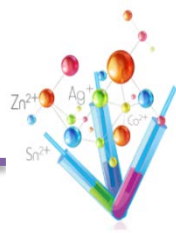
電極距離 1.7 cm & 2.0 cm

電極距離 (cm)	1.0	1.3	1.5	1.7	2.0
五次平均時間(s)	61.5	101.9	120.4	174.2	278.7
生長速率 ($\times 10^{-3}$ cm/s)	8.1	4.9	4.2	2.9	1.8



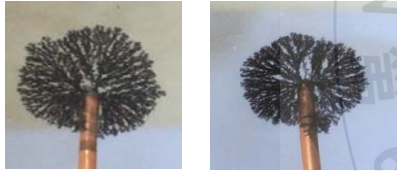
結論：鋅金屬生長速率和電極距離的倒數成正比

實驗結果與討論



實驗二、電壓的影響

- 硫酸鋅溶液濃度 10^{-2} M、電極距離 1.0 cm、鋅片正極、銅線負極
- 測量鋅金屬生長至0.5 cm所需時間，並計算鋅金屬生長速率

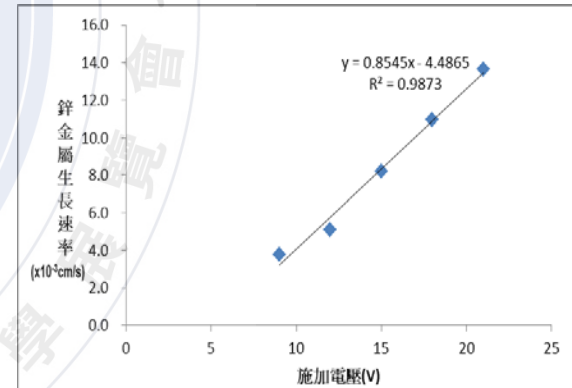


施加電壓 9.0 V & 15.0 V



施加電壓 18.0 V & 21.0 V

施加電壓 (V)	9.0	12.0	15.0	18.0	21.0
五次平均時間(s)	132.6	98.3	61.0	45.7	36.6
生長速率 ($\times 10^{-3}$ cm/s)	3.8	5.2	8.2	10.9	13.7



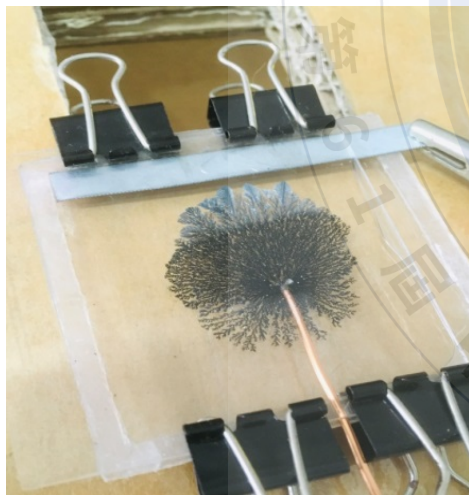
結論：施加電壓越大時，鋅金屬生長速率也相對變快

實驗結果與討論

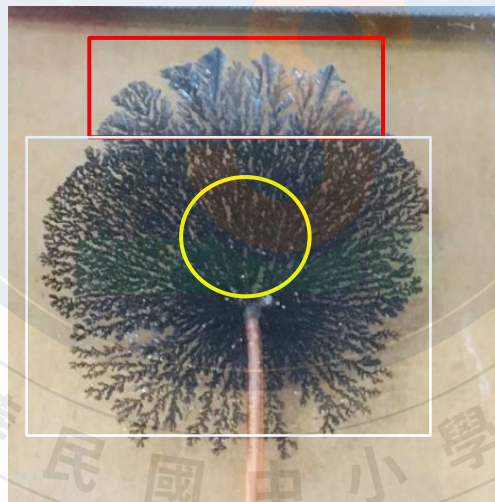


實驗三、濃度的影響(1)

- ❖ 電極距離1.0 cm、施加電壓15 V、鋅片正極、銅線負極
- ❖ 析出質量大小表示電解反應速率快慢
- ❖ 探討鋅金屬生長速率、析出質量大小與電解反應速率之間的關係



電解結果1

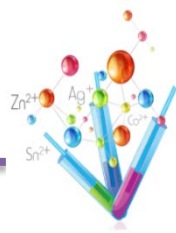


電解結果2



放置4天後

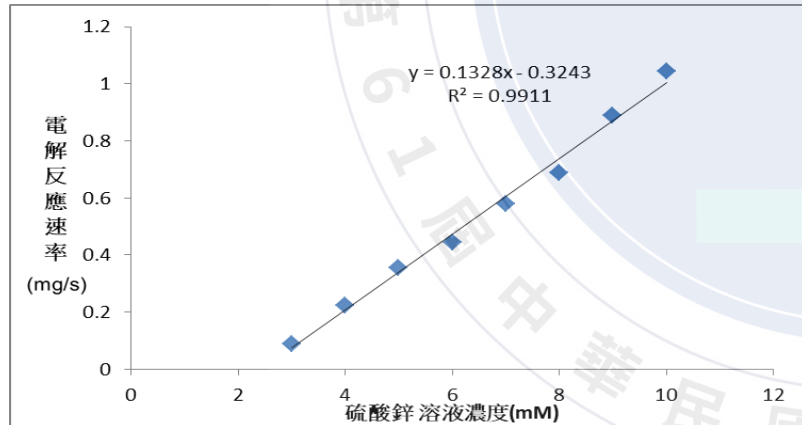
實驗結果與討論



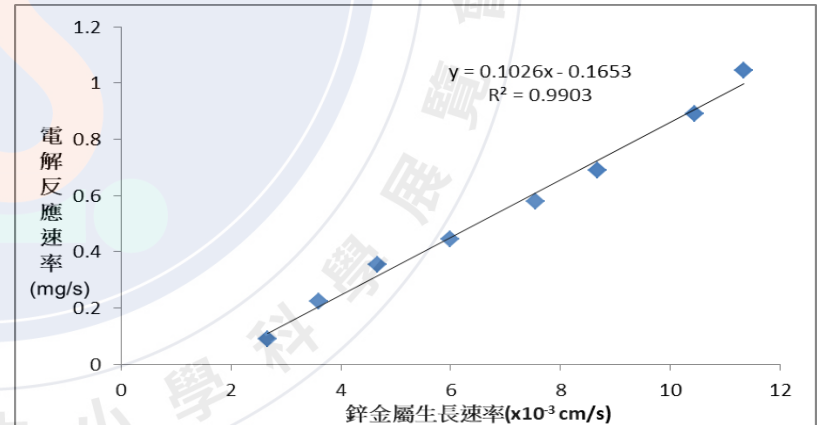
實驗三、濃度的影響(2)

以45秒內析出鋅金屬的質量計算電解反應速率的快慢

硫酸鋅溶液濃度($\times 10^{-3}$ M)	3	4	5	6	7	8	9	10
五次平均質量(g)	0.004	0.010	0.016	0.020	0.026	0.031	0.040	0.047
電解反應速率(mg/s)	0.09	0.22	0.36	0.44	0.58	0.69	0.89	1.04

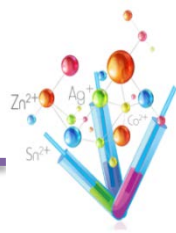


硫酸鋅溶液濃度和電解反應速率成正比



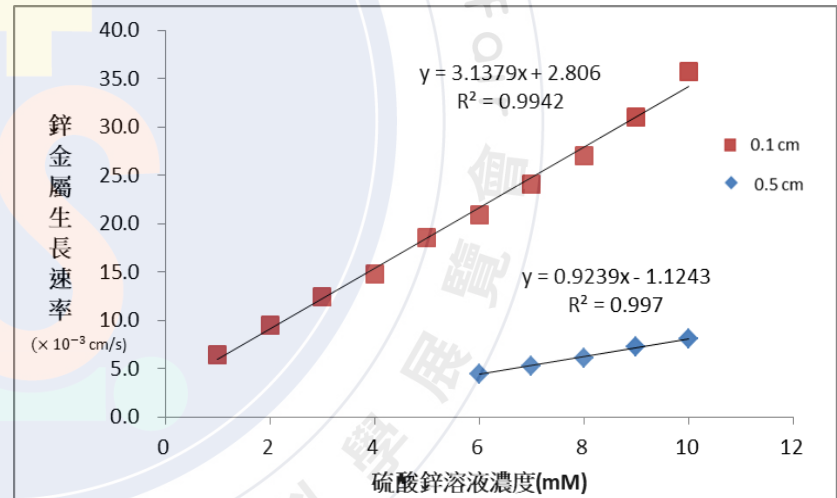
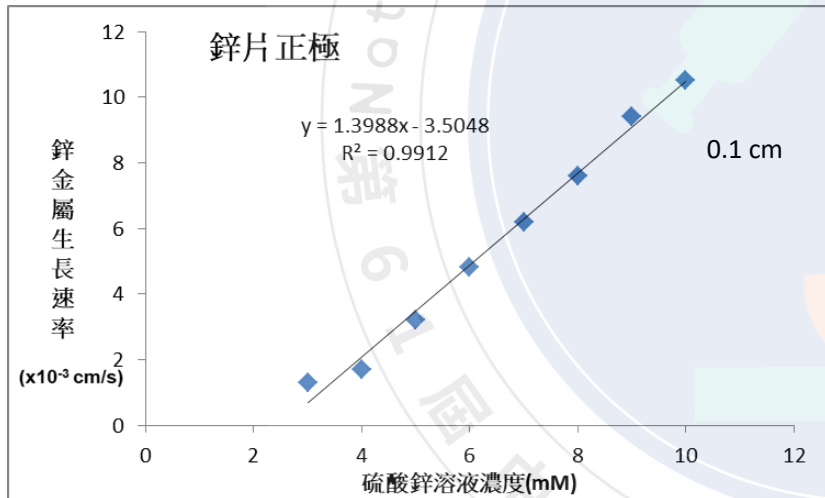
鋅金屬反應速率和生長速率成正比

實驗結果與討論



實驗四、不同電極金屬的影響

- 電極距離1.0 cm、施加電壓15 V、銅線負極
- 測量鋅金屬生長至0.1 cm、0.5 cm所需時間，並計算鋅金屬生長速率



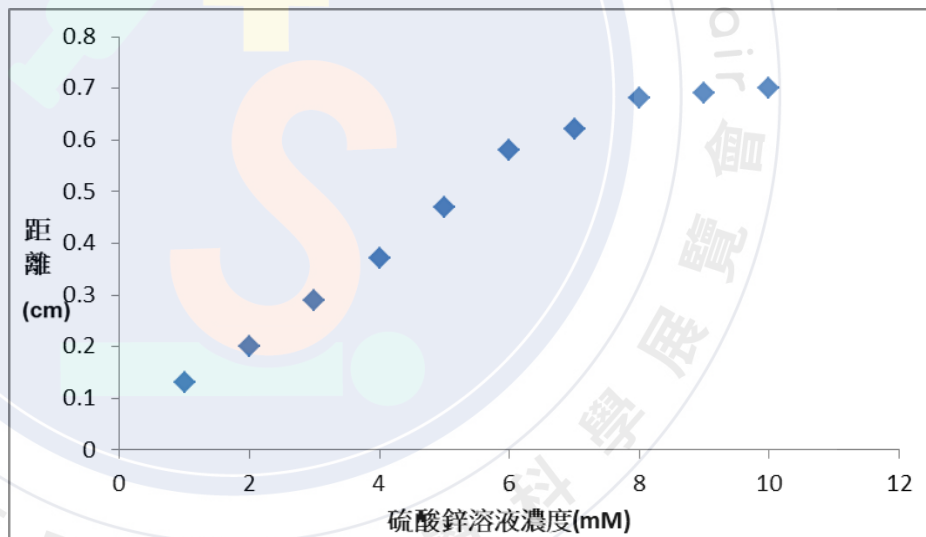
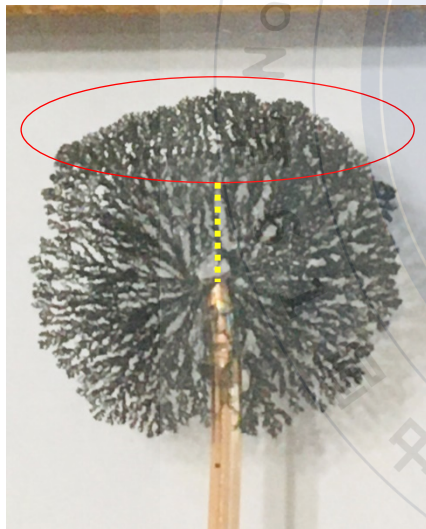
結論：鋅金屬生長速率 1)以鋅片為正極>銅片為正極
2)生長 0.1 cm>0.5 cm

實驗結果與討論



實驗五、濃度對銅金屬析出位置的影響

- 電極距離1.0 cm、施加電壓15 V、銅片正極、銅線負極
- 實驗中發現鋅金屬析出到某一特定距離時，會有紅棕色銅金屬析出



結論：當硫酸鋅溶液濃度越高時，銅金屬開始析出位置距離負極越遠

實驗結果與討論



實驗六、不同金屬溶液的影響

- 電極距離1.0 cm、施加電壓15 V、電解液濃度 10^{-2} M、銅片正極、銅線負極
- 電解液種類， Zn^{2+} 、 Co^{2+} 、 Sn^{2+} 、 Ag^{+}

		電解不同金屬離子			
		Zn^{2+}	Co^{2+}	Sn^{2+}	Ag^{+}
金屬析出長度	0.5 cm				
	1 cm				

電解溶液	硫酸鋅溶液	硫酸亞鈷溶液	硫酸亞錫溶液	硝酸銀溶液
標準還原電位(V)	-0.76	-0.28	-0.14	0.80
負極產生	鋅	鈷	錫和氫氣	銀
金屬生長速率 ($\times 10^{-3}$ cm/s)	7.5	8.3	15.7	19.5
析出銅和負極距離 (cm)	0.70	0.61	0.59	0.58

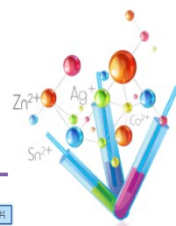
結論： 1.銅金屬生長和負極之距離分別是鋅 > 鈷 > 錫 > 銀
 2.金屬生長速率分別是銀 > 錫 > 鈷 > 鋅

研究方法比較



	58屆全國科展作品 - 鋅金屬花電析之研究	本研究創新成果 - 銅鋅生長之術
電解裝置	<ul style="list-style-type: none"> 傳統燒杯(體積約為500 mL) 	<ul style="list-style-type: none"> 簡易微型平面反應槽 體積較小、方便攜帶
使用溶液	<ul style="list-style-type: none"> 使用兩種溶液，且用量大於100毫升 	<ul style="list-style-type: none"> 僅需使用一種濃度較低的溶液，濃度為$10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ M}$ 溶液用量小於3毫升
電解過程	<ul style="list-style-type: none"> 立體生長，不容易觀察細部金屬生長 	<ul style="list-style-type: none"> 平面生長，容易觀察及記錄金屬生長情形
電解結果	<ul style="list-style-type: none"> 單種金屬(鋅)析出 	<ul style="list-style-type: none"> 可得到兩種金屬析出 (銅和，鋅、鈷、錫、銀等)
綜合討論	<ul style="list-style-type: none"> 生成花朵般薄膜狀鋅金屬結晶 	<ul style="list-style-type: none"> 可探討電極距離、外加電壓、電解液濃度、電極種類等，與金屬生長速率之數學式關係 可探討不同電解液之金屬生長速率 析出兩種金屬，未來可發展雙金屬催化綠能效應

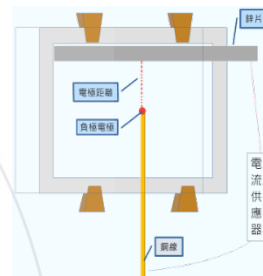
結論



1. 以鋅片正極、銅線負極，探討影響鋅金屬生長速率的因素

- 1) 電極距離越小
- 2) 外加電壓越大
- 3) 鋅離子濃度越高

金屬生長速率 (cm/s) 越快
電解速率 (mg/s) 越快



2. 以銅片正極、銅線負極，電解硫酸鋅溶液

硫酸鋅溶液濃度越大時，銅金屬析出位置越接近正極



3. 以銅片正極、銅線負極，電解不同電解液

Zn^{2+} 、 Co^{2+}
 Sn^{2+} 、 Ag^{+}

金屬生長速率：銀 > 錫 > 鈷 > 鋅
析出銅和負極的距離：鋅 > 鈷 > 錫 > 銀
(金屬標準還原電位：銀 > 錫 > 鈷 > 鋅)

參考資料

- 自然與生活科技，第六冊。1-5電流的化學效應。南一書局。
- 林子崑、曾芃臻、徐亞呈(2017)。「銅」樹銀花。中華民國第57屆中小學科學展覽會。
- 許耕閩、劉迎逸、曾于容(2018)。「鋅」花怒放-鋅金屬花電析之研究。中華民國第58屆中小學科學展覽會。