

台灣二〇〇五年國際科學展覽會

科 別：環境科學

作品名稱：還我無水污染的顯微電解世界

學 校：國立台中女子高級中學

作 者：何 書 慧

臺灣 2005 年國際科學展覽會

研究報告書封面

編號：120008-06

作者：何書慧

作品名稱：還我無水污染的顯微電解世界

Ecofriendly Electrolytic Experimentation

學校：國立台中女子高級中學

指導老師：賴月琴、孫旭初

關鍵詞：載液面、顯微電解、陰陽海



作者介紹：

我自小生長在一個普通的公教家庭裡，個性有點慵懶、迷糊中，卻有自己的執著。

例如：1. 我從小學到高中自己風雨無阻的上學，就是希望能拿到第三次的全勤獎。2. 從國一開始參加縣賽、全國科展，直到國三終於拿到了全國化學科第一名的殊榮。3. 從國三開始參加國際科展比賽，至今已第三次參加，這讓我生活在忙碌中又增加了不少的挑戰與成長！所以，雖然在女中忙碌的課業下，我仍堅持要將顯微電解的化學實驗做到自己最滿意的微形實驗為止，希望我的環保使命能因此築夢而踏實。

Ecofriendly Electrolytic Experimentation

Abstract

Chemistry experiments in school produce an abundance of waste in both materials and equipment. Since hands-on experimentation is a critical pedagogical tool the trend in classroom experimentation is clearly towards environmentally friendly experiments that scale, but was also able to measure reaction rate in blue cupric sulfate solution using the color dissipation as a rate gauge.

There was an evolution of apparatus and experiment design beginning with simple magnifying glass optics and advancing to a custom made, light-gathering microscope video apparatus that allows the experiment to be monitored and files recorded for later viewing.

I was inspired by the Yin Yang Sea phenomenon in Taipei County. The Yin Yang Sea is a coastal area in Chinkuashih, Taipei County where coastal currents in the area lack the strength to disperse the heavy metal pollutants that empty into the Lientung Bay. The result is a contrast between the blue sea water and the turgid yellow ground water. This contrast led me to add an all-purpose indicator to the reactant solution. This deepens the visual effect of the electrolysis experiment.



Ying-yang Sea

Picture from : <http://info1.tpc.gov.tw/Tbridge/Html/%B3%1/%B6%A7%AE%FC.asp>

中文摘要

還我無水污染的顯微電解世界

我們從環境保護的角度去思考學校的化學實驗時，減量減廢的微型化學實驗已是未來實驗的趨勢。經過多年的努力，我除了成功的做到電解最微量的一滴溶液外，對於從藍色硫酸銅溶液顏色消失的電解時間裡，還可做定量的檢定感到不可思議！

為了更清楚看到液滴溶液的電解反應，儀器的設計由放大鏡到自組顯微投影機，最後進階到顯微視訊的畫面，它不但可記錄下來，而且可在電腦中播放。

為了更清楚看到液滴溶液的氧化還原反應和酸鹼變化，我想到了在北台灣的金瓜石海域一處特別的景觀，那就是離岸近海處有黃藍兩個不同顏色的陰陽海！於是我加了廣用指示劑到液滴中，由電解後出現的的陰陽海畫面，更可加深實驗的效果。

最重要的是：最環保也最接近零污染的顯微化學實驗，已然是未來可發展下去的目標。

研究報告

一、研究動機

網站上熱切討論及介紹「陰陽海」景觀的資料相當的多，在不少人以欣賞的角度去看這個奇妙美麗的景點時，卻有更多的人知道這是嚴重環境污染下的產物，我們不僅無法引以為傲，更以有類似我們這塊海洋上的孤島-北台灣東北角的「黃藍」陰陽海之外，許多新形成的陰陽海引以為憂！這些陰陽海污染危害程度和東北角陰陽海的重金屬污染問題相當，而當人類所製造的污染量大於自然界的承受度時，人們將會遭受自食惡果的命運。從民國八十四年八月，環保團體曾針對六十處海灘做一次體檢，調查中發現，竟有五十三處遭到醫療…等危險廢棄物的污染，時至今日，目前的環境污染程度實在令人不敢想像！

生於斯、長於斯的我，雖為高中生，又豈能坐視目前環境惡劣如此？就在全球高科技產業傾力發展『奈米科技』微小化和資源永續的強烈需求下，我們的環境又何償不是需要最微形的化學實驗以減少原物料及環境污染的傷害？在這個信念下，我以對水污染最為嚴重的重金屬離子作為微形電解實驗研究的目標。

我認為一滴溶液也可以形成巨觀的世界：以一滴 1M 的硫酸銅溶液來說，它相當於含有約 3×10^{19} 個硫酸銅分子(溶質)，含有 1.67×10^{21} 個水分子(溶劑)，而這些分子數全部都存在於一滴 5mm 直徑(500 萬奈米長度)所佔的圓形平面面積 $1.96 \times 10^{13} \text{ nm}^2$ 的圈圈裏。換算出每奈米平方的平面面積就約含 153 萬個硫酸銅分子，以及還有更多的水分子！所以，一滴溶液所含的分子數已是天文數字了，相信我們只要在儀器及實驗設計做改進，它的量應足夠我們做實驗才是！這也是相當吸引我努力不懈探討下去的原因了。

二、研究目的

1. 承載液滴的載液面比較
2. 液滴的放大設計及折射與反射入鏡的比較實驗
3. 微觀電解影響硫酸銅溶液的實驗因素
4. 微觀電解水溶液加廣用指示劑的陰陽海比較實驗
5. 微觀碘化鉀溶液、鹵化鉀溶液及硫酸銅溶液加廣用指示劑的陰陽海比較實驗

三、研究設備器材

No	器材	No	器材	No	藥品
1	自行組裝的顯微投影機	14	數字型電錶	27	硫酸銅
2	自行組裝的聚光散熱箱	15	直流電源供應器	28	廣用指示劑
3	自製螢幕紙箱	16	充電電池及簡易電池座	29	氯化鈉
4	黑色珍珠板	17	毫安培計	30	鹽酸
5	鍍鎳的大頭針	18	碼錶	31	氫氧化鈉
6	自製細格及雙圓十字的投影片	19	鱈魚夾線	32	碘化鉀
7	玻片	20	放大鏡	33	溴化鉀
8	鉛筆心	21	三角鐵架	34	氯化鉀
9	鐵釘	22	培養皿		
10	鋁箔	23	強力方型磁鐵		
11	銅箔	24	膠帶		
12	滴管及滴瓶	25	數位相機		
13	塑膠夾	26	數位攝影機		

四、理論探究

1. 電解(electrolysis): 根據電離說的觀念「電解質供應直流電時, 因外加電能使電解槽中正離子移向負極, 而負離子移向正極」。例如水的解離 $\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{極少部分解離}} \text{H}^+ + \text{OH}^-$
- (-) 極還原反應: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ 還原電位=0V, 但水溶液中大部份是水, 所以負極反應:
 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ 還原電位=-0.83V,
- (+) 極反應: $4\text{OH}^- \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$ 氧化電位=-0.40V, 中性或酸性水溶液的 OH^- 少, 所以, 負極反應: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ 氧化電位=-1.23V,
-
- 總反應 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 總電位=-2.89V 所以需外加電能約 3V 才可進行電解水的反應。
- 再者以電解食鹽水為例: $2\text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{電解}} 2\text{NaOH} + \text{H}_2 + \text{Cl}_2$
- (-) 極還原反應: $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$ 電位=0V 或 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$ 電位=-0.83V, 而 $\text{Na}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Na}$ 還原電位=-2.71V (所以產生的 H_2 還原電位比生成Na高, 優先生成 H_2)
- (+) 極氧化反應: $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ 電位=-1.36V 而 $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ 電位=-1.23V,
-
- 總反應 $2\text{Na}^+ + 2\text{Cl}^- + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{電解}} \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2\text{NaOH}$ 總電位=-2.19V, 其需要的外加電壓及電能顯然比 $2\text{Na}^+ + 2\text{Cl}^- + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{電解}} \text{O}_2 + \text{H}_2 + 2\text{Na}^+ + 2\text{Cl}^-$ 總電位=-2.89V 的低些, 所以, 正極優先生成氯 Cl_2 。
2. 電泳(electrophoresis, EP): 帶電粒子在電場作用下, 向著與其電性相反的電極移動, 謂之。所以, 任何物質由於本身的解離作用或表面上吸附其他帶電質點, 在電場中便會向相反的電極移動, 此帶電粒子可以是離子、分子、蛋白質...等。因為蛋白質分子是由胺基酸所組成(通式為 $\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COO}^-$), 其可解離出胺基($-\text{NH}_3^+$)和羧基($-\text{COO}^-$), 是典型的兩性電解質, 其整體仍為中性的, 它在一定的pH條件下, 會因其離子強度、分子的性質、溶液的pH值等解離而帶電。
3. 等電點(isoelectric point, pI): 在某一pH條件下, 蛋白質分子所帶的正電荷恰巧等於負電荷數, 即靜電荷等於零, 此時蛋白質質點在電場中不移動, 而溶液的這一pH值就稱為此蛋白質的等電點pI值。不同的蛋白質其pI值不一定相同, 所以, 在某溶液中pH值若大於此蛋白質的pI值, 則此蛋白質分子會解離出氫離子帶負電而在電場中向正極移動; 若的溶液中pH值若小於此蛋白質的pI值, 則此蛋白質分子會結合一部分的氫離子帶正電而在電場中向負極移動。蛋白質是一個雙質子酸, 它有 K_{a1} 及 K_{a2} 兩個平衡常數如下:
- 在酸性環境中, $\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COOH} \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COO}^-$
 $K_{a1} = [\text{H}^+][\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COO}^-] / [\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COOH}]$
- 在鹼性環境中, $\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COO}^- \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{RCH}(\text{NH}_2) \text{COO}^-$
 $K_{a2} = [\text{H}^+][\text{RCH}(\text{NH}_2) \text{COO}^-] / [\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COO}^-]$
- 將兩者相乘 $K_{a1} \times K_{a2} = [\text{H}^+] [\text{RCH}(\text{NH}_2) \text{COO}^-] / [\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COOH}]$
- 再取對數則 $\text{p}K_{a1} + \text{p}K_{a2} = 2\text{pH} - \log([\text{RCH}(\text{NH}_2) \text{COO}^-] / [\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COOH}])$
- 當蛋白質的正電荷恰巧等於負電荷數 $[\text{RCH}(\text{NH}_2) \text{COO}^-] = [\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COOH}]$ 時,
 $\log([\text{RCH}(\text{NH}_2) \text{COO}^-] / [\text{RCH}(\text{NH}_3^+) \text{COOH}]) = 0$
- 所以, 蛋白質等電點pI的 $\text{pH} = 1/2 (\text{p}K_{a1} + \text{p}K_{a2})$, 例如: 有一種胺基酸alanine的 $K_{a1} = 2.3$, $K_{a2} = 9.7$, 所以其pI的 $\text{pH} = 6.0$ 。而另一種胺基酸serine的 $K_{a1} = 2.2$, $K_{a2} = 9.2$, 所以其pI的 $\text{pH} = 5.7$ 。我們可控制有此兩種胺基酸在內的環境為 $\text{pH} = 5.8$, 此時對alanine而言, 環境是酸性的, 所以它帶一些正電, 做電泳時它會往負極移動; 而對serine而言, 環境是鹼性的, 所以它會帶一些負電, 做電泳時它會往正極移動, 所以, 兩者可因此而造成分離的效果。
4. 因電解在正負電極處可產生不同的pH值, 若此時有酸鹼指示劑的存在, 就會在兩極處有不同的顏色產生, 就像陰陽海一樣, 當其交界面處的正電荷恰巧等於負電荷數時, 靜電荷等於零, 此即像蛋白質達等電點pI的pH值一樣。

五、研究過程及方法

【目的一、承載液滴的載液面比較】

實驗一、不同濃度硫酸銅溶液在不同載物面上的液滴比較

硫酸銅(M)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
玻片液滴角度						
投影片液滴角度						
玻片液滴直徑 mm						
投影片液滴直徑 mm						

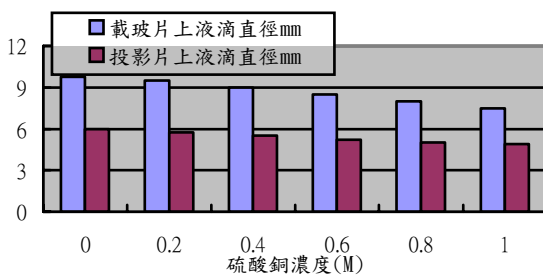
【實驗記錄】清水及不同濃度硫酸銅液滴在玻片、投影片上的液滴直徑、高度及角度比較
 刻度尺以電腦繪製成 0 線條粗細、間距為 1mm 的投影片置於白色桌面上，上方放置已滴有液滴的載玻片或投影片，然後以數位相機由上而下攝取放大圖片，以準確量測出液滴直徑；再以固定距離對著桌面上液滴拍攝液滴的高度及角度(每種濃度滴三滴求平均值)

硫酸銅濃度(M)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
載玻片上液滴直徑 mm	19.5/2	19.0/2	18.0/2	17.0/2	16.0/2	15.0/2
投影片上液滴直徑 mm	12.0/2	11.5/2	11.0/2	10.3/2	10.0/2	9.8/2
投影片上液滴高度 mm	約 2.0~3.4					
載玻片上液滴角度°	28	30	左 34 右 25	左 30 右 27	左 35 右 35	左 28 右 40
投影片上液滴角度°	74	76	77	78	79	81
載玻片上液滴高度 mm	約 1.0~2.0					

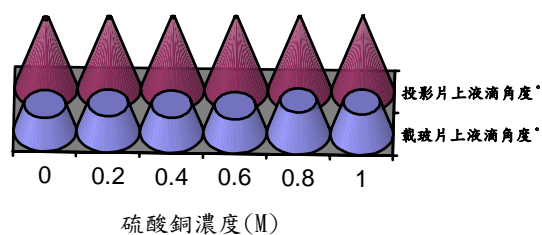
【結果歸納】載玻片、投影片二種載液面的比較如下表所示

載液面材質	載玻片	投影片
液滴直徑	平均 8.7	5.4mm
液滴高度	最低，約 1~2mm	適中，約 2~3.4mm
液滴角度	25~40°	74~81°

圖一、硫酸銅在不同載液面下的液滴直徑比較



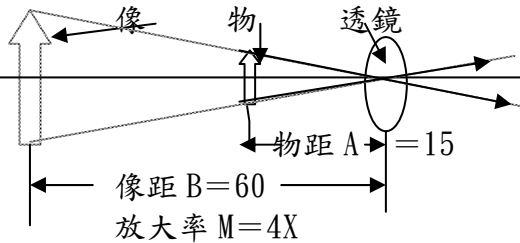
圖二、硫酸銅在不同載液面下的液滴角度比較



【目的二、液滴的放大設計及折射與反射入鏡的比較實驗】

放大鏡放大率比較

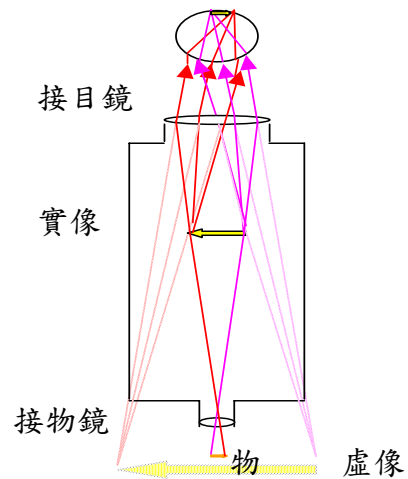
說明：三角架高不到 20cm，焦距 20cm 的放大鏡置於其上，很明顯的物置於三角架底為放大鏡的一倍焦距內，故可形成放大的正立虛像。例如：物距透鏡 15cm 小於焦距 20cm 的放大率（根據凸透鏡成像原理及數學相似三角形法運算）可達四倍的正立放大虛像。



以三角架支撐焦距為 20cm 的放大鏡，角架高度低於 20cm，物形成正立放大的影像。在放大鏡台上觀察一滴溶液的電解清楚多了。

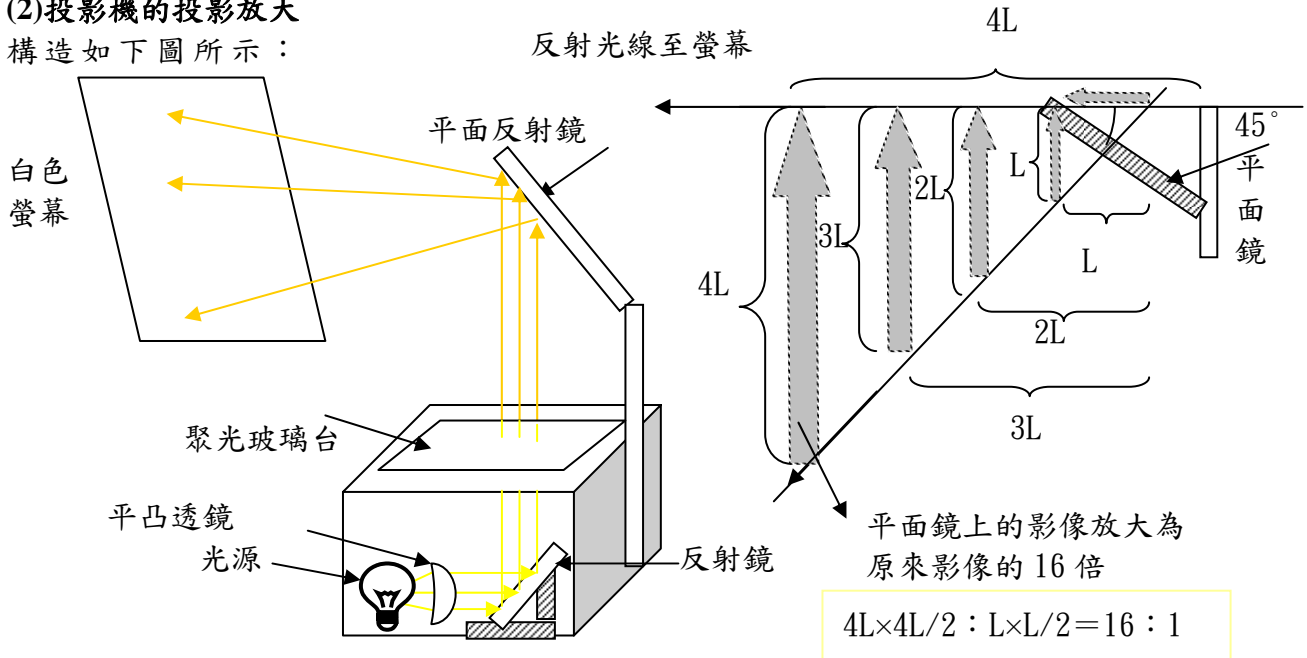
顯微投影機放大率比較

說明：由焦距較短之凸透鏡作為接物鏡，另一個是焦距較長之凸透鏡作為接目鏡。將物體置於接物鏡焦點外側附近，則會於接目鏡焦點之內產生一倒立放大實像，設此放大倍率為 M_1 ；此實像再經接目鏡產生一放大的虛像，其放大倍率為 M_2 ；此虛像正是我們自顯微鏡中眼睛所看到的像，且此顯微鏡之放大倍率為 $M = M_1 \times M_2$ 。(1)顯微鏡頭眼睛



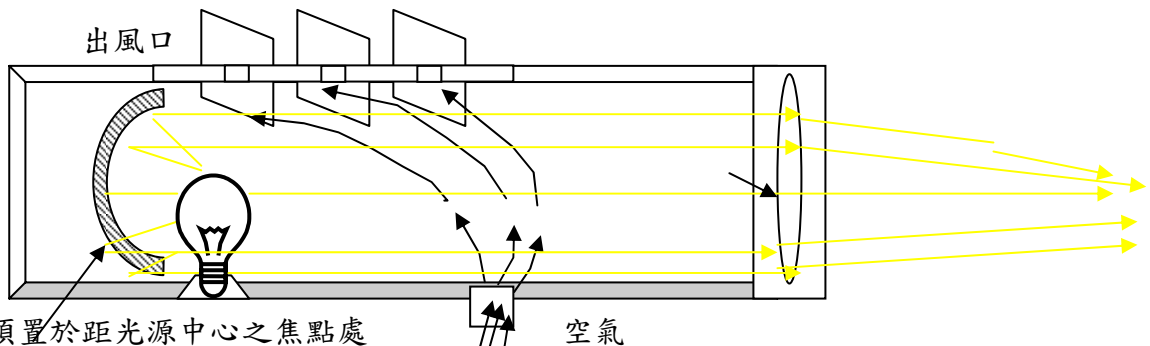
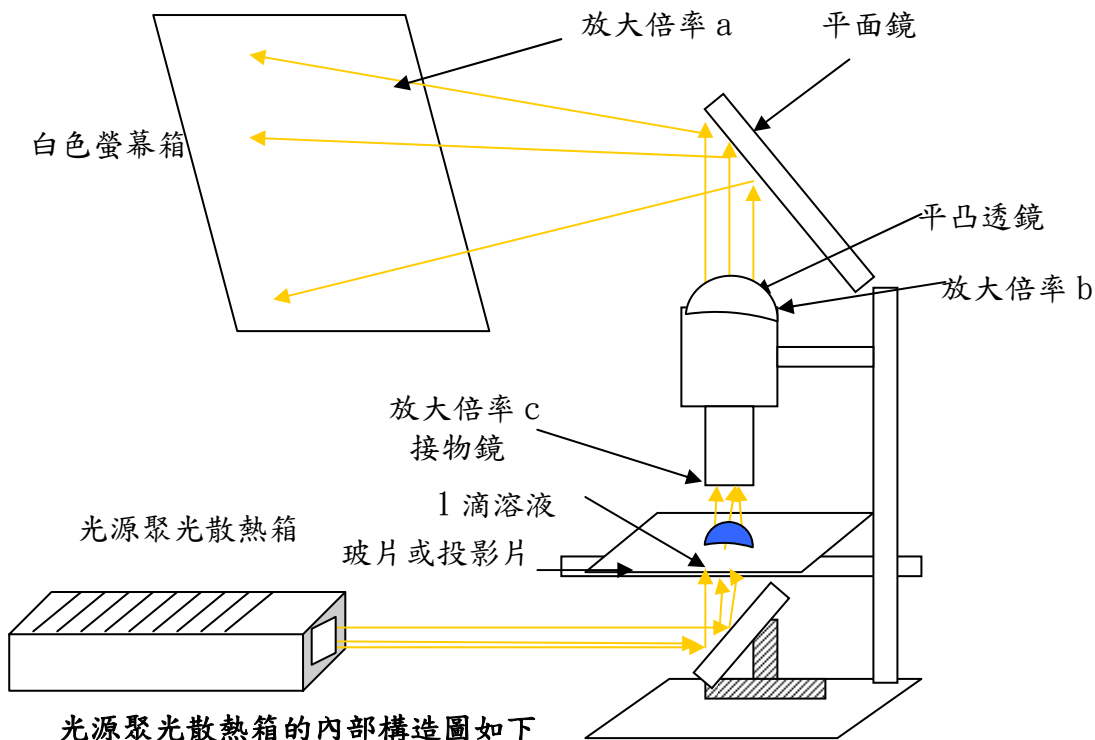
(2) 投影機的投影放大

構造如下圖所示：



燈光的面光源發散光線後經平凸透鏡聚光成水平入射光，射至 45° 反射鏡後，入射角為 45°，反射角亦為 45°，故光線可呈垂直向上射出經過聚光玻璃台。根據光線直傳播原理，置放於玻璃台上的投影片，受到來自正下方的光線，透明處或透明色彩處，光可透過；不透明處則光不可穿過而形成影子；最後，再由上方的平面反射鏡反射至白色螢幕上呈像。

(3)顯微加上投影光源由液滴下方折射至接物鏡，最後再投影至螢幕箱上，入光量需很強，所需電費不吝，而且無法看清不透明物的外觀顏色而與化學實驗由上方向下方觀測反應變化的習慣無法完全契合。放大倍率為 $axbxc$



反光鏡須置於距光源中心之焦點處

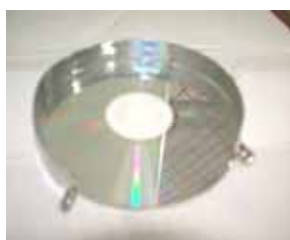
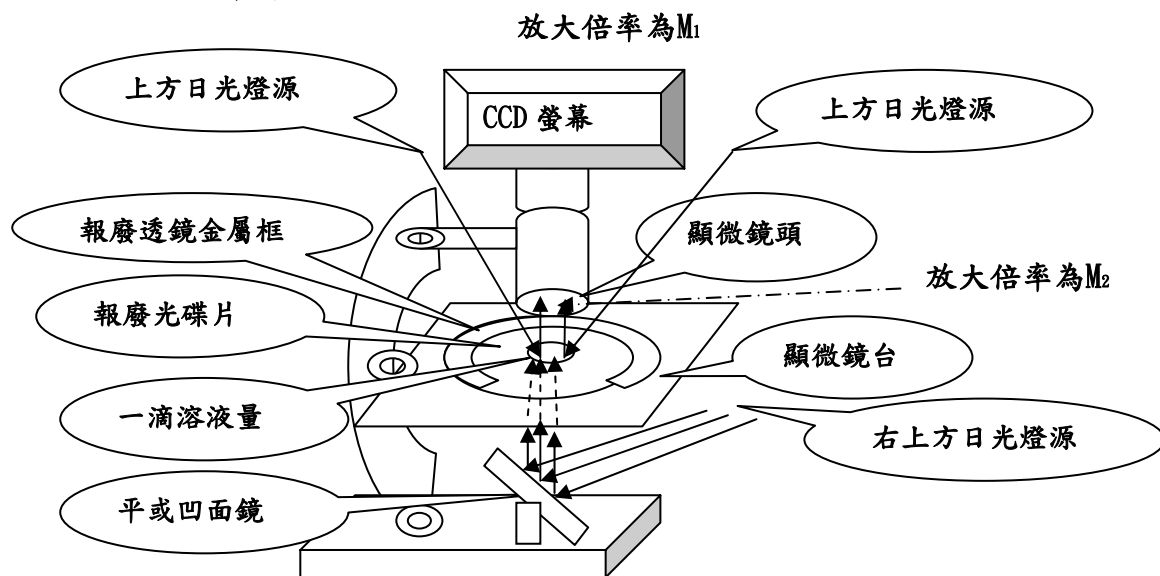
節錄拍攝投影螢幕箱改進過程的實際比較畫面

顯微電解 1 滴 0.5MKI 溶液的電解情形(左為正極大頭針、右為負極大頭針電極)的反應圖片



0.5cm 方格在投影螢幕上 (因無遮光拍照時太亮了)	顯微電解 1 滴碘化鉀溶液 反應 10 秒時的情形	反應 40 秒時的情形	反應 90 秒時的情形(已無法 看清析出物的外觀及顏色)
--------------------------------	------------------------------	-------------	---------------------------------

(4)顯微加CCD電子螢幕投影及聚光反射光碟盤的設計終於可由上方向下看見不透明物的顏色及外觀(放大倍率為 $M_1 \times M_2$)



報廢的光碟片及金屬框



螢幕上可鎂粉外觀及形狀



螢幕下的一氧化鉛



微量二鉻酸鉀粉末

實驗二、電解一滴硫酸銅溶液時在不同載物面上的起泡力及金屬析出物比較

準備：自組的顯微聚光反射電子投影機、自製十字投影片、玻片、1.0M 硫酸銅溶液、大頭針、3V 充電電池座、毫安培計、滴管、碼錶、自製電極支撐架及導線夾。

步驟：1 將投影片或玻片置於顯微台上，滴上 1 滴 0.1M 的硫酸銅備用。

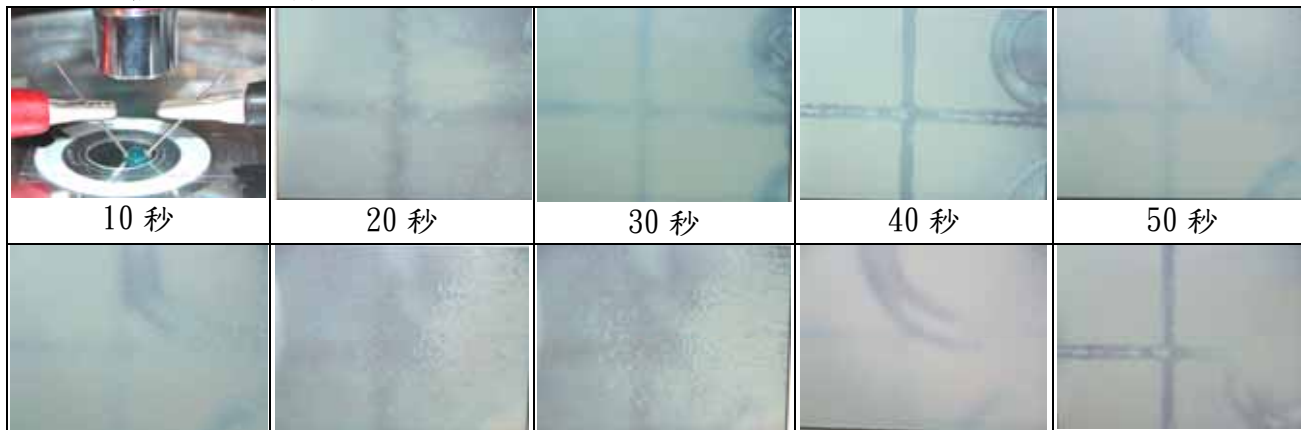
2 正負極均為大頭針，以鱷魚夾線夾住後，移至顯微台上，準備以 3V 的電壓開始電解。

3 電解後，開始以碼錶每 10 秒定點對著 CCD 螢幕以數位相機拍攝電解畫面如下。

4 將投影片換成玻片置於顯微台上，再如前步驟操作之。

【實驗記錄】由最後發展成功的裝置設計所拍攝的顯微電解畫面如下：

(1)以投影片為接觸載體，顯微電解 1 滴 1M 硫酸銅溶液時，每 10 秒拍攝的過程全都錄



60 秒	70 秒	80 秒	90 秒	100 秒
110 秒	120 秒	130 秒	140 秒	150 秒
160 秒	170 秒	180 秒	190 秒	200 秒
210 秒	220 秒	230 秒	240 秒	250 秒
260 秒	270 秒	280 秒	290 秒	300 秒
310 秒	320 秒	330 秒	340 秒	350 秒
360 秒	370 秒	正極生大量的氧	負極還原析出銅	電解後的正負極

(2)以【玻片】為接觸載體，顯微電解 1 滴 1M 硫酸銅溶液時，每 10 秒拍攝的過程全都錄

10 秒	20 秒	30 秒	40 秒	50 秒
60 秒	70 秒	80 秒	90 秒	100 秒



【結果歸納】

- 液滴在不同載液面因表面張力的角度不同，會形成不同曲率半徑的液面，液滴較平坦的載玻片較無法提供足夠的液滴高度，所以要讓正極反應產生的氣泡形成不如投影片的容易。
- 硫酸銅溶液滴在投影片的載液面上的高度容易讓正極的氧氣泡形成，而且投影片的無黏性、低附著力則可使快速形成的氣體分子流動順暢、聚合、脹大、最後迸裂。

3

載液面材質	載玻片	投影片
電解情形	過程中正極的氣泡產生較少，倒是負極析出的金屬銅較易展開，待銅析出量不少時，才易看到氣泡在銅狀物上生成，但量不如投影片的多。	過程中可看到非常多且相當快速的氣泡由正極蜂擁而出，且此群氣泡流明顯的由正極擠向負極，至於負極則形成團狀的金屬銅。

- 最後我決定以透明的、不易破、乾燥後亦很容易剝落、清理容易、不留痕跡、可重覆使用的投影片做以下實驗的載液面。

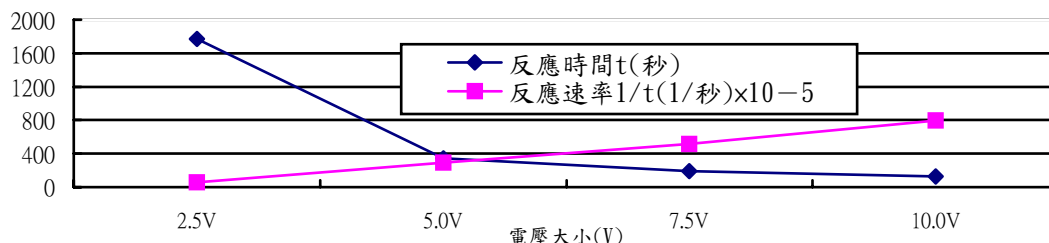
【目的三、微觀電解影響硫酸銅溶液的實驗因素】

實驗三、不同電壓下的微形電解硫酸銅的實驗【實驗記錄】如附件一

合計電解液藍色溶液變無色的反應時間及反應速率如下表所列

電源供應器電壓(V)	2.5V	5.0V	7.5V	10.0V
反應時間 t(秒)	1773	342	194	126
反應速率 $1/t(1/秒)\times 10^{-5}$	56.4	292	515	794

圖三、微形電解硫酸銅溶液的電壓與反應時間及反應速率的關係



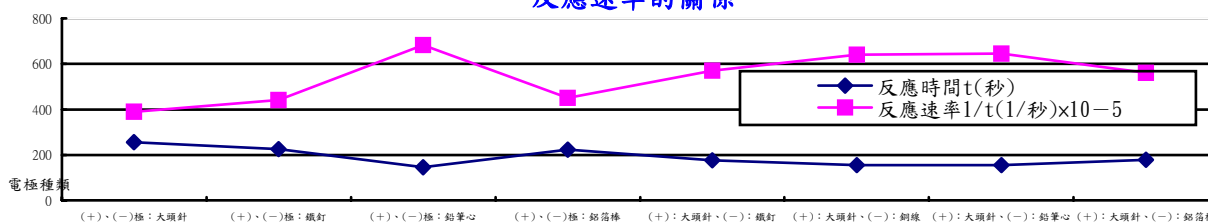
【結果歸納】根據化學計量，一滴同濃度同劑量的硫酸銅溶液的溶質量約為 $(M)\times V\times M=1\times 0.05/1000\times 63.5\div 0.003g\div 3mg$ ，所以，在不同電壓下，負極析出金屬銅的量差異不大，而實驗中藍色銅離子還原變金屬銅析出，使溶液變無色時即表示反應已結束，電壓愈大，反應時間愈短，反應速率愈大，電壓與反應速率似乎可看出成正比的關係。同樣的，正極的氧氣泡生成速率亦為 $10V>7.5V>5.0V>2.5V$ 。

實驗四、不同電極下的微形電解硫酸銅的實驗【實驗記錄】如附件二

合計電解液藍色溶液變無色的反應時間及反應速率如下表所列

電極種類	(+)-(-)極：大頭針	(+)-(-)極：鐵釘	(+)-(-)極：鉛筆心	(+)-(-)極：鋁箔棒	(+)：大頭針、(-)：鐵釘	(+)：大頭針、(-)：銅線	(+)：大頭針、(-)：鉛筆心	(+)：大頭針、(-)：鋁箔棒
反應時間 t(秒)	256.3	226.3	146.6	222.3	175.0	156.0	155.0	178.3
反應速率 $1/t(1/秒)\times 10^{-5}$	390	442	682	450	571	641	645	561

圖四、微形電解硫酸銅溶液在不同的電極下與反應時間及反應速率的關係



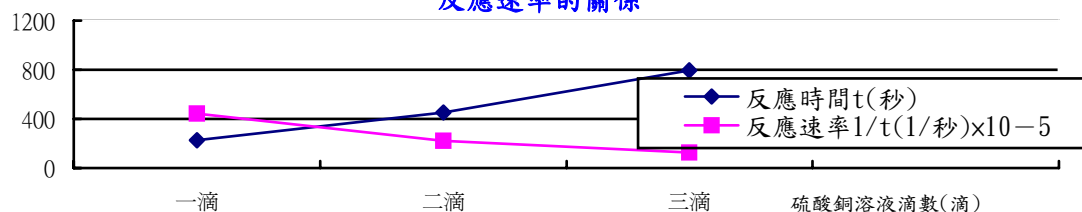
【結果歸納】

- 在相同 5V 的電壓下，根據化學計量，一滴同濃度同劑量的硫酸銅溶液的溶質量是相同的，由藍色溶液變無色的反應時間可比較出各電極間的電位差及活性大小，本想多比較幾組金屬的，但礙於電極面積規格受限及取得不易只好作罷！
- 鉛筆心電極因有黑色鉛筆心溶解的情形出現，恐會干擾判讀反應時間，所以不予以比較，由反應速率可知其 (+) 極：大頭針、(-) 極：銅線 > (+) 極：大頭針、(-) 極：鐵釘 > (+) 極：大頭針、(-) 極：鋁箔棒 > (+)、(-) 極：鋁箔棒 > (+)、(-) 極：鐵釘 > (+)、(-) 極：大頭針，由數據顯示，相同電極的電位差較小，反應時間較長，所以反應速率比較慢；不同電極間的電位差比較大，除了外加直流電源的電壓外，可能還有自己電極間的電位差，所以 (+) 極：大頭針、(-) 極：銅線 的負載電流始終比其他的電極還要高，難怪反應速率較快了。

實驗五、不同溶液滴數(電極間距不同)下的微形電解硫酸銅的實驗【實驗記錄】如附件三
合計電解液藍色溶液變無色的反應時間及反應速率如下表所列

1M的CuSO ₄ 的量	一滴	二滴	三滴
反應時間 t(秒)	226	451	797
反應速率 $1/t(1/秒)\times 10^{-5}$	442	222	125

圖五、微形電解硫酸銅溶液的溶液量與反應時間及反應速率的關係

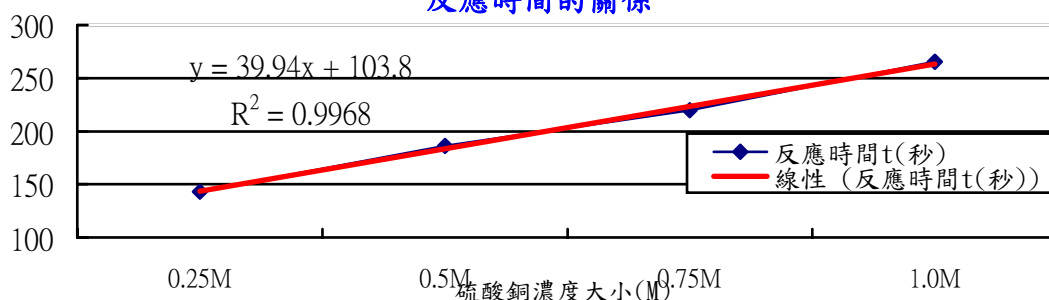


【結果歸納】溶液量愈多，根據化學計量，三滴量是一滴同濃度硫酸銅溶液的溶質量的3倍，由藍色溶液變無色的反應時間亦應為3倍；同樣的，二滴量是一滴同濃度硫酸銅溶液的溶質量的2倍，由藍色溶液變無色的反應時間亦應為2倍，由圖五顯示結果還算不錯。

實驗六、不同溶液濃度下的微形電解硫酸銅的實驗【實驗記錄】如附件四
合計電解液藍色溶液變無色的反應時間如下表所列

硫酸銅電解液濃度	0.25M	0.50M	0.75M	1.00M
反應時間 t(秒)	143.3	186.3	219.7	265.3

圖六、微形電解硫酸銅溶液的溶液濃度與反應時間的關係



【結果歸納】

- 以化學計量上而言，同樣一滴的0.25M-1.0M的硫酸銅溶液，其所含的硫酸銅溶質量的莫耳數比為 $(0.25 \times 0.05 \times 10^{-3}) : (0.5 \times 0.05 \times 10^{-3}) : (0.75 \times 0.05 \times 10^{-3}) : (1.0 \times 0.05 \times 10^{-3}) = 1 : 2 : 3 : 4$ ，反應由藍色溶液變無色的時間亦應溶質量愈高，反應時間愈長。
- 由圖四實驗圖示結果可以畫出濃度與反應時間成正比的線性迴歸曲線，如果將未知濃度的反應時間(y項)偵測出來後，代入此線性迴歸曲線公式中，即可推算出未知濃度的(x)值。

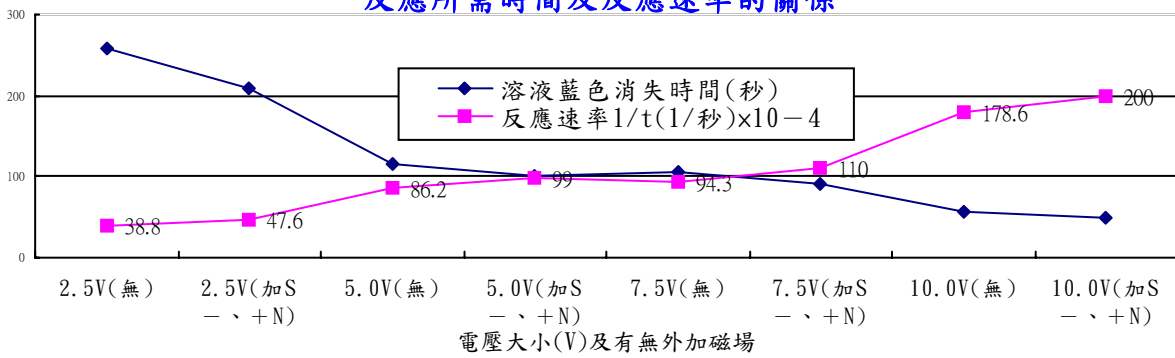
實驗七、不同直流電壓下，外加磁場對電解一滴0.5M硫酸銅溶液的影響(1)

【實驗記錄】如附件五

合計1滴0.5M的CuSO₄溶液在各電壓且有無外加強力磁場下的反應時間及反應速率大小如下：

電壓及有無外加磁場	2.5V(無)	2.5V(加S-、+N)	5.0V(無)	5.0V(加S-、+N)	7.5V(無)	7.5V(加S-、+N)	10.0V(無)	10.0V(加S-、+N)
溶液藍色消失時間(秒)	258	210	116	101	106	91	56	50
反應速率 $1/t(1/秒)\times 10^{-4}$	38.8	47.6	86.2	99	94.3	110	178.6	200

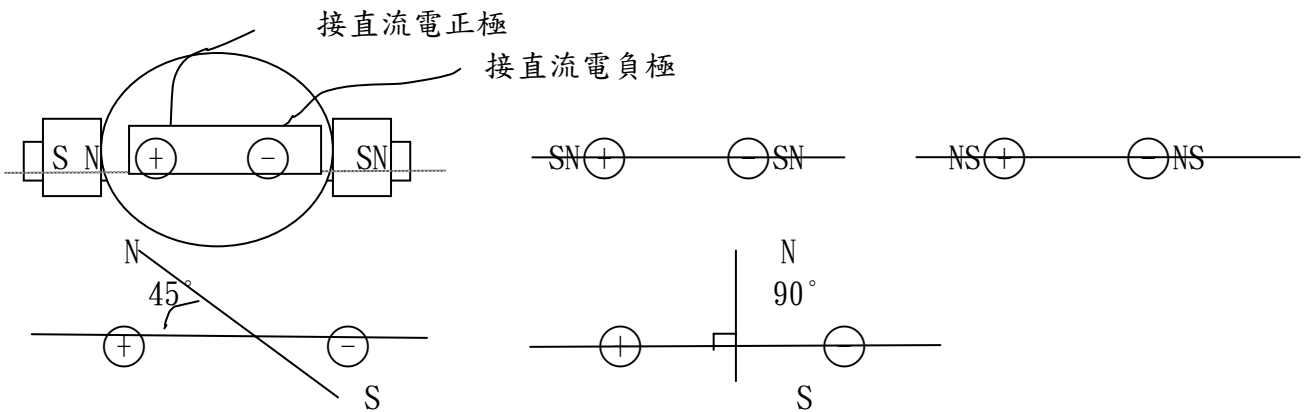
圖七、微形電解1滴0.5M硫酸銅溶液在有無外加磁場下各電壓的反應所需時間及反應速率的關係



【結果歸納】結果很明顯的，不管是幾伏特電壓，只要有外加磁場均可使反應時間縮短，而使反應速率變快，由此可見，外加磁場也是影響電解硫酸銅溶液反應時間及速率的重要條件。而為了更確定磁場對電解硫酸銅溶液所造成的影響，我們相信外加磁場與電極的擺放角度可能也有所不同，所以再進行實驗八加以追蹤。

實驗八、不同直流電壓下，外加不同角度的磁場對電解二滴0.5M硫酸銅溶液的影響(2)

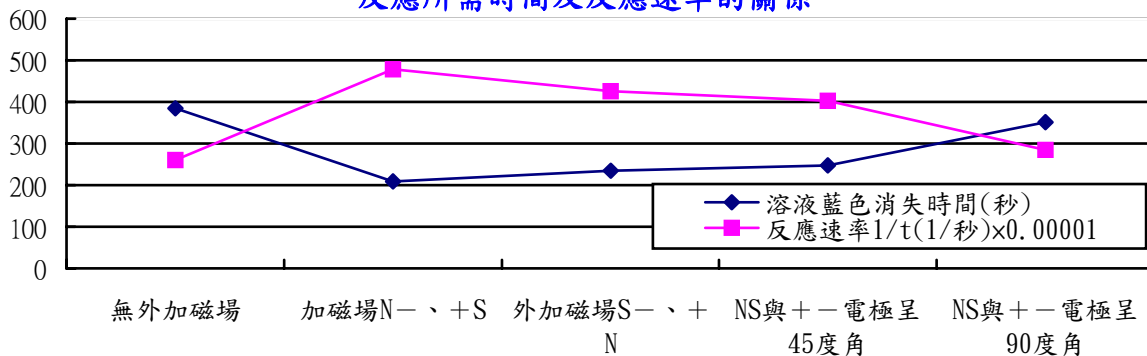
各正、負極電極及外加磁場的實驗配置如下圖所示【實驗記錄】如附件六



在相同電壓下，綜合2滴0.5M的CuSO₄溶液且在有無不同外加磁場角度下的反應時間及反應速率大小比較則如下：

電壓及有無外加磁場	無外加磁場	加磁場 N-、+S	外加磁場 S-、+N	NS與+-電極呈45°角	NS與+-電極呈90°角
反應時間(秒)	385	209	235	248	351
反應速率 $1/t(1/秒) \times 10^{-5}$	260	478	426	403	285

圖八、微形電解2滴0.5M硫酸銅溶液在有無外加磁場下的反應所需時間及反應速率的關係



【結果歸納】

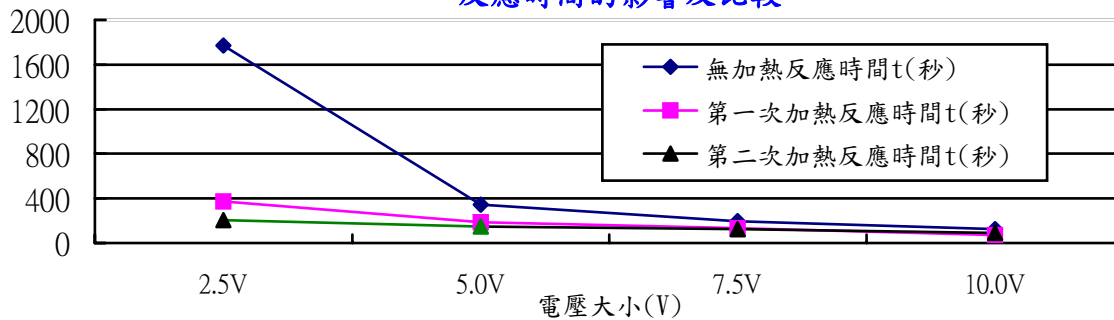
1. 有外加磁場的前 60 秒負載電流大小比沒有加磁場的較大；外加磁場與正、負極的夾角以平行的較 45 度的為佳；45 度的又比夾角 90 度的較好。
2. 反應時間為：加磁場 N-、+S<加磁場 S-、+N<NS 與+-電極呈 45°角<NS 與+-電極呈 90°角<無外加磁場，由此可知，有外加磁場的比沒有加磁場的較快；外加磁場與正、負極的夾角以平行的較 45 度的為佳；45 度的又比夾角 90 度的為佳。

實驗九、不同直流電壓下，加熱對電解一滴 1M 硫酸銅溶液的影響【實驗記錄】如附件七

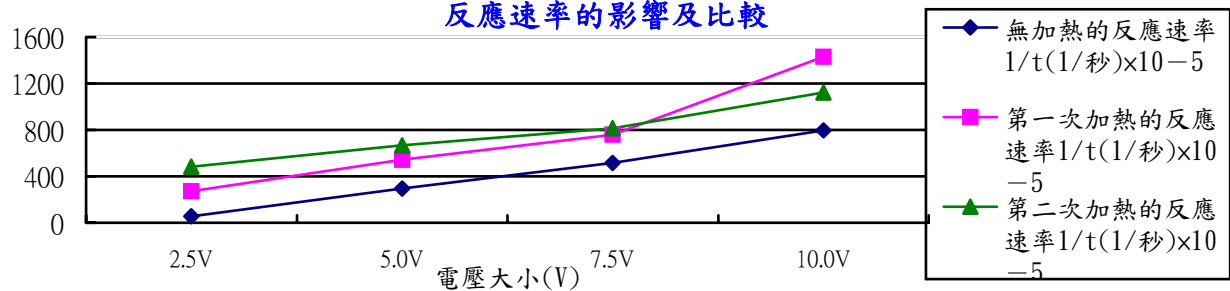
綜合不同直流電壓下，加熱對電解一滴 1M 硫酸銅溶液的影響數據比較如下所示：

電源電壓(V)	2.5V	5.0V	7.5V	10.0V
無加熱反應時間 t(秒)	1773	342	194	126
第一次加熱反應時間 t(秒)	370	185	132	70
第二次加熱反應時間 t(秒)	206	150	123	89
無加熱的反應速率 $1/t(1/秒)\times 10^{-5}$	56.4	292	515	794
第一次加熱的反應速率 $1/t(1/秒)\times 10^{-5}$	270	541	758	1429
第二次加熱的反應速率 $1/t(1/秒)\times 10^{-5}$	485	667	813	1124
無加熱/加熱的時間比或反應速率比	4.8~8.6 倍	1.85~2.28 倍	1.47~1.58 倍	1.42~1.8 倍

圖九、有無加熱對微形電解硫酸銅溶液反應時間的影響及比較



圖十、有無加熱對微形電解硫酸銅溶液反應速率的影響及比較



【結果歸納】

結果很明顯的，不管是幾伏特電壓，只要有加熱均可使反應時間縮短，而使反應速率變快，而兩者並非呈反比的倍數關係。加熱時間愈長，對微形電解硫酸銅溶液的影響就愈大。

【目的四、微觀電解水溶液加廣用指示劑的陰陽海比較實驗】

實驗十、一滴廣用指示劑的電解實驗

一般約 30ml 左右的溶液量通常只加一、二滴的指示劑，所以若一滴水也加原標準濃度的指示劑一滴似乎太濃了，因此，我準備以一片的廣用指示劑加入 10 滴的去離子水中溶解後的稀釋液為指示劑(如右圖所示)以進行下列實驗。

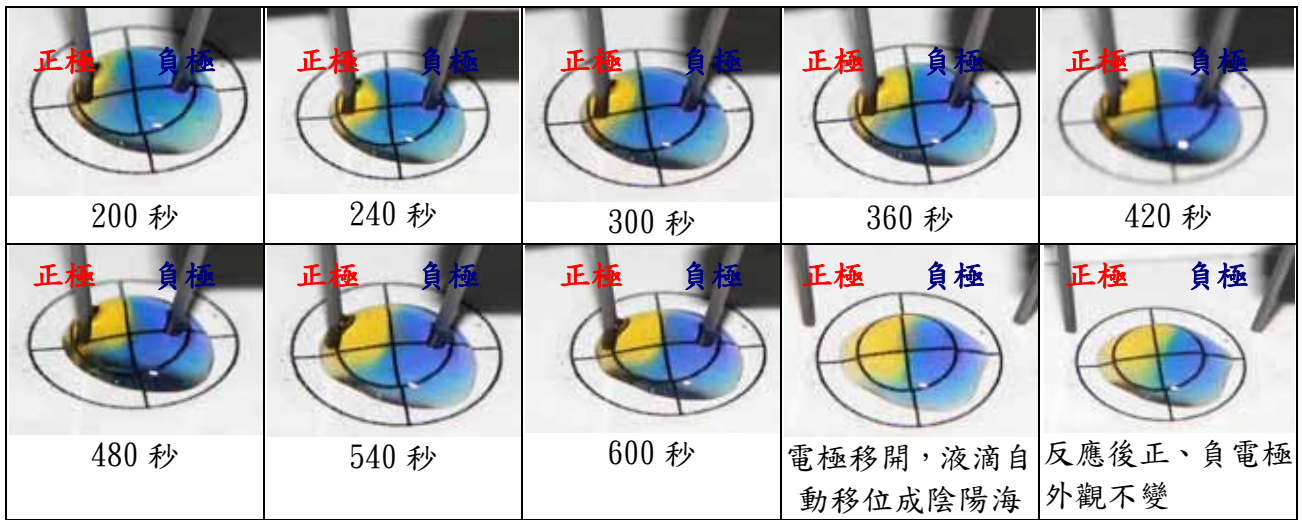


【正、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 20~60 秒時拍攝的過程全都錄

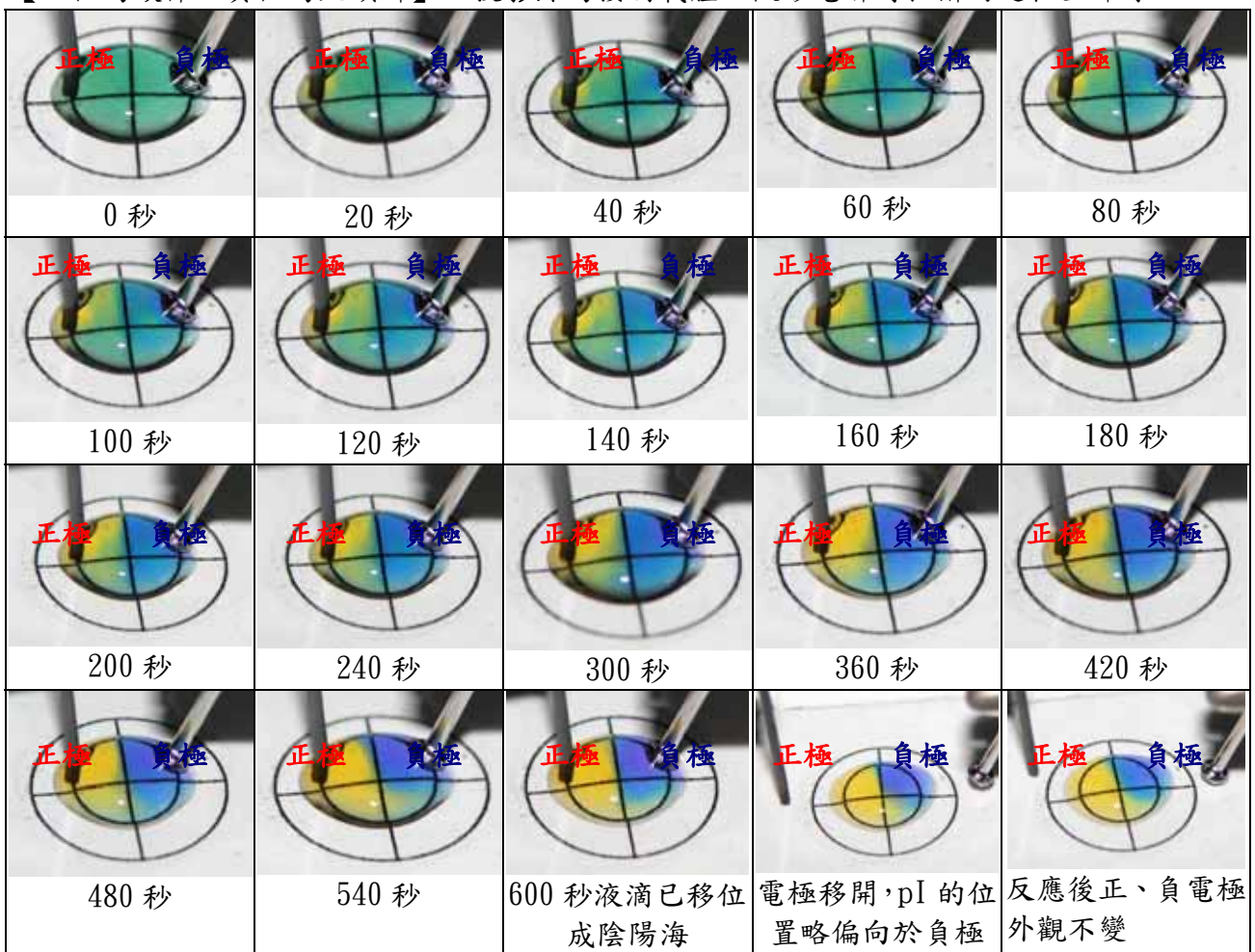
10 秒	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒
100 秒	120 秒	140 秒	160 秒	180 秒
200 秒	240 秒	300 秒	360 秒正極開始有一些膠狀物生成	420 秒
480 秒	540 秒中間區有一些紅色物質生成	600 秒可看見膠狀物接近中間區	反應後正、負電極外觀看不出明顯的差異變化	

【正、負極為鉛筆心】以投影片為接觸載體，微形電解每 20~60 秒時拍攝的過程全都錄

0 秒	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒
100 秒	120 秒	140 秒	160 秒	180 秒



【正極為碳棒、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解時拍攝的過程全都錄

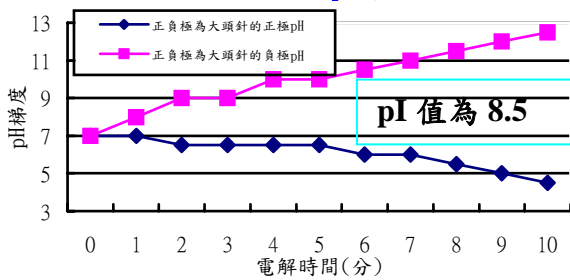


【結果歸納】

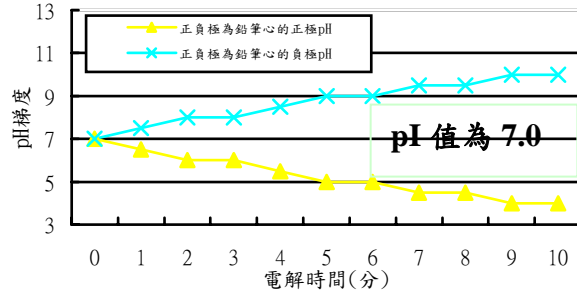
1. 以不同電極電解一滴廣用指示劑的 pH 梯度大約變化(反覆多次對照廣用試紙標準變色表)

電解時間(分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pI
正負極為大頭針的正極 pH	7.0	7.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	8.5
正負極為大頭針的負極 pH	7.0	8.0	9.0	9.0	10.0	10.0	10.5	11.0	11.5	12.0	12.5	
正負極為鉛筆心的正極 pH	7.0	6.5	6.0	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.5	4.0	4.0	7.0
正負極為鉛筆心的負極 pH	7.0	7.5	8.0	8.0	8.5	9.0	9.0	9.5	9.5	10.0	10.0	
正鉛筆心負大頭針正極 pH	7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.5	6.5
正鉛筆心負大頭針負極 pH	7.0	7.5	8.0	8.0	8.0	8.0	8.5	9.0	9.0	9.5	9.5	

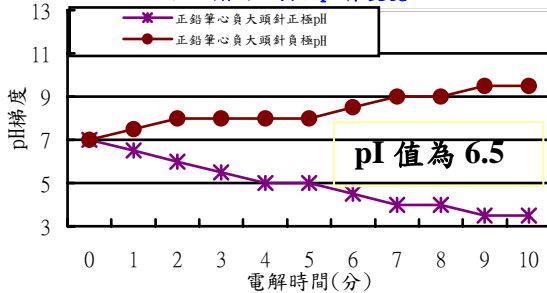
圖十一、正負極皆大頭針電極電解廣用指示劑的正負極pH梯度變化



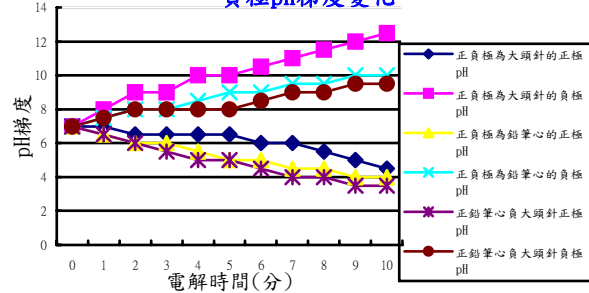
圖十二、正負極皆鉛筆心電極電解廣用指示劑的正負極pH梯度變化



圖十三、正鉛筆心負大頭針電極電解廣用指示劑的正負極pH梯度變化

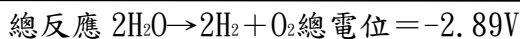
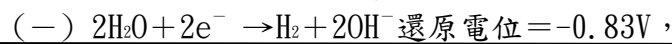


圖十四、以不同電極電解廣用指示劑的正負極pH梯度變化



- 由實際電解所拍攝的相片組及 pH 梯度分析圖可知：電解反應速率大小依序為正負極均為大頭針的電極 > 正極鉛筆心而負極為大頭針的電極 > 正負極均為鉛筆心的電極，也就是說相同的時間內，電解後正負電極 Δ pH 的變化以正負極均為大頭針的電極最為明顯。
- 由電解所拍攝的相片中可實際觀察到：特別設計的雙圓十字記號投影片可明顯比較出，若以正負極均為大頭針的電極其最後發生等電位點 pI 的位置略偏向於正極且 pH 值 > 7；正負極均為鉛筆心的電極其最後發生等電位點 pI 的位置傾向於正負極的中間且 pH 值約 = 7；正極為鉛筆心、負極為大頭針的電極其最後發生等電位點 pI 的位置偏向於負極且 pH 值 < 7。
- 電解中性的廣用指示劑反應就類似電解中性的水一樣，正極變酸 pH < 7 而負極變鹼 pH > 7，其反應為：

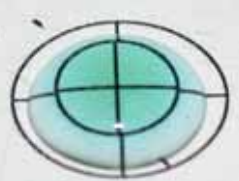
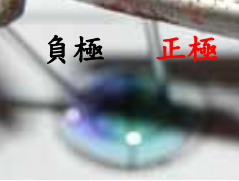
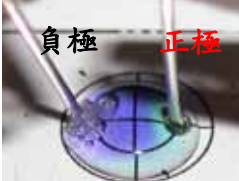
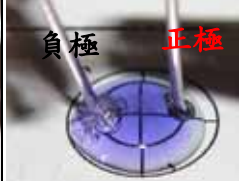
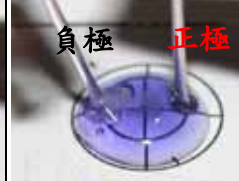
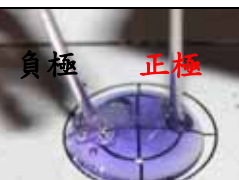
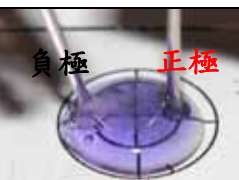
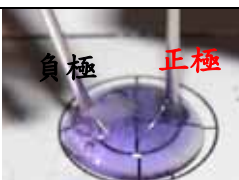
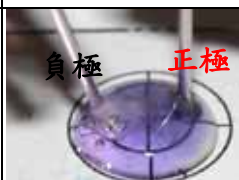
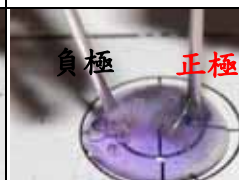
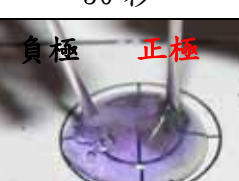
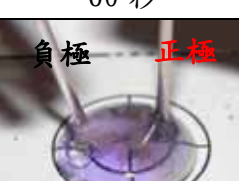
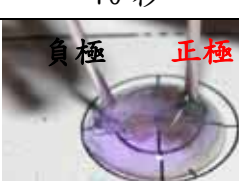
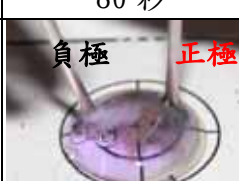
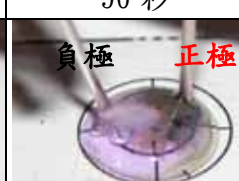
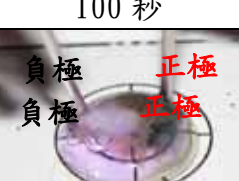
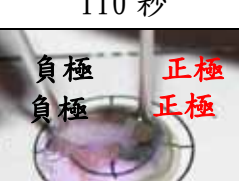
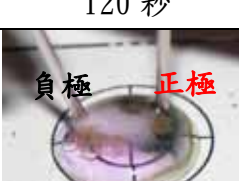
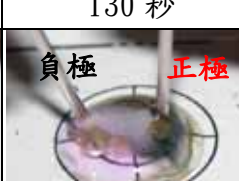

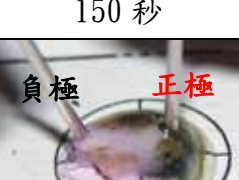

$$(+) 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \quad \text{氧化電位} = -1.23\text{V}$$



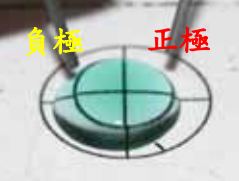
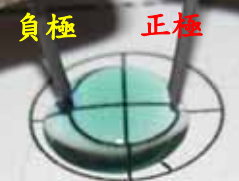
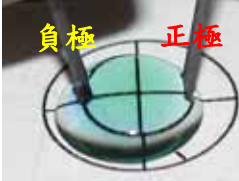
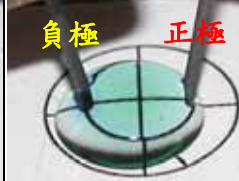
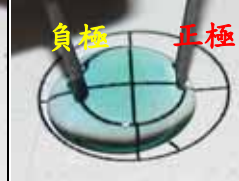
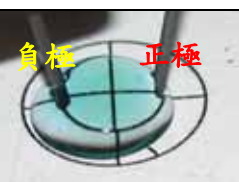
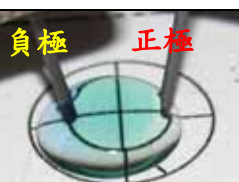
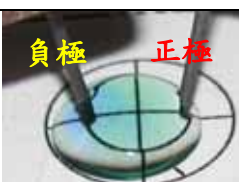
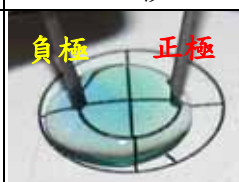
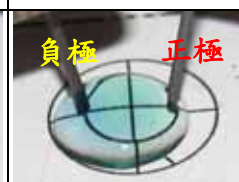
不過若以大頭針當正極，則鍍上鎳的鐵電極會發生氧化反應，其氧化電位較水生成氧的高：
 $(+) \text{Ni} \rightarrow \text{Ni}^{2+}(\text{紅色}) + 2\text{e}^-$ 電位 = +0.23V 或 $(+) \text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{綠色}) + 2\text{e}^-$ 電位 = +0.41V，如此一來金屬優先被氧化，所以正極釋放氫離子變酸的機會減小，負極釋放氫氧根離子變鹼的機會不變，難怪正極以大頭針為電極的整體的等電位值偏向鹼性，而且在此種 pH 值的環境下，接近中間區的地方金屬離子又會與負極釋放出的氫氧根離子形成膠狀物的沉澱物。

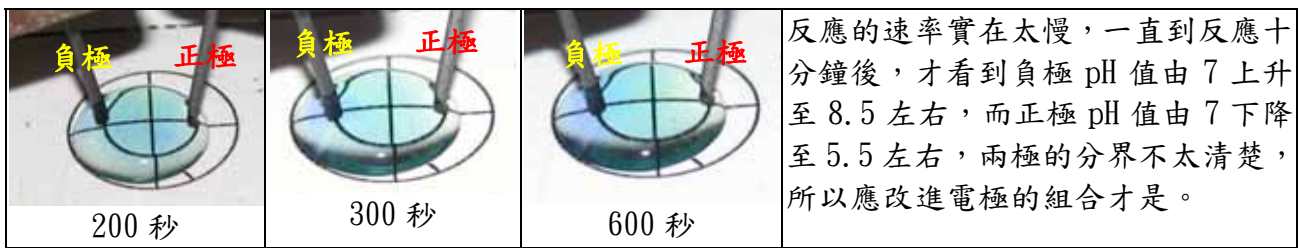
實驗十一、一滴 1M 食鹽水加一滴廣用指示劑的電解實驗

【正、負電極均為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 10 秒時拍攝的過程全都錄

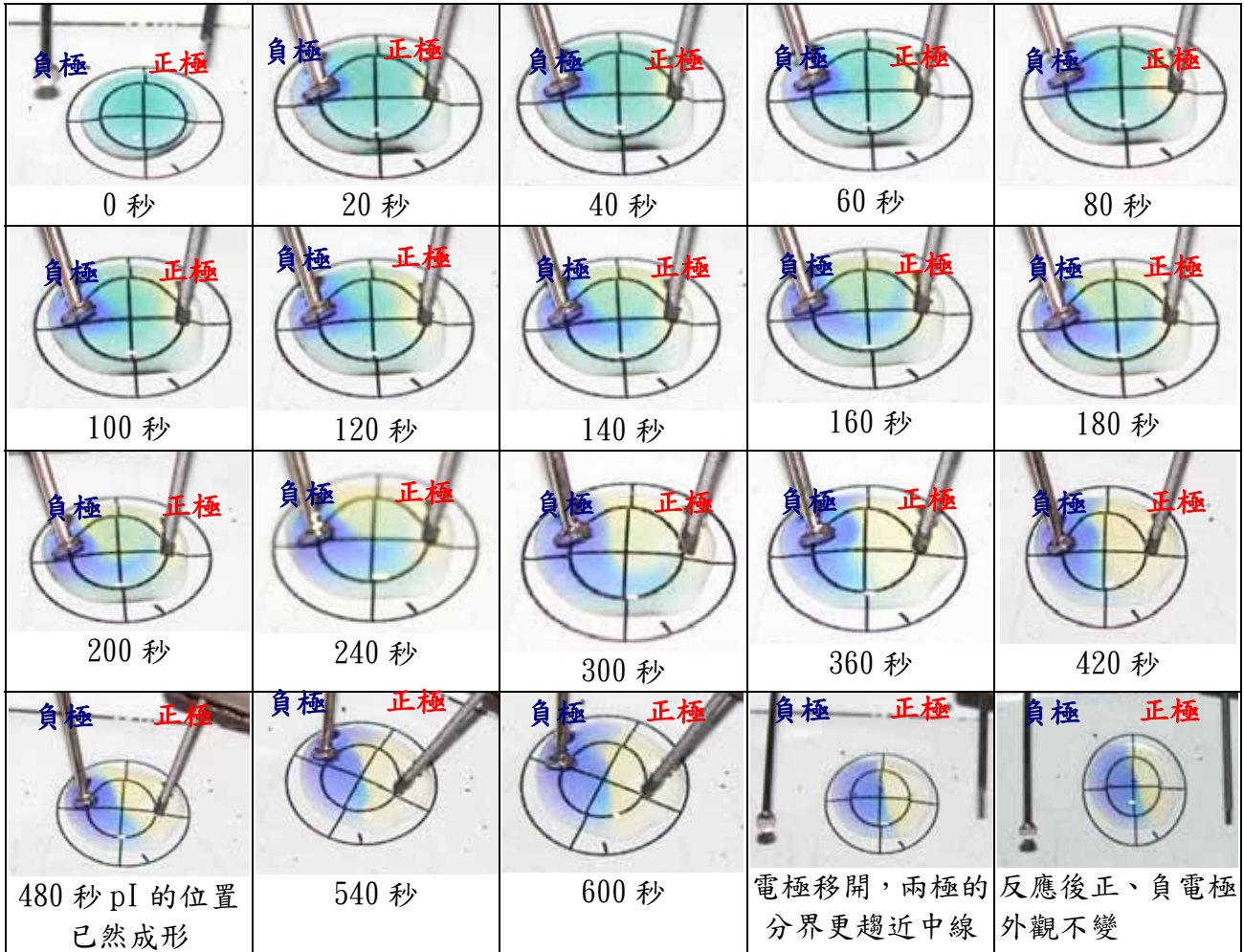
				
0 秒	10 秒	20 秒	30 秒	40 秒
				
50 秒	60 秒	70 秒	80 秒	90 秒
				
100 秒	110 秒	120 秒	130 秒	140 秒
				
150 秒	160 秒	170 秒	180 秒	190 秒
		若以大頭針當正極，則鍍上鎳的鐵電極會與Cl ⁻ 發生競爭性的氧化反應，若此金屬優先被氧化，此時負極釋放氫氧根離子與金屬離子結合形成膠狀的沉澱物，後期氯離子被氧化產生氯而氯又溶於水形成酸及次氯酸而將色素漂白，所以後期的顏色有變淡的情形出現。		
200 秒	反應後正、負電極			

【正、負電極均為鉛筆心】以投影片為接觸載體，微形電解每 20 秒時拍攝的過程全都錄

				
0 秒	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒
				
100 秒	120 秒	140 秒	160 秒	180 秒



【正極為鉛筆心、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 20 秒時拍攝過程全都錄

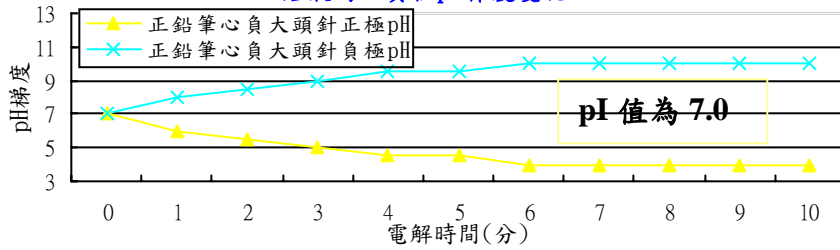


【結果歸納】

1. 以不同電極電解一滴廣用指示劑的 pH 梯度大約變化(反覆多次對照廣用試紙標準變色表)

電解時間(分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pI
正負極為大頭針的正極 pH	7.0	8.0	因產生沉澱物，無法比較出正負極的 pH 及可能的 pI 值									
正負極為大頭針的負極 pH	7.0	9.0										
正負極為鉛筆心的正極 pH	7.0	反應太慢，兩極的分界不太清楚，所以應改進電極的組合才是。										5.5
正負極為鉛筆心的負極 pH	7.0											8.5
正鉛筆心負大頭針正極 pH	7.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	7.0
正鉛筆心負大頭針負極 pH	7.0	8.0	8.5	9.0	9.5	9.5	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	

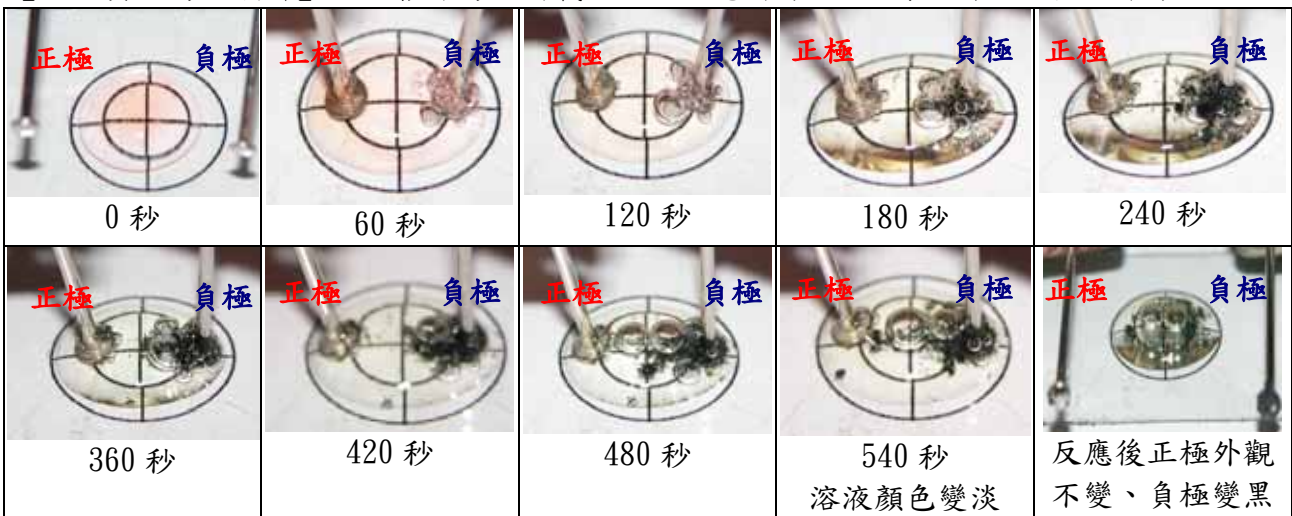
圖十五、正極鉛筆心、負極大頭針當電極電解1M氯化鈉水溶液的正負極pH梯度變化



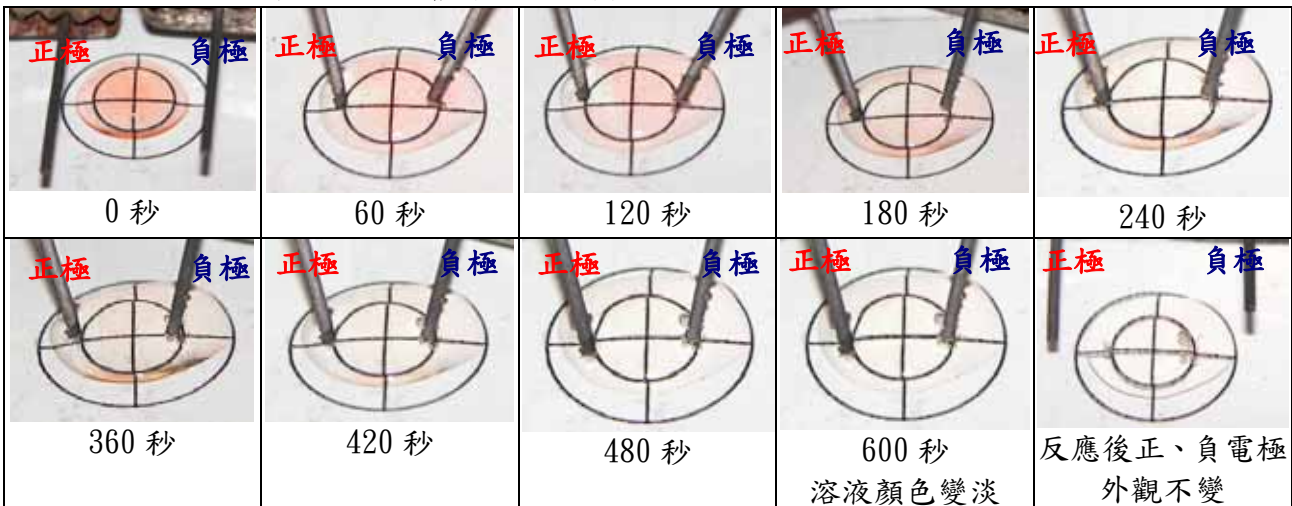
- 電解中性的氯化鈉水溶液反應與電解中性的水略有不同，總反應為 $2\text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} \xrightarrow{\text{電解}} \text{Cl}_2 + \text{H}_2 + 2\text{NaOH}$ ，若正極為惰性電極或鉛筆心電極則所產生的氯氣能溶於水中而使酸性增加，故正極變更酸 $\text{pH} < 7$ ，(+)極 $2\text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^-$ 而 $\text{Cl}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCl}(\text{酸性}) + \text{HClO}$ ，若以大頭針(鍍上鎳的鐵)當正極，則此金屬會與 Cl^- 發生競爭性的氧化反應，若此金屬優先被氧化，此時負極釋放的氫氧根離子與金屬離子就可結合成膠狀的沉澱物。(−)極 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \uparrow + 2\text{OH}^-$ 因此正極不宜用氧化電位高的金屬當電極以避免干擾反應，例如正極氧化的 Fe^{2+} + 負極產生的 $2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$ 等膠狀物。
- 以正極鉛筆心、負極大頭針當電極可從電解6分鐘後開始逐漸形成壁壘分明的陰陽海，而等電位點 pI 位置傾向於正負極的中間且 pH 值 = 7 左右，真是令人欣喜的組合及結果啊！

實驗十二、一滴 1M 鹽酸水溶液加一滴廣用指示劑的電解實驗

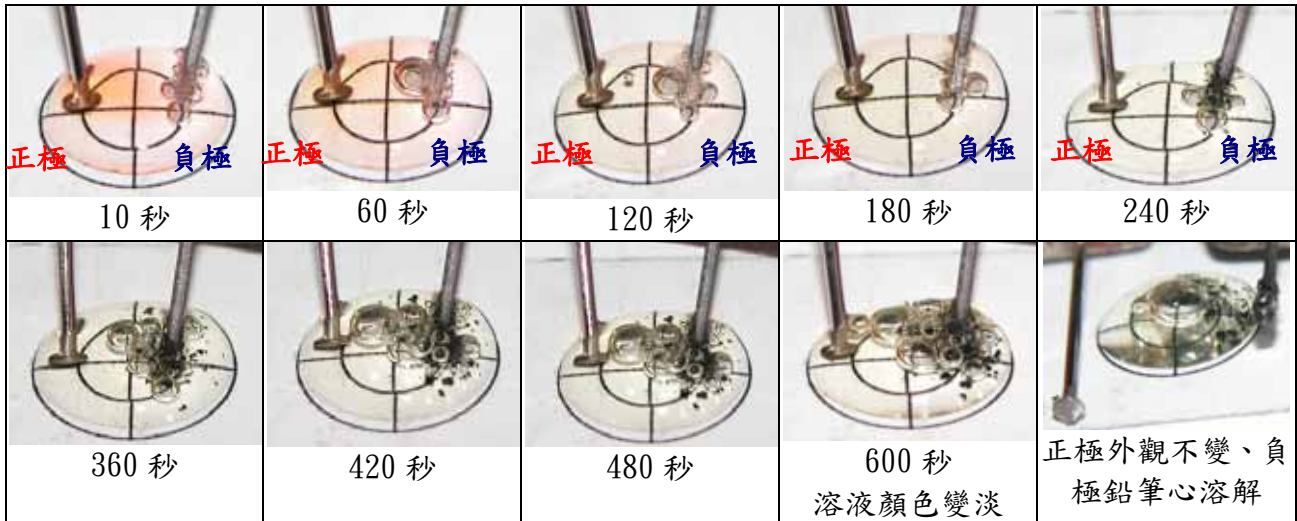
【正、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 60 秒時拍攝的過程全都錄



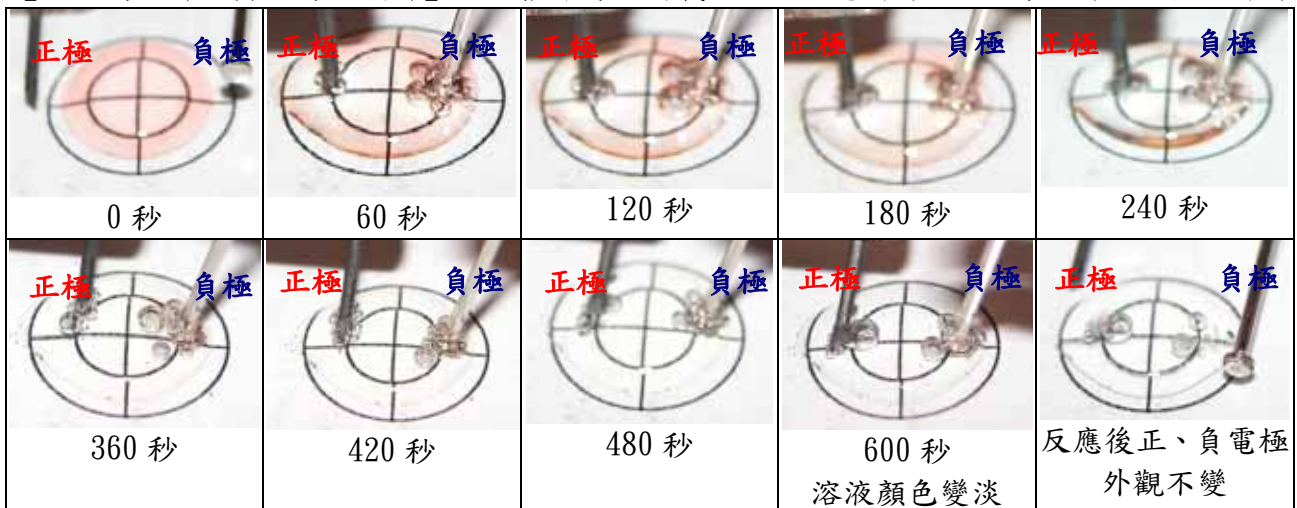
【正、負極均為鉛筆心】以投影片為接觸載體，微形電解每 60 秒時拍攝的過程全都錄



【正極為大頭針、負極為碳棒】以投影片為接觸載體，微形電解每 60 秒時拍攝的過程全都錄

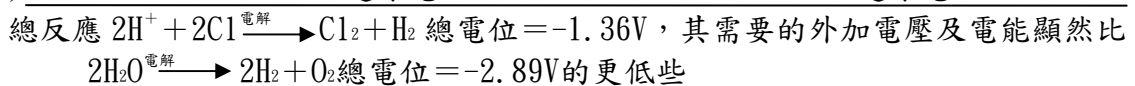
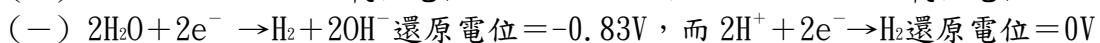
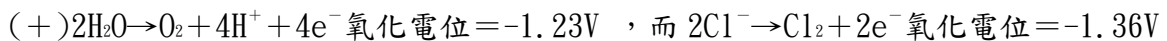


【正極為碳棒、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 60 秒時拍攝的過程全都錄



【結果歸納】

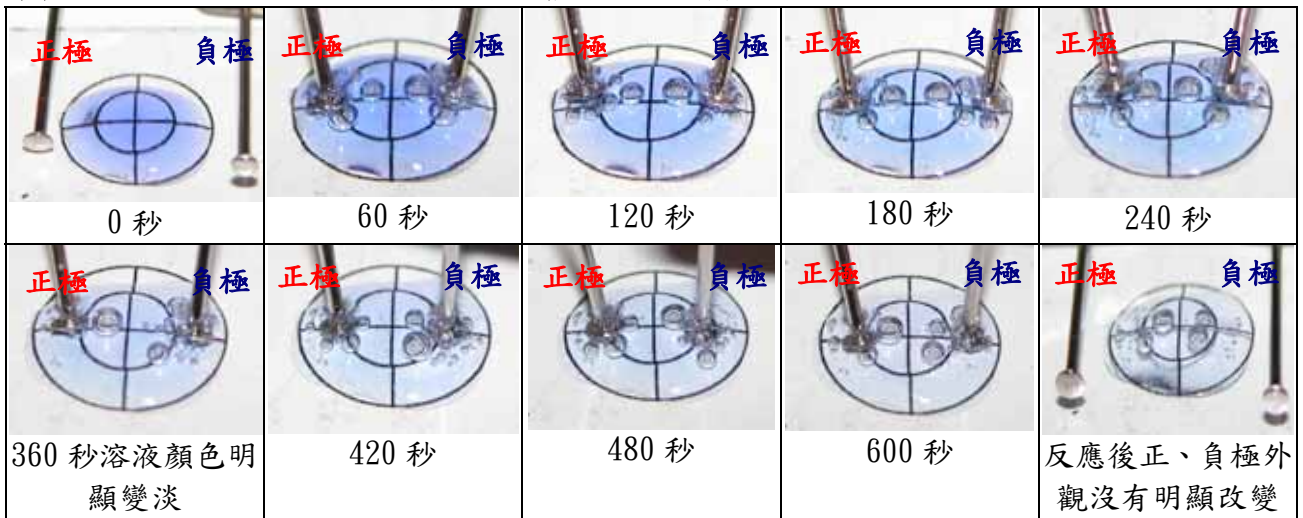
1. 不管正負極電極用什麼電極，1M的強酸性鹽酸電解時，其pI值顯然仍為pH不大的酸性而無法產生壁壘分明的陰陽海，不止如此，最後溶液的顏色還變淡，所以，我想濃度太高的鹽酸所扮演的角色顯然不只是幫助水導電的物質而已，其強酸中的 H^+ 離子及 Cl^- 離子都傾向於參與電解的氧化還原反應



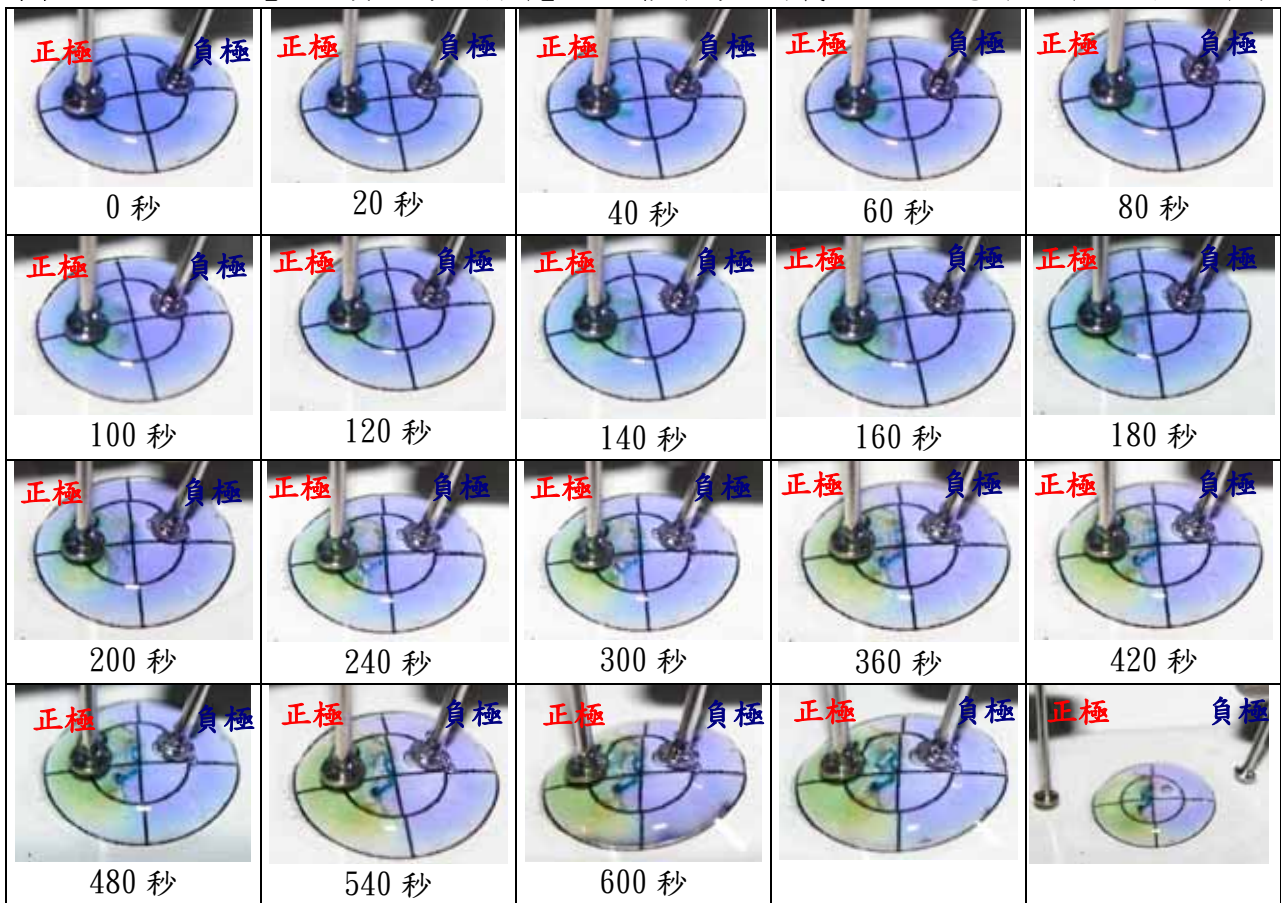
2. 正極若為惰性電極或鉛筆心電極則 Cl^- 離子氧化所產生的氯氣能溶於水中而使酸性增加， $Cl_2 + H_2O \rightarrow HCl(\text{酸性}) + HClO$ ，其中HCl繼續使正極變更酸 $pH < 7$ ，而HClO的漂白作用似乎發揮了作用而使整體溶液顏色變淡！然而我原以為若以大頭針(鍍上鎳的鐵)當正極，則此金屬會與 Cl^- 發生競爭性的氧化反應而優先被氧化，可是仔細觀察電極的變化不但正極沒明顯的改變，反倒是負極的電極變成黑黑髒髒的膠狀沉澱物。仔細再次查證，結果仍是如此，而且可看出負極產生的氣泡數量多於正極的，這下才總算釋然！
3. 由此實驗可知，電解要使廣用試劑產生壁壘分明的顏色變化而能比較出其pI值，被電解的反應物需pH不能太小，那是不是也不能太大，我想藉由下一個實驗再來證實！

實驗十三、一滴 1M 及 0.00001M 氫氧化鈉水溶液加一滴廣用指示劑的電解實驗

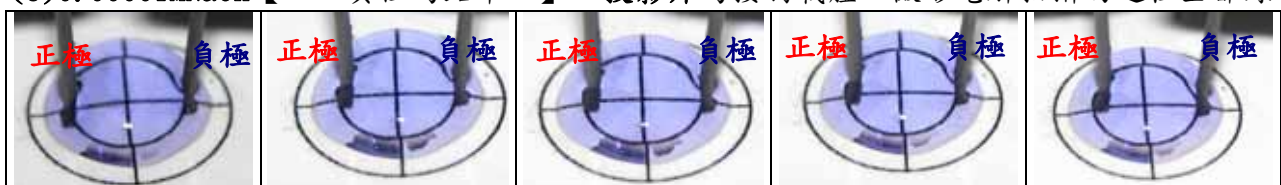
(1) 1M NaOH 【正、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解拍攝過程全都錄

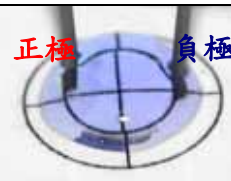
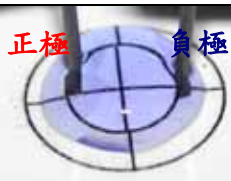
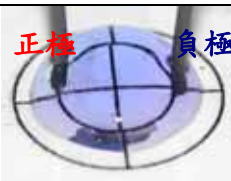
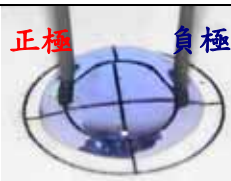
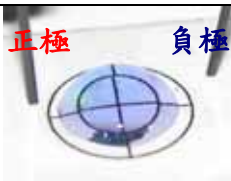


(2) 0.00001M NaOH 【正、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解拍攝的過程全都錄

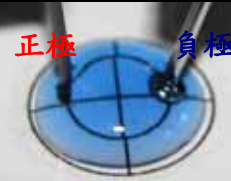
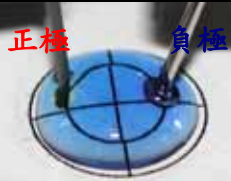
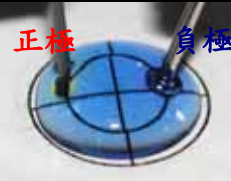
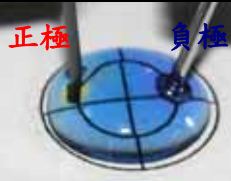
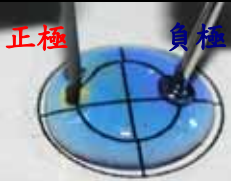
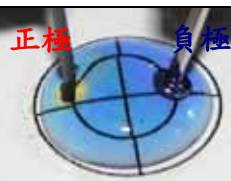
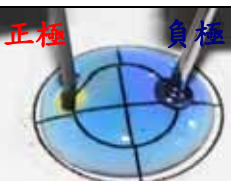
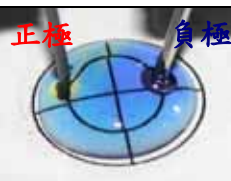
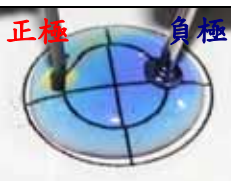
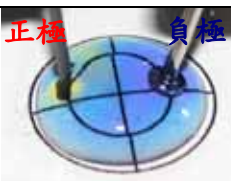
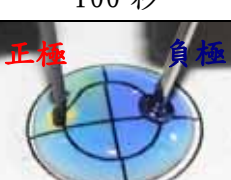
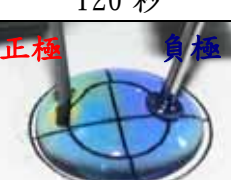
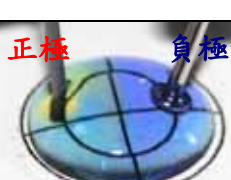
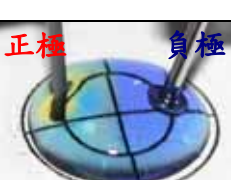
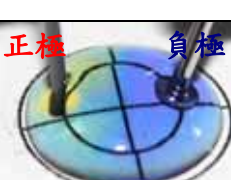
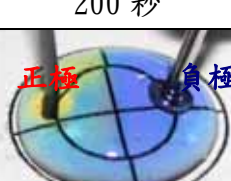
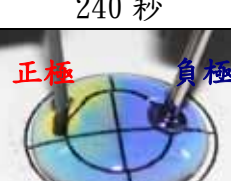
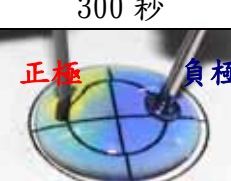
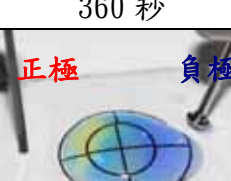



(3) 0.00001M NaOH 【正、負極為鉛筆心】以投影片為接觸載體，微形電解拍攝的過程全都錄



0 秒	20 秒	40 秒	60 秒	120 秒
				
240 秒	360 秒	480 秒	600 秒	正極帶有些綠色， 顯示反應太慢了

(4)0.00001MNaOH【正極為鉛筆心、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 20~60 秒時拍攝的過程全都錄

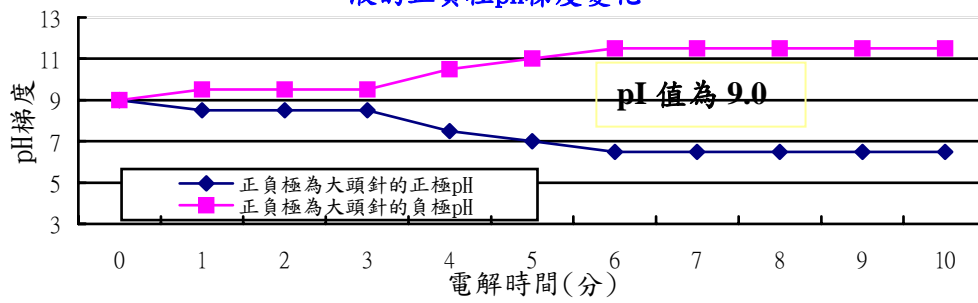
				
0 秒	20 秒	40 秒	60 秒	80 秒
				
100 秒	120 秒	140 秒	160 秒	180 秒
				
200 秒	240 秒	300 秒	360 秒	420 秒
				
480 秒	540 秒	600 秒分層仍然不 明顯	最後 pH 的位仍偏 向於正極	反應後正、負極外 觀變化不明顯

【結果歸納】

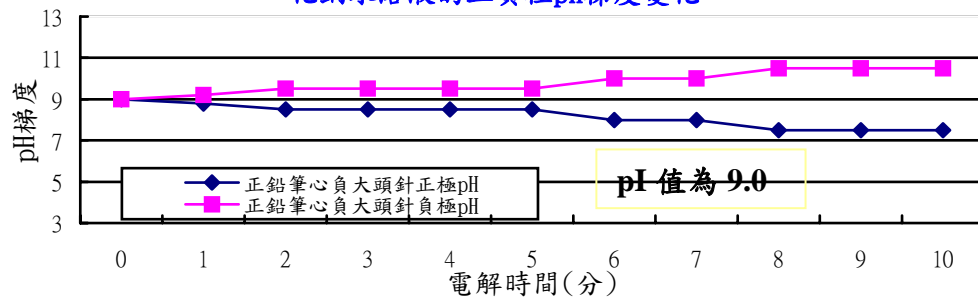
1. 以不同電極所電解一滴廣用指示劑的 pH 梯度大約變化
(反覆多次對照廣用試紙標準變色表)

電解時間(分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pI
正負極為大頭針的正極 pH	9.0	8.5	8.5	8.5	7.5	7.0	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	9.0
正負極為大頭針的負極 pH	9.0	9.5	9.5	9.5	10.5	11.0	11.5	11.5	11.5	11.5	11.5	
正負極為鉛筆心的正極 pH	9.0	反應太慢，兩極的分界不太清楚，所以應改進電極的組合才是。										
正負極為鉛筆心的負極 pH	9.0	反應太慢，兩極的分界不太清楚，所以應改進電極的組合才是。										
正鉛筆心負大頭針正極 pH	9.0	8.8	8.5	8.5	8.5	8.5	8.0	8.0	7.5	7.5	7.5	9.0
正鉛筆心負大頭針負極 pH	9.0	9.2	9.5	9.5	9.5	9.5	10.0	10.0	10.5	10.5	10.5	

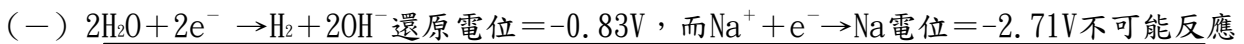
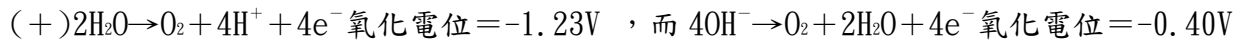
圖十六、正、負極大頭針當電極電解0.00001M氫氧化鈉水溶液的正負極pH梯度變化



圖十七、正極鉛筆心、負極大頭針當電極電解0.00001M氫氧化鈉水溶液的正負極pH梯度變化



2. 不管用什麼正負極電極，1M 的強鹼性氫氧化鈉電解時，其 pI 值顯然仍為 pH 不小的鹼性而無法產生壁壘分明的陰陽海，不止如此，最後溶液的顏色還變淡。所以，我想廣用指示劑在強鹼下似乎也會被氧化而褪色，尤其看到在兩極處所生成的氣泡速率不小，是否就像一般圖畫紙受日曬而氧化的原因呢？因此，我決定將氫氧化鈉的濃度稀釋到約 pH=9 左右的 0.00001M 濃度進行這項實驗，結果顯示兩極可形成陰陽海，而此時氫氧化鈉所扮演的角色雖只是幫助水導電的物質，但其電解的正極氧化反應因為電位的關係而應與電解水的電位略有不同。



總反應 $2H_2O \xrightarrow{\text{電解}} 2H_2 + O_2$ 總電位 = -2.06V(鹼性下)，其需要的外加電壓及電能顯然比純中性的水溶液電解時低些。

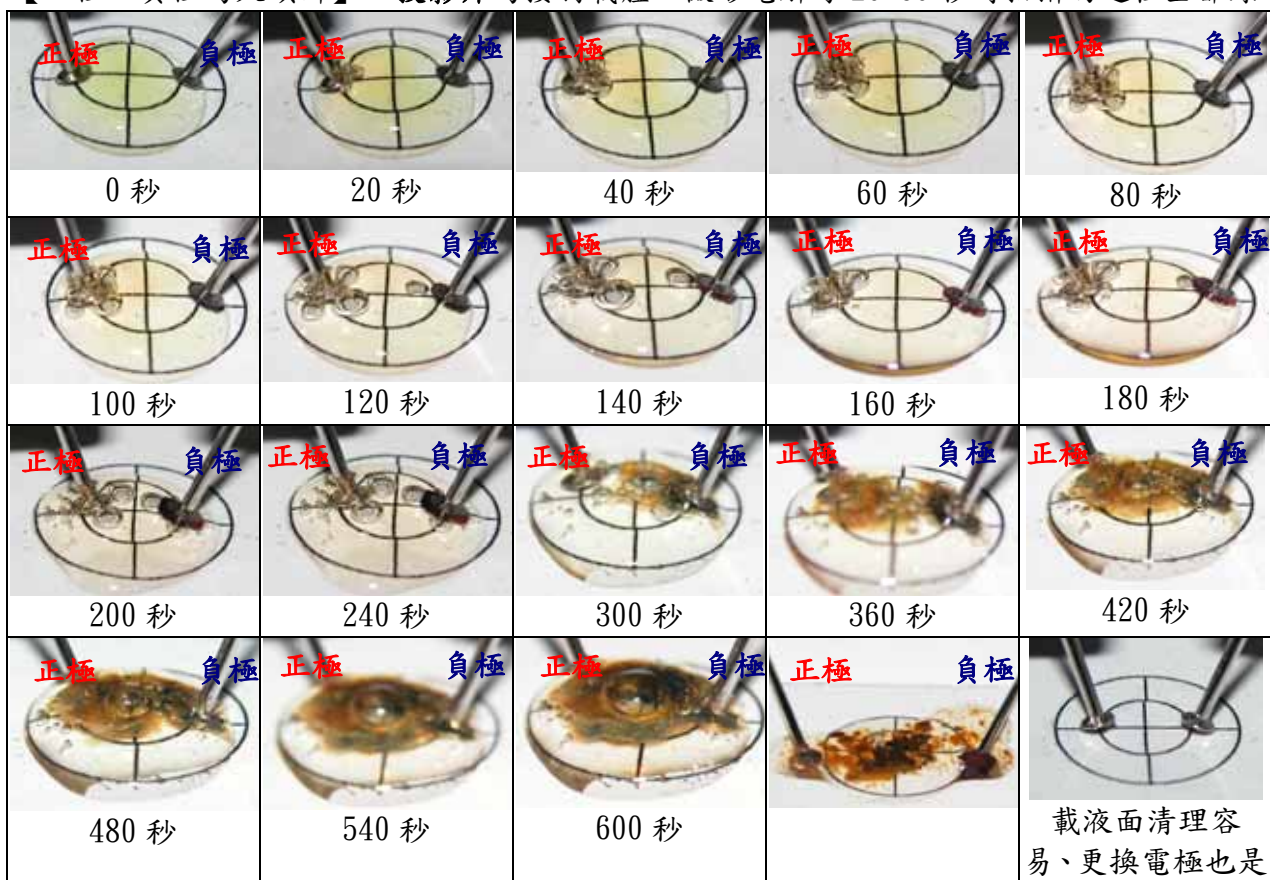
3. 由(1) 1MNaOH 的電解可觀察到正、負極均為大頭針電極，可是反應後兩電極外觀上並沒有什麼改變，而由(2) 0.00001MNaOH 的電解可發現，因正極處變為弱酸性環境而略使金屬被氧化成金屬離子，此時再與負極反應所產生的氫氧根離子恰可反應生成膠態的沉澱物質，由此可見金屬電極的耐鹼性比耐酸性好！

4. 由此實驗可知，在電解反應中，要使廣用試劑產生壁壘分明的顏色變化而能比較出其 pI 值，被電解的反應物需 pH 不能太大，也不能太小。

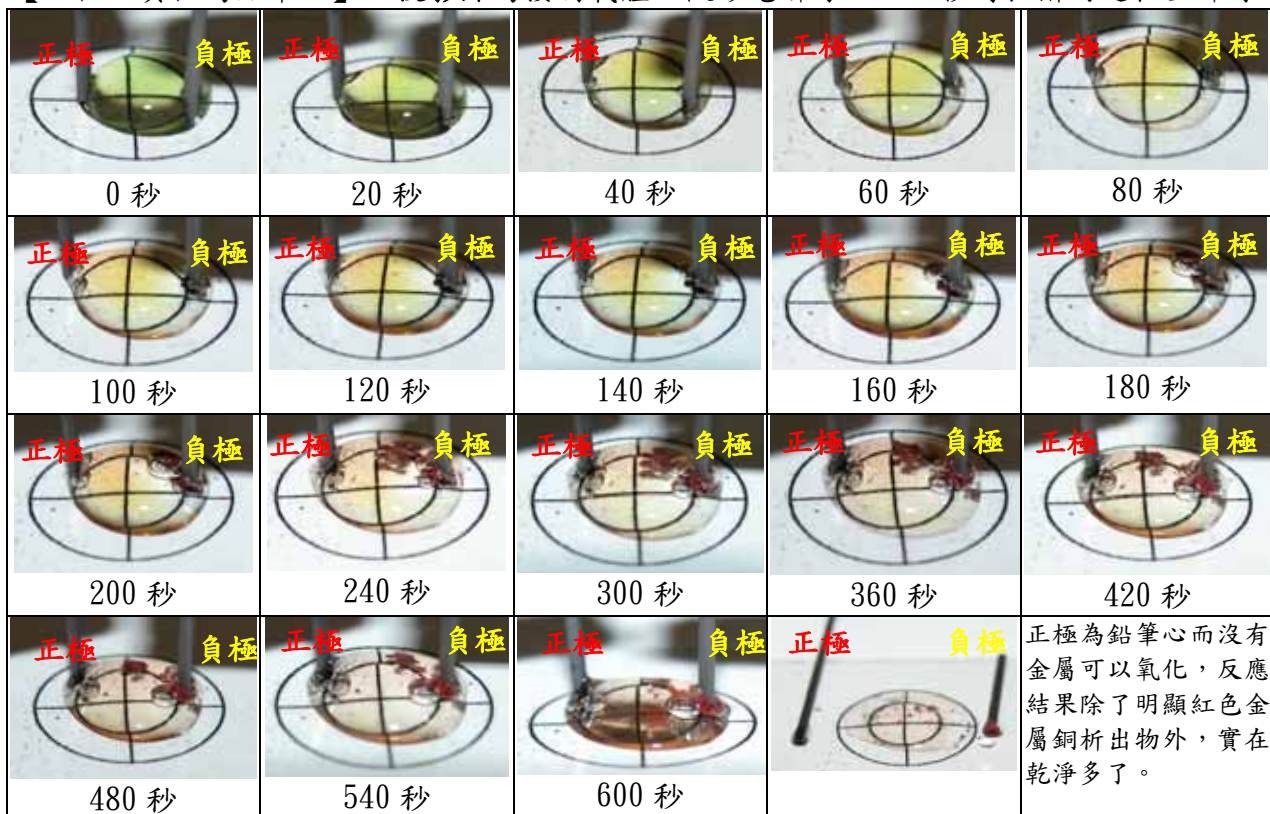
【目的五、微觀硫酸銅溶液、鹵化鉀溶液及碘化鉀溶液加廣用指示劑的陰陽海比較實驗】

實驗十四、一滴 0.1M 硫酸銅水溶液加一滴廣用指示劑的電解實驗

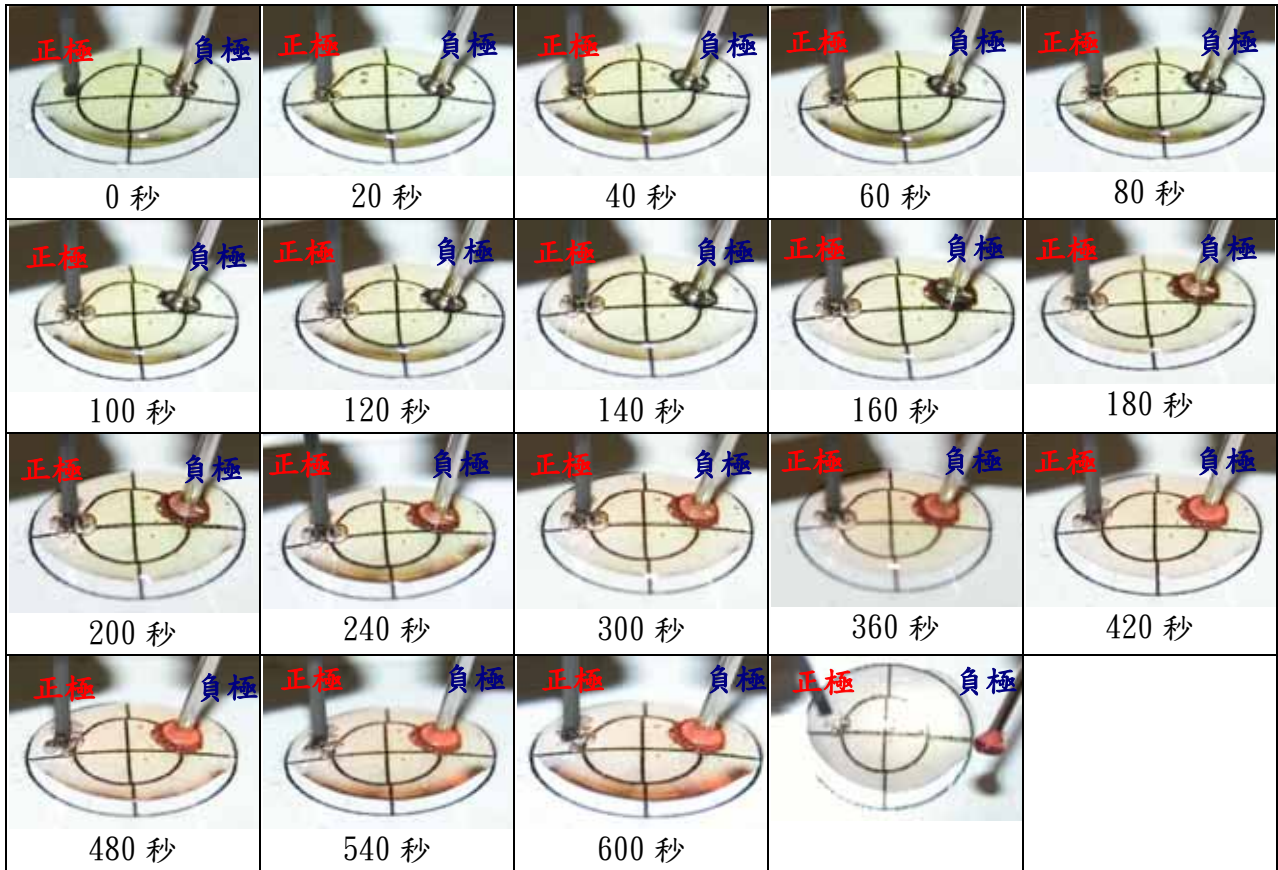
【正極、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 20~60 秒時拍攝的過程全都錄



【正極、負極為鉛筆心】以投影片為接觸載體，微形電解每 20~60 秒時拍攝的過程全都錄

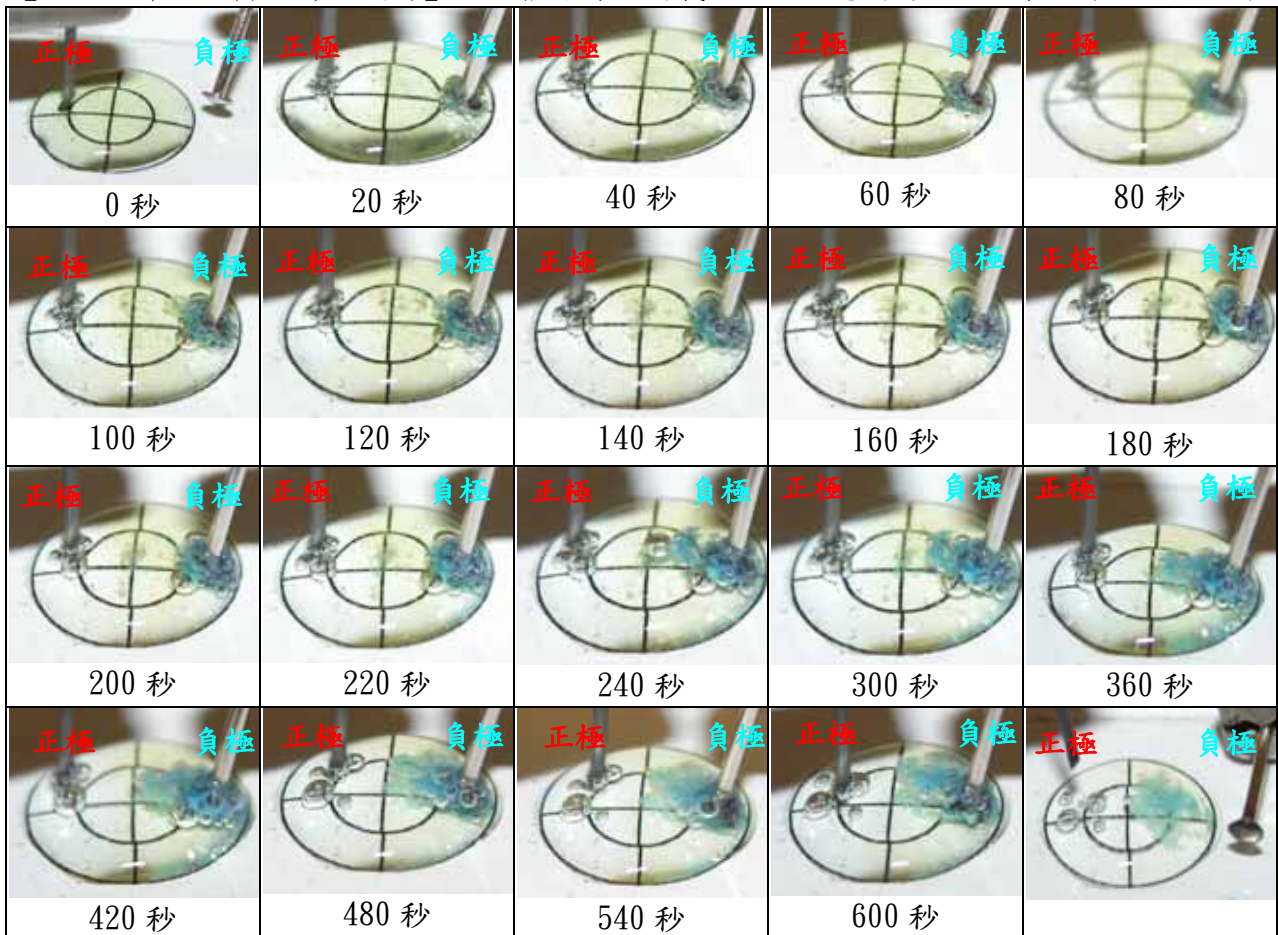


【正極鉛筆心、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解時拍攝的過程全都錄



實驗十五、一滴 1M 氯化鈉加一滴廣用指示劑後，再加一滴 0.1M 硫酸銅水溶液的電解實驗

【正極鉛筆心、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 20 秒時拍攝的過程全都錄



【結果歸納】

1. 正負極均大頭針電極電解 0.1M 的硫酸銅，由上述圖示的分析結果如下：

時間	分析結果
0 秒	0.1M 的硫酸銅藍色太淡，被廣用指示劑的綠色蓋掉，由顏色可知，未電解前的 0.1M 硫酸銅溶液呈弱酸性(綠帶點黃，pH 約 5~6 間)
20 秒	正極產生氣泡且顏色變黃，顯示 pH 變小
60 秒	正極產生氣泡更多、顏色變黃且帶點橙色，顯示 pH 變更小、酸性再增加
2 分鐘	負極銅析出物似乎已經完成而開始產生氣泡
5 分鐘	溶液顏色變淡、負極氣泡量增多且中間略靠向負極開始有髒髒的膠態物質出現
6 分鐘	負極產生較多的氣泡而將此黃褐帶點紅色的膠態物質推向正極，
7 分鐘	有更多黃褐色的膠態物質出現，已分不清偏向正、負那一極
7~10 分鐘	膠態物似乎提供一個可使氣泡長更大的空間，這些膠態物不但呈黃褐帶點紅、還有綠色物生成。
電解過程	20~100 秒略可區別正極顏色較紅而負極由微綠帶黃到微黃，之後就無法明顯分出兩極顏色，溶液顏色還褪色變淡至接近無色，而且最後觀察正極的電極似乎沒什麼改變而負極則有明顯的變黑。

2. 正負極均鉛筆心電極電解 0.1M 的硫酸銅，由上述圖示的分析結果如下：

時間	分析結果
0 秒	如前
20 秒	正極產生氣泡且顏色變黃，顯示 pH 變小
60 秒	正極產生氣泡更多、顏色變黃且帶點橙色，顯示 pH 變更小、酸性再增加
160 秒	負極開始有氣泡生成，顯示與銅離子析出而減少後，與它競爭的氫離子已有機會得到電子而還原
4 分鐘	溶液顏色變淡、正極處顏色變紅，顯示 pH 變更小、酸性再增加，負極產生較多的氣泡而將銅析出物推向中間區
5~10 分鐘	已完全無法分出正負極兩極的顏色，整體呈淺紅色。
電解過程	20~200 秒略可區別正極顏色較紅而負極由微綠帶黃到接近無色，最後觀察負極的紅色析出物非常明顯而正極則沒什麼改變。

3. 正極鉛筆心、負極大頭針電極電解 0.1M 的硫酸銅，由上述圖示的分析結果如下：

時間	分析結果
0 秒	如前
20 秒	正極產生氣泡且顏色變黃，顯示 pH 變小
300 秒	溶液顏色變紅，顯示 pH 變更小、酸性再增加
電解過程	20~120 秒略可區別正極顏色較紅而負極則黃中帶綠，電解後整體溶液略呈粉紅色，溶液中固體物質極少，顯示負極以金屬當電極，金屬離子還原析出的附著情形較鉛筆心非金屬的電極的要好，最後觀察負極的紅色析出物非常明顯而正極則沒什麼改變。

4. 實驗十五模擬在氯化鈉鹽類存在下電解 0.1M 硫酸銅的正負極反應，其圖示說明如下：

時間	分析結果
0 秒	如前
20 秒	正極產生氣泡且顏色變淡，有藍色膠狀物及氣泡在負極處析出，負極處顏色綠中帶黃且比正極處顏色深

100 秒	在中間區開始有懸浮物析出，負極除了有較多的藍色膠狀物析出外，負極生成的氣泡數量似乎比正極更多
2~10 分鐘	正極處顏色變淡直到無色，負極除了藍色膠態物外，也使聚集長大的氣泡有長更大的空間，負極處略帶黃色
電解過程	最後觀察除了負極處的溶液有藍色膠狀物及略帶黃色外，電極上並沒有紅色金屬銅析出物，因為最後正負電極外觀並沒什麼改變

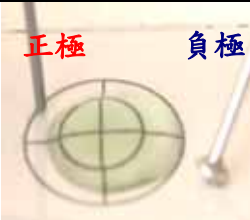
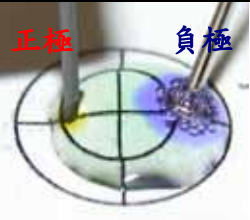
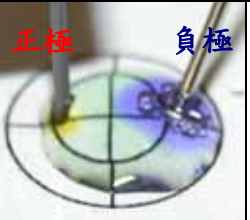
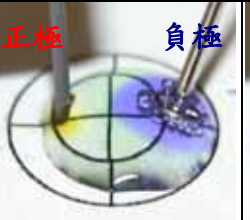
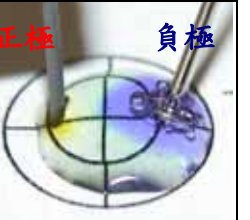
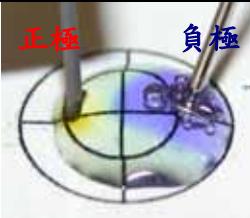
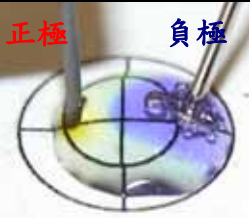
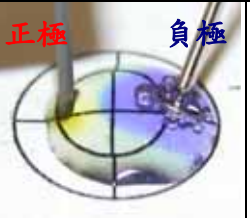
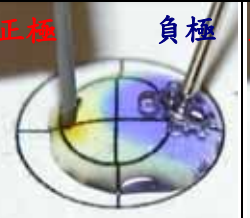
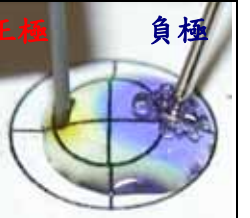
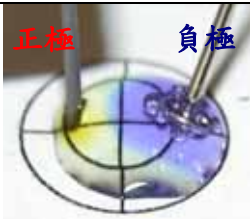
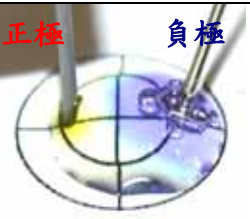
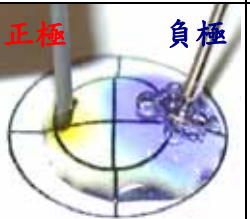
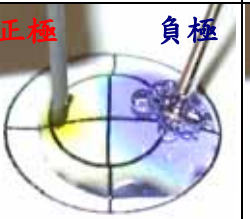
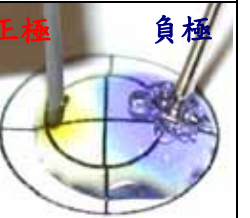
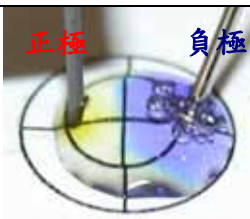
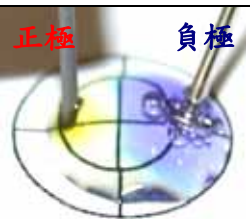
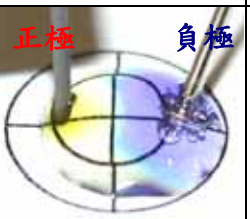
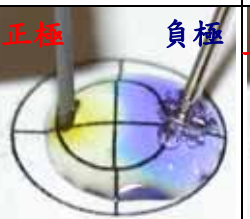
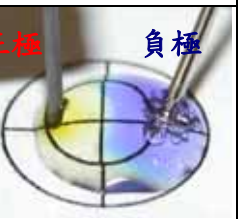
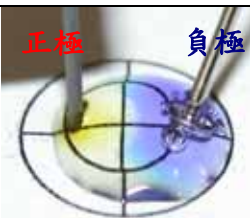
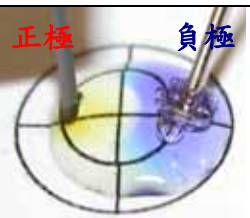
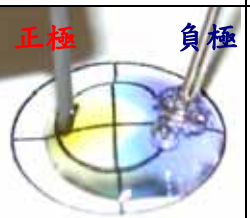
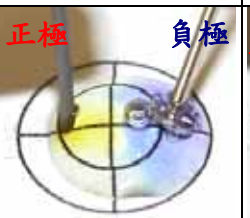
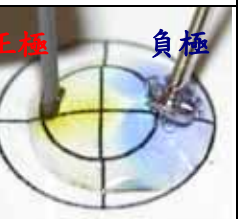
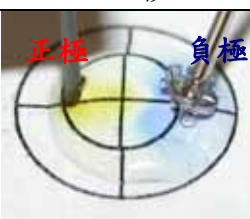
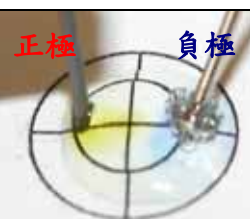
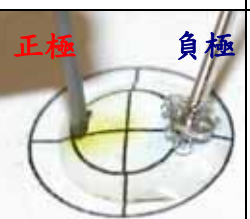
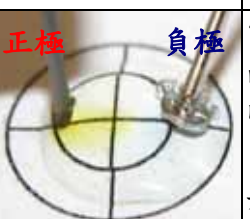
5 綜合上述電解硫酸銅溶液的情形，我將實驗十四歸納結果如下：

- (1) 正極因為是產生氧化反應的電極，所以不宜用金屬電極，改由鉛筆心電極可避免金屬氧化產生離子而干擾反應的觀察。
- (2) 電解過程中可區別正極顏色較負極紅，顯示正極處的 pH 比負極處的低，電解後整體溶液略呈粉紅色，也顯示雖無法看出溶液中的 pH 值，但可以知道電解後整體溶液變得更酸。
- (3) 負極以金屬當電極，金屬離子還原析出的附著情形較鉛筆心非金屬的電極的要好。

6 實驗十五的負極並無紅色金屬銅析出物可知，帶正電的銅離子一開始向負極移動時就被帶負電的氯離子配基(具備孤電子對 lone pair 而能與金屬離子或金屬原子結合形成錯離子之不易游離的極性分子或陰離子)抓住而形成錯離子(以金屬陽離子或金屬原子為中心利用其空價軌域吸引周圍的極性分子或陰離子結合而成更複雜的單元體)，使得原本呈弱酸性溶液中的氫離子得以在負極還原生成氫氣(比較兩者還原電位如下： $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{Cu}$ 還原電位 = 0.34V，應優於 $2\text{H}^{+} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{H}_2$ 電位 = 0V)，至於從負極產生氣泡的情形看來，外加電壓為 3V，所以也有可能負極進行還原反應為 $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^{-} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^{-}$ 還原電位 = -0.83V 而使負極的酸性較正極的弱而略帶黃色。正極顏色消失可能是該處廣用指示劑被高濃度 1M NaCl 反應後剩下 Cl^{-} 氧化 Cl_2 ， $2\text{Cl}^{-} \rightarrow \text{Cl}_2 + 2\text{e}^{-}$ 而氯分子又溶解在水中生成具漂白性的物質 HClO 所致。

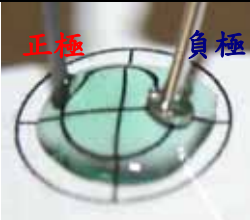
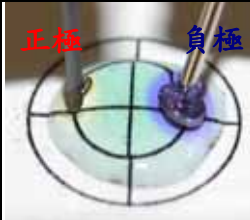
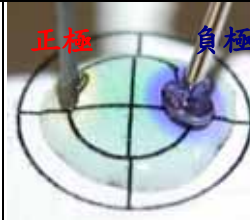
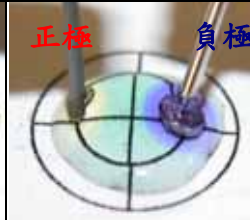
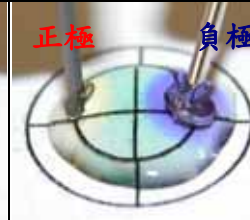
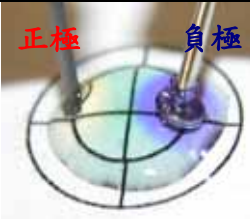
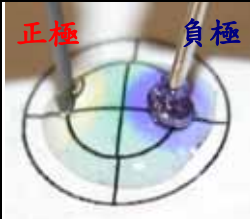
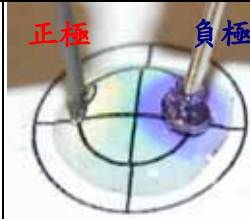
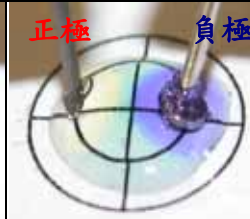
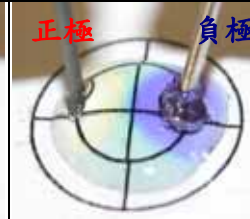
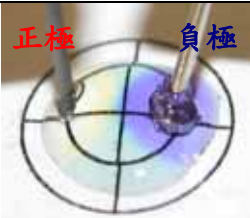
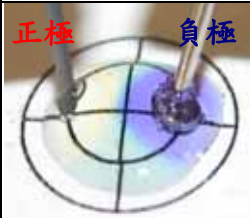
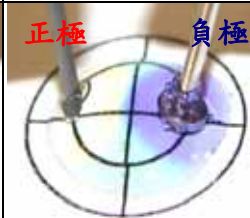
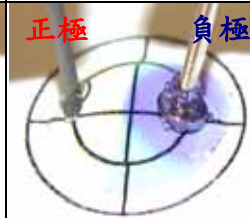
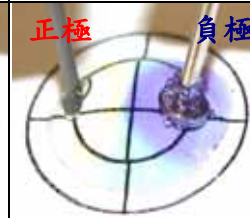
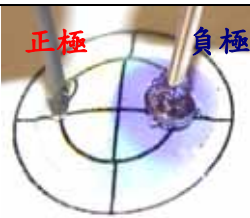
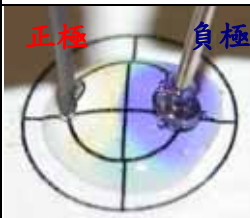
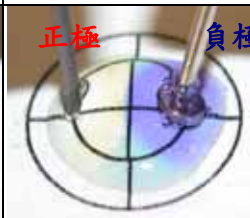
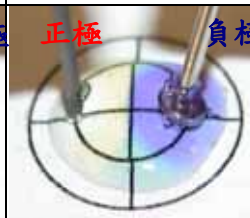
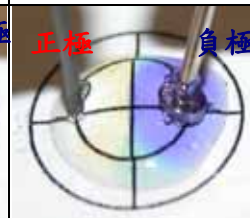
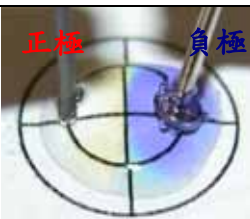
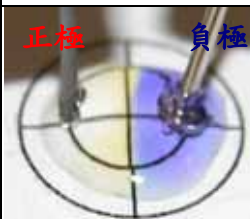
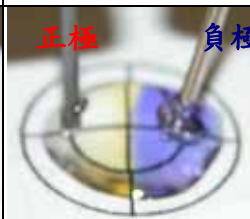
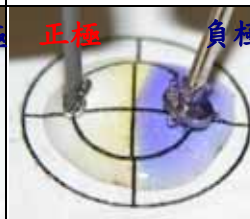
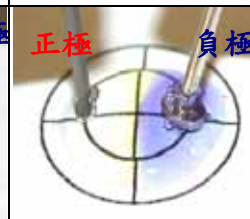
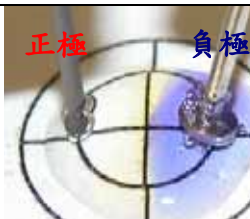
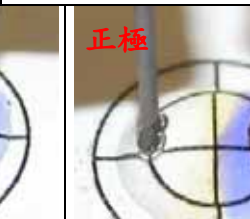
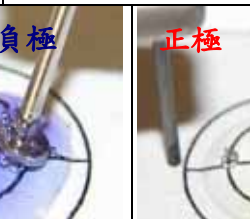
實驗十六、一滴 1M 溴化鉀水溶液加一滴廣用指示劑的電解實驗

【正極鉛筆心、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 10 秒時拍攝的過程全都錄

 正極 負極 0 秒	 正極 負極 10 秒	 正極 負極 20 秒	 正極 負極 30 秒	 正極 負極 40 秒
 正極 負極 50 秒	 正極 負極 60 秒	 正極 負極 70 秒	 正極 負極 80 秒	 正極 負極 90 秒
 正極 負極 100 秒	 正極 負極 110 秒	 正極 負極 120 秒	 正極 負極 130 秒	 正極 負極 140 秒
 正極 負極 150 秒	 正極 負極 160 秒	 正極 負極 170 秒	 正極 負極 180 秒	 正極 負極 190 秒
 正極 負極 200 秒	 正極 負極 220 秒	 正極 負極 240 秒	 正極 負極 300 秒	 正極 負極 360 秒
 正極 負極 420 秒	 正極 負極 480 秒	 正極 負極 540 秒	 正極 負極 600 秒	電解時正負兩極的酸鹼變化非常明顯，唯指示劑顏色到 4 分鐘後期開始有明顯褪色情形出現。

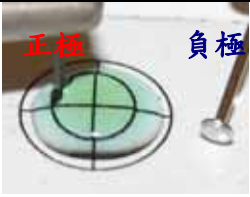
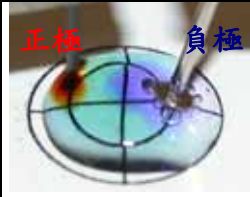
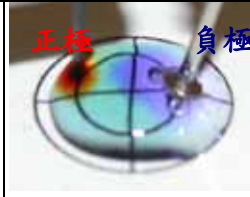
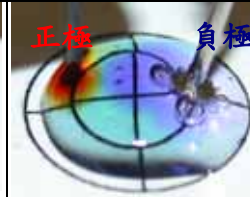
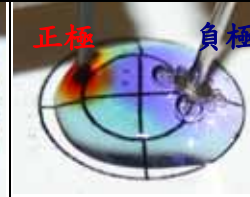
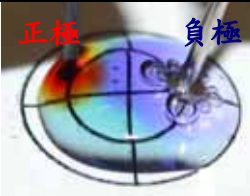
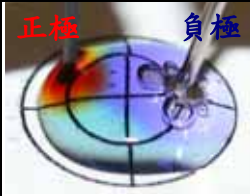
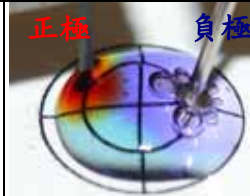
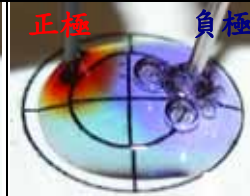
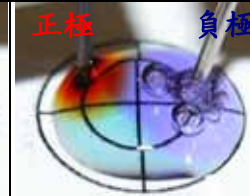
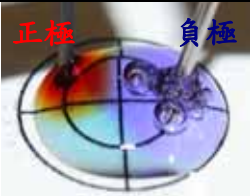
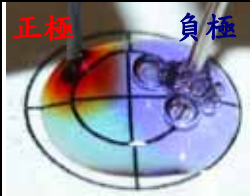
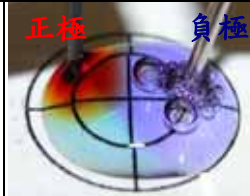
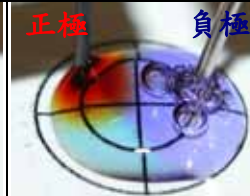
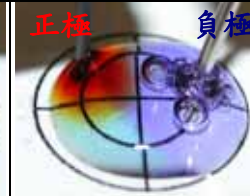
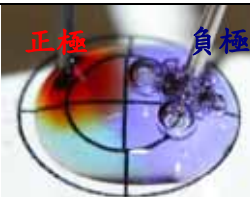
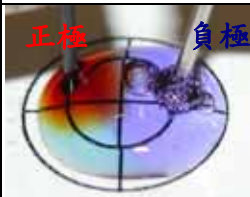
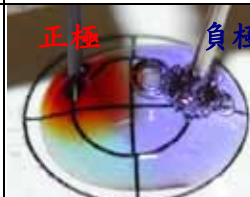
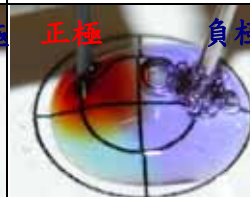
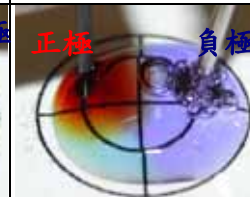
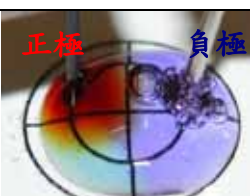
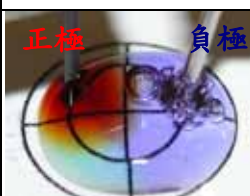
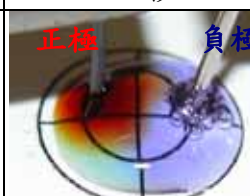
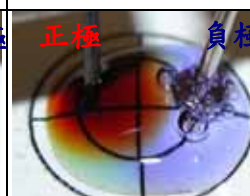

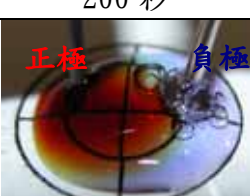
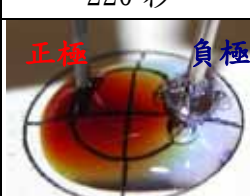
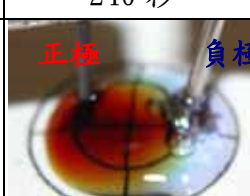
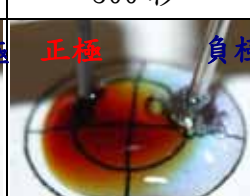
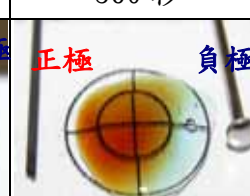
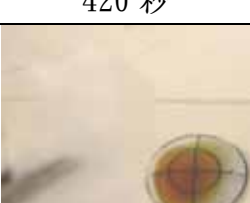




實驗十七、一滴 1M 氯化鉀水溶液加一滴廣用指示劑的電解實驗

【正極鉛筆心、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 10 秒時拍攝的過程全都錄

 正極 負極 0 秒	 正極 負極 10 秒	 正極 負極 20 秒	 正極 負極 30 秒	 正極 負極 40 秒
 正極 負極 50 秒	 正極 負極 60 秒	 正極 負極 70 秒	 正極 負極 80 秒	 正極 負極 90 秒
 正極 負極 100 秒	 正極 負極 110 秒	 正極 負極 120 秒	 正極 負極 130 秒	 正極 負極 140 秒
 正極 負極 150 秒	 正極 負極 160 秒	 正極 負極 170 秒	 正極 負極 180 秒	 正極 負極 200 秒
 正極 負極 240 秒	 正極 負極 300 秒	 正極 負極 360 秒	 正極 負極 420 秒	 正極 負極 480 秒
 正極 負極 540 秒	 正極 負極 600 秒	 正極 負極 660 秒	<p>由電解時負極產生氣泡的速率及指示劑顏色褪色情形來看，電解溴化鉀的反應速率顯然比電解氯化鉀的快，而共同的是：兩極的酸鹼變化一樣很清楚，都有明顯的陰陽海出現。</p>	

實驗十八、一滴 1M 碘化鉀水溶液加一滴廣用指示劑的電解實驗

【正極鉛筆心、負極為大頭針】以投影片為接觸載體，微形電解每 10 秒時拍攝的過程全都錄

 正極 負極 0 秒	 正極 負極 10 秒	 正極 負極 20 秒	 正極 負極 30 秒	 正極 負極 40 秒
 正極 負極 50 秒	 正極 負極 60 秒	 正極 負極 70 秒	 正極 負極 80 秒	 正極 負極 90 秒
 正極 負極 100 秒	 正極 負極 110 秒	 正極 負極 120 秒	 正極 負極 130 秒	 正極 負極 140 秒
 正極 負極 150 秒	 正極 負極 160 秒	 正極 負極 170 秒	 正極 負極 180 秒	 正極 負極 190 秒
 正極 負極 200 秒	 正極 負極 220 秒	 正極 負極 240 秒	 正極 負極 300 秒	 正極 負極 360 秒
 正極 負極 420 秒	 正極 負極 480 秒	 正極 負極 540 秒	 正極 負極 600 秒	 正極 負極
 電解後的液滴	 以一小段衛生紙 擦拭	 再滴入 2 滴水證明 只用衛生紙擦一 次的效果就很好。	 再拿一小段衛生 紙擦拭	 擦拭後結果衛生 紙仍然純白

【結果歸納】

1 為了避免正極金屬電極氧化所產生的金屬離子的干擾，所以正極以鉛筆心當電極；負極則因進行還原反應，所以使用大頭針金屬電極會優於鉛筆心電極。因此，實驗十六~十八的正負電極均用正極鉛筆心、負極大頭針以進行電解反應。

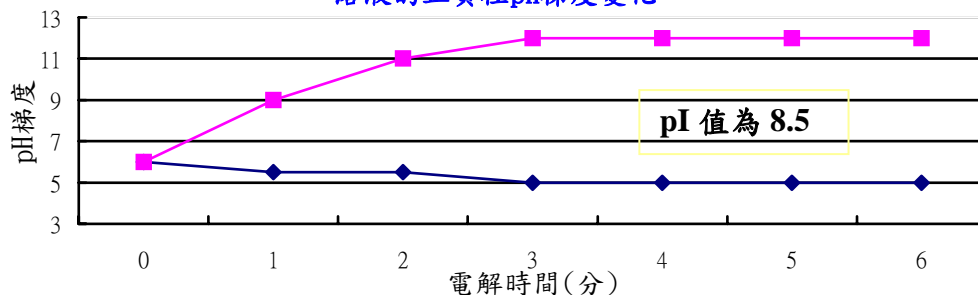
2 實驗十六電解溴化鉀溶液其原理及反應如下：

(1) $KBr \rightarrow K^+ + Br^-$ 外加電能時， H^+ 優先於 K^+ 而還原，所以負極產生氫氣的氣泡 ($2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$)；負離子 Br^- 向正極移動氧化產生 Br_2 ， Br_2 可溶於水形成具漂白性的物質 $HBrO$ ($Br_2 + H_2O \rightarrow HBr + HBrO$)，而使正極附近顏色褪色最後甚至負極也褪色，另外 Br^- 可與 Br_2 產生棕色的 Br_3^- ($2Br^- \rightarrow Br_2 + 2e^-$ $Br_2 + Br^- \rightarrow Br_3^-$)，這是為什麼在電解的十分鐘內或最後十分鐘明明顏色已褪色，而正極附近區域始終仍有黃色物質的原因了。

(2) 雖有 Br_3^- 干擾，但液滴仍可看出兩極不一樣的顏色，所以，將其電解隨時間變化的 pH 梯度大約變化略分辨如下(反覆多次對照廣用試紙標準變色表)

電解時間(分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pI
正鉛筆心負大頭針正極 pH	6.0	5.5	5.5	5.0	5.0	5.0	5.0	開始褪色而不易分辨				8.5
正鉛筆心負大頭針負極 pH	6.0	9.0	11.0	12.0	12.0	12.0	12.0					

圖十八、正極鉛筆心、負極大頭針當電極電解1.0M溴化鉀水溶液的正負極pH梯度變化



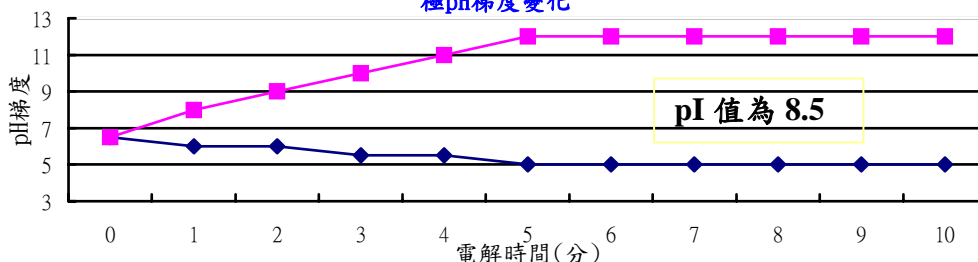
3 實驗十七電解氯化鉀溶液其原理及反應如下：

(1) $KCl \rightarrow K^+ + Cl^-$ 外加電能時， H^+ 優先於 K^+ 而還原，所以負極產生氫氣的氣泡 ($2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$)，負離子 Cl^- 向正極移動氧化產生 Cl_2 ，又 $Cl_2 + H_2O \rightarrow HCl + HClO$ ，氯分子又溶解在水中生成具漂白性的物質 $HClO$ 而使正極附近顏色褪色，負極則鹼性夠強而不致於完全褪色卻又有變淡的趨勢的原因了。

(2) 本想以電流強度來比較兩者反應速率及活性大小，但均在 1mA 的負載電流下，實在不易比較，只能從負極產生氫氣泡的多寡來看， KBr 的活性略大於 KCl 。從液滴可看出兩極不一樣的顏色下，所以將其電解隨時間變化的 pH 梯度大約變化略分辨如下(反覆多次對照廣用試紙標準變色表)

電解時間(分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pI
正鉛筆心負大頭針正極 pH	6.5	6.0	6.0	5.5	5.5	5	5	5	5	5	5	8.5
正鉛筆心負大頭針負極 pH	6.5	8.0	9.0	10.0	11.0	12	12	12	12	12	12	

圖十九、正極鉛筆心、負極大頭針當電極電解1.0M氯化鉀水溶液的正負極pH梯度變化



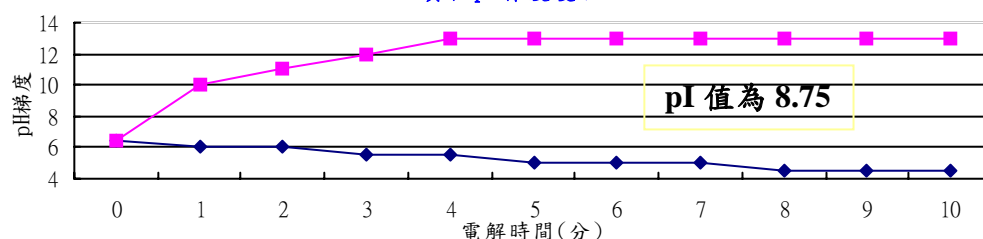
4 實驗十八電解碘化鉀溶液其原理及反應如下：

(1) $KI \rightarrow K^+ + I^-$ 外加電能迫使正離子 K^+ 向負極移動，但因其還原電位較低，所以負極反應 H^+ 優先於 K^+ 而還原應該產生氫氣的氣泡 ($2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$)，負離子 I^- 則向正極移動，所以正極反應應該有產生棕褐色的 I_3^- ($2I^- \rightarrow I_2 + 2e^-$ $I_2 + I^- \rightarrow I_3^-$)，至於為何較無褪色的情形，可能是產生的 I_2 對水的溶解度小，在可能無 $HIIO$ 的存在下，電極附近顏色褪色會不明顯的原因了。

(2) 雖有 I_3^- 干擾，但液滴仍可看出兩極不一樣的顏色，所以，將其電解隨時間變化的 pH 梯度大約變化略分辨如下(反覆多次對照廣用試紙標準變色表)

電解時間(分)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	pI
正鉛筆心負大頭針正極 pH	6.5	6.0	6.0	5.5	5.5	5.0	5.0	5.0	4.5	4.5	4.5	8.75
正鉛筆心負大頭針負極 pH	6.5	10.0	11.0	12.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	

圖二十、正極鉛筆心、負極大頭針當電極電解 1.0M 碘化鉀水溶液的正負極 pH 梯度變化



六、結論與應用

- 由「目的一承載液滴的載液面比較」可清楚的比較液滴在不同液面上的表面張力角度及平面直徑，以此方法可以選擇適合的承載液滴平面而無需使用傳統承接容器的問題。
- 由「目的二液滴的放大設計及折射與反射入鏡的比較實驗」可依液滴在實驗上需放大的倍率及實際現有的儀器做合適的選擇：
 - (1) 在無顯微鏡及 CCD 電子螢幕的輔佐下，即使只使用放大鏡，也可以進行微形實驗。
 - (2) 而巧妙的在顯微鏡台上加裝以金屬圓框及報廢光碟片組合而成的聚光反射光碟盤，也可在實驗室普通的日光燈源下，順利使用複式顯微鏡進行由上方向下方觀測反應及看清不透明物外觀與顏色的化學實驗。
 - (3) 由 CCD 電子螢幕的輸出影像孔可以連結電視畫面或錄影系統而將液滴實驗的情形記錄下來。
 - (4) 以本實驗而言，一小片透明、耐酸鹼、不易破、清理容易、不留痕跡、可重覆使用的投影片，實在是超級耐用的載液面。不止如此，它還能依實驗需要，以電腦繪製各種圖案以便於偵側實驗及減少目視上的誤差。
- 由目的三「微觀電解影響硫酸銅溶液的實驗因素」中，可成功的減量、省時、幾乎零污染的定量進行各種變因對電解一滴硫酸銅反應速率的影響，例如：
 - (1). 電壓愈大，反應時間愈短，反應速率愈大，電壓與反應速率似乎可看出成正比的關係。
 - (2). 根據化學計量，溶質量愈多，電解同濃度硫酸銅溶液的反應時間亦應增長。
 - (3). 由各一滴不同標準濃度的硫酸銅溶液，可偵測出濃度與反應時間成正比的線性迴歸曲線，由 $R^2=0.9968$ 值接近 1 可知，此定量實驗的準確性不差。因此可將每次依實驗需要所做出線性迴歸曲線作為檢量線，由未知濃度的反應時間(y項)偵測出來後，代入此曲線公式中，即可推算出未知濃度的(x)值。
 - (4). 由實驗證實外加磁場與通有電流的硫酸銅電解液兩者間有明顯的交互作用，可使正負離子運動速率加快，所以反應速率加快。同時實驗也證實外加磁場與電極擺放角度也有不同程度的影響，在相同控制變因下，證實電解的反應速率是外加磁場平行正、負極的夾角 $>$ 外加磁場與正、負極的夾角呈 45 度 $>$ 外加磁場與正、負極的夾角呈 90 度 $>$ 沒有

外加磁場的。

- (5). 實驗也證明加熱時間愈長，對微形電解硫酸銅溶液的影響就愈大。只要有加熱均可使反應時間縮短，而使反應速率變快，而且兩者並非呈反比的倍數關係。
4. 由目的四「微觀電解水溶液加廣用指示劑的陰陽海比較實驗」中，已試出加了十滴水到一張廣用試紙中，再用其中的一滴量，就可以進行一項液滴實驗，換句話說，一張廣用試紙可使用好幾次！而廣用指示劑對各種電解液滴能否造成陰陽海的畫面，歸納如下：
- (1). 電解中性的水溶液可以看出兩極的酸鹼性變化，而且電解會有類似如生化實驗等電點(pI 值)的交界面出現，因為此時交界面處的正電荷恰巧等於負電荷數時，靜電荷等於零。而再由特別設計的雙圓十字投影片對照下，此交界面不一定全在兩極的中間區。
- (2). 由控制電解時間所拍攝的相片對照下，不同電極的電解反應速率大小依序為正負極均為大頭針的電極 > 正極鉛筆心而負極為大頭針的電極 > 正負極均為鉛筆心的電極。
- (3). 如果正極是大頭針金屬電極，當正極進行氧化反應而呈酸性時，就會發生金屬優先比溶液中負離子氧化的情形出現，雖然知道金屬氧化電位比負離子氧化的電位高，但若正極處在鹼性中則此情形較不易發生，因為電解有外加電壓趨使反應進行的關係。
- (4). 正負均為鉛筆心電極的反應速率顯然比正極為鉛筆心電極而負極為大頭針電極小，所以在鉛筆心易斷但又不得已需使用下，我已試出正極鉛筆心而負極為大頭針的電極為理想的電解兩極。
- (5). 強酸性或強鹼性溶液的電解，最後都無法呈現陰陽海的兩極畫面，而且會有指示劑氧化而褪色的情形出現，若要使酸或鹼性溶液能呈現出陰陽海的畫面，那就需稀釋至 pH5~7、7~9 的弱酸或弱鹼性時，再進行電解才能呈現出來。
5. 由目的五「微觀硫酸銅溶液、溴化鉀、氯化鉀、碘化鉀溶液加廣用指示劑的陰陽海比較實驗」中的電解硫酸銅溶液情形，再度證實帶有酸性環境的正極若又因為使用金屬電極會發生金屬氧化產生離子而干擾反應的結果。而負極以金屬當電極，可使金屬離子還原析出的附著情形比鉛筆心非金屬的電極的要好。
- (1). 為了想知道像海水含有如氯化鈉的鹽類，若加入硫酸銅電解會有何不同中，居然發現負極並無紅色金屬銅析出物，反而是銅離子選擇在比較帶有弱鹼性的環境中和氯離子配基形成複雜的藍色錯鹽析出物。
- (2). 電解鹵化鉀溶液時，均發生負離子 Br^- 、 Cl^- 、 I^- 優先在正極失去電子氧化產生分子狀態，並從其正極附近指示劑褪色的情形可知，這些鹵素分子對水的溶解度也不同！因為： Br_2 或 Cl_2 溶於水可形成具漂白性的次溴酸或次氯酸而使正極附近指示劑褪色； I_2 則幾乎與大部份 I^- 形成數量相當多的棕色錯離子 I_3^- ；部份 Br_2 分子則與 Br^- 形成數量較少的棕色錯離子 Br_3^- ；電解氯化鉀的正極附近除了褪色外並無其他的有色離子出現而可以證明。

七、參考資料

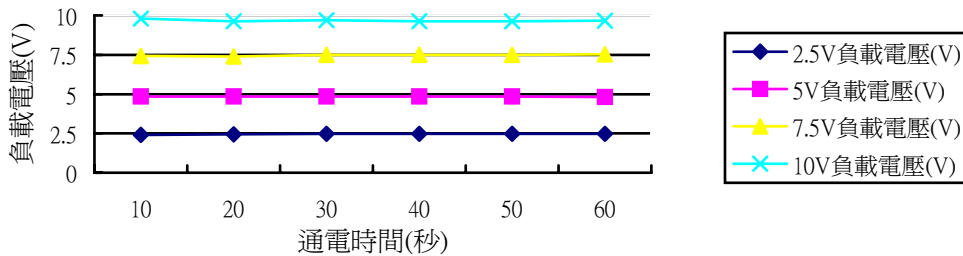
1. 李端真等編譯，物理 Vincent P. Coletta 第十六章光學，高立圖書有限公司
2. 楊建人譯，實用光學第六章，徐氏基金會出版
3. 高中物理，光學部分，國立編譯館主編
4. 高中基礎理化，簡易電解實驗，大考通訊社主編、泰宇出版公司發行
5. 高中化學，氧化還原反應，國立編譯館主編
6. 劉承華，液滴在我眼前蒸發，2002 年台灣國際科學展覽物理科研究報告
7. 來電顯示---電解水時兩極指示劑變化，
<http://freebsd.ps.jh.cy.edu.tw/~science/studauthor/89chem01/89chem01.htm>
8. 柯金源，變色的陰陽海，<http://www.pts.org.tw/~web01/ocean/p3-2-5.htm>
9. 蔡蘊明，何謂等電點，<http://www.chemedu.ch.ntu.edu.tw/questions/answer8.htm>
10. 蕭次融，紫色高麗菜汁的電解，<http://nature.ckps.tpc.edu.tw/>

附件一：實驗三、不同電壓下的微形電解硫酸銅的實驗

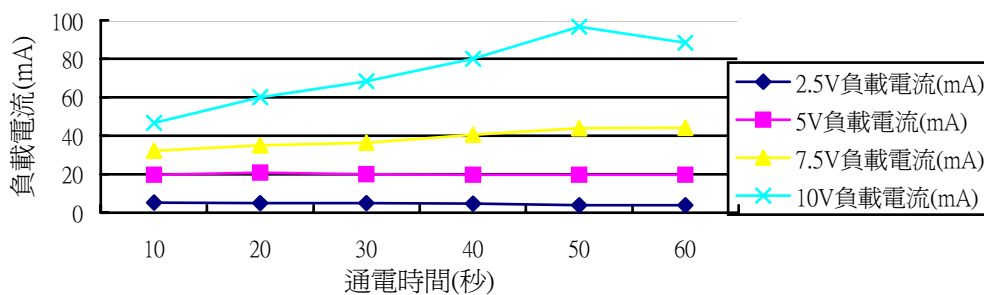
【實驗記錄】正負電極均用大頭針、電極相距一滴溶液邊緣(約 0.5cm)、電解液為 1 滴 1M 的 CuSO_4 溶液，下表為三次實驗的平均值

電源供應器電壓(V)	2.5V					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	2.41	2.44	2.49	2.48	2.49	2.49
負載電流(mA)	5.3	5.0	5.0	4.7	4.0	4.0
溶液藍色消失時間	1773 秒					
電源供應器電壓(V)	5.0V					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.86	6.86	4.86	4.84	4.84	4.83
負載電流(mA)	19.7	20.7	20.0	19.7	19.7	19.7
溶液藍色消失時間	342 秒					
電源供應器電壓(V)	7.5V					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	7.41	7.40	7.49	7.49	7.50	7.52
負載電流(mA)	32.3	35.0	36.3	40.6	44.0	44.3
溶液藍色消失時間	194 秒					
電源供應器電壓(V)	10.0V					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	9.78	9.63	9.68	9.62	9.63	9.65
負載電流(mA)	46.7	60.0	68.3	80.0	96.7	88.3
溶液藍色消失時間	126 秒					

圖一、微形電解硫酸銅的負載電壓與時間的關係



圖二、微形電解硫酸銅的負載電流與時間的關係



附件二：實驗四、不同電極下的微形電解硫酸銅的實驗

【實驗記錄】 電極相距一滴溶液邊緣(約 0.5cm)、電解液為 1 滴 1M的CuSO₄溶液、直流電源的電壓為 5V，下表為三次實驗的平均值

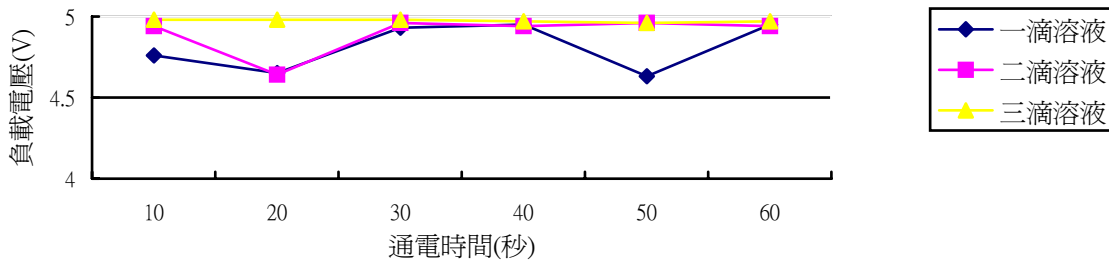
電極種類	(+)極：大頭針、(-)極：大頭針					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.74	4.77	4.87	4.84	4.83	4.96
負載電流(mA)	13.6	14.3	15.3	15.6	16.0	16.0
溶液藍色消失時間	256.3 秒					
電極種類	(+)極：鐵釘、(-)極：鐵釘					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.49	4.45	4.50	4.64	4.77	4.68
負載電流(mA)	13.3	15.0	16.3	16.3	14.6	15.6
溶液藍色消失時間	226.3 秒					
電極種類	(+)極：銅線、(-)極：銅線					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.84	4.88	4.90	4.89	4.87	4.87
負載電流(mA)	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3
溶液藍色消失時間	無法計量					
電極種類	(+)極：鉛筆心、(-)極：鉛筆心					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.97	4.96	4.96	4.96	4.96	4.95
負載電流(mA)	11.0	9.0	10.3	9.3	10.0	10.3
溶液藍色消失時間	146.6 秒					
電極種類	(+)極：鋁箔棒、(-)極：鋁箔棒					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.86	4.86	4.87	4.87	4.73	4.84
負載電流(mA)	13.0	12.0	13.0	13.0	14.0	13.3
溶液藍色消失時間	222.3 秒					
電極種類	(+)極：大頭針、(-)極：鐵釘					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.81	4.59	4.93	4.78	4.88	4.93
負載電流(mA)	8.7	9.8	9.0	9.7	9.7	9.3
溶液藍色消失時間	175 秒					
電極種類	(+)極：大頭針、(-)極：銅線					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.90	4.95	4.96	4.96	4.90	4.88
負載電流(mA)	18.0	17.7	18.7	20.0	22.0	23.3
溶液藍色消失時間	156 秒					
電極種類	(+)極：大頭針、(-)極：鉛筆心					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.93	4.85	4.88	4.88	4.87	4.79
負載電流(mA)	8.7	8.3	9.3	9.0	9.7	9.8
溶液藍色消失時間	155 秒					
電極種類	(+)極：大頭針、(-)極：鋁箔棒					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.97	4.96	4.97	4.97	4.97	4.96
負載電流(mA)	10.3	10.3	12.0	11.3	12.7	13.3
溶液藍色消失時間	178.3 秒					

附件三：實驗五、不同溶液滴數(電極間距不同)下的微形電解硫酸銅的實驗

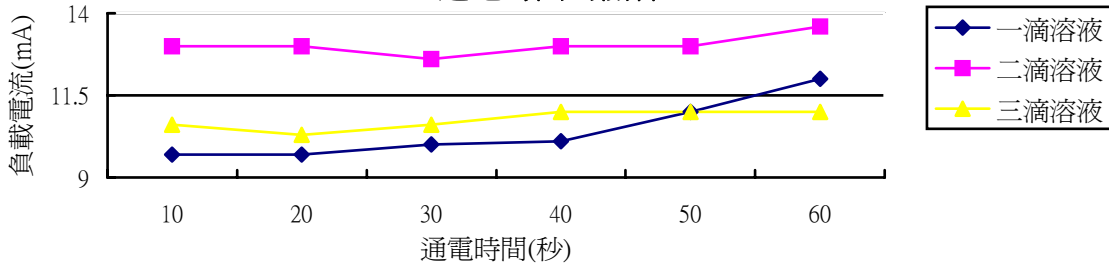
【實驗記錄】正負電極均用大頭針、直流電源的電壓 5V、電解液不同滴數(正、負極均置在液滴最外緣的範圍內，間距不同)，下表為三次實驗的平均值

電源供應器電壓(V)	5V					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
一滴溶液負載電壓(V)	4.76	4.65	4.93	4.95	4.63	4.95
一滴溶液負載電流(mA)	9.7	9.7	10.0	10.1	11.0	12.0
二滴溶液負載電壓(V)	4.94	4.64	4.96	4.94	4.96	4.94
二滴溶液負載電流(mA)	13.0	13.0	12.6	13.0	13.0	13.6
三滴溶液負載電壓(V)	4.98	4.98	4.98	4.97	4.96	4.97
三滴溶液負載電流(mA)	10.6	10.3	10.6	11.0	11.0	11.0
1M的CuSO ₄ 的量	一滴		二滴		三滴	
(+) (-)極距離(cm)	0.5		1.0		1.5	
(+)極變化	少		← 有紅色銅析出 →		多	
(-)極變化	都有氣泡生成					
溶液藍色消失時間(秒)	226		451		797	

圖三、微形電解硫酸銅在不同溶液量的負載電壓與通電時間的關係



圖四、微形電解硫酸銅在不同溶液量的負載電流與通電時間的關係

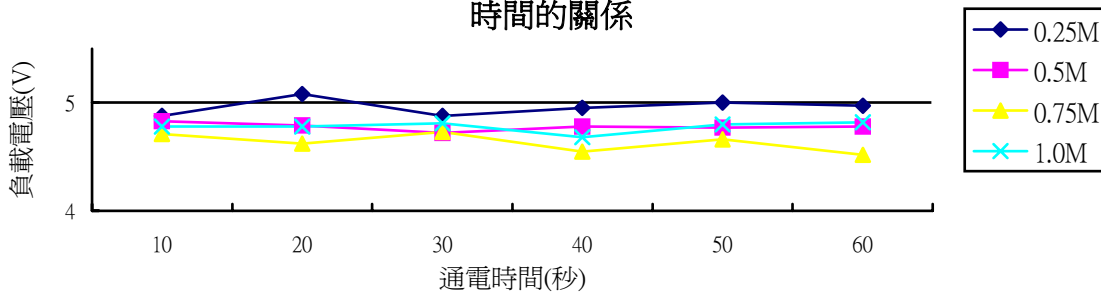


附件四：實驗六、不同溶液濃度下的微形電解硫酸銅的實驗

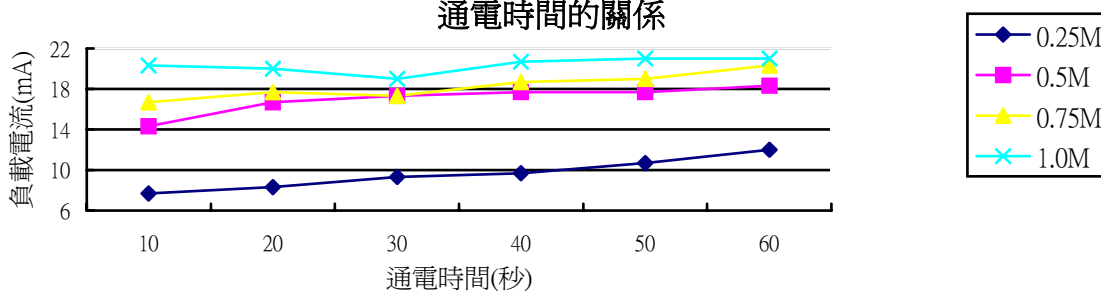
【實驗記錄】正負電極均用大頭針、直流電源的電壓 5V、電解液為 1 滴的CuSO₄溶液，下表為三次實驗的平均值

硫酸銅電解液濃度	0.25M					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.88	5.08	4.88	4.95	5.00	4.97
負載電流(mA)	7.7	8.3	9.3	9.7	10.7	12.0
溶液藍色消失時間	143.3 秒					
硫酸銅電解液濃度	0.50M					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.83	4.79	4.72	4.78	4.77	4.78
負載電流(mA)	14.3	16.7	17.3	17.7	17.7	18.3
溶液藍色消失時間	186.3 秒					
硫酸銅電解液濃度	0.75M					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.78	4.78	4.81	4.68	4.80	4.82
負載電流(mA)	16.7	17.7	17.3	18.7	19.0	20.3
溶液藍色消失時間	219.7 秒					
硫酸銅電解液濃度	1.00M					
通電時間(秒)	10	20	30	40	50	60
負載電壓(V)	4.78	4.78	4.81	4.68	4.80	4.82
負載電流(mA)	20.3	20.0	19.0	20.7	21.0	21.0
溶液藍色消失時間	265.3 秒					

圖五、微形電解硫酸銅在不同溶液濃度的負載電壓與通電時間的關係



圖六、微形電解硫酸銅在不同溶液濃度的負載電流與通電時間的關係



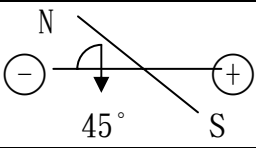
附件五：實驗七、不同直流電壓下，外加磁場對電解一滴 0.5M 硫酸銅溶液的影響(1)

【實驗記錄】正負電極均用大頭針、電極相距一滴溶液邊緣(約 0.5cm)、電解液為 1 滴 0.5M 的CuSO₄溶液

電源供應器電壓(V)	2.5V(無外加磁場)			負載電壓為 2.58~2.74V		
每 10 秒的負載電流(mA)	6	6	6.5	6.9	8	8.5
	7	10	12	12.5	12.1	12.5
	12.5	12.6	12.6	13.0	14.0	14.5
溶液藍色消失時間	258 秒					
電源供應器電壓(V)及外加磁場	2.5V(S [⊖] 、 [⊕] N)			負載電壓為 2.59~2.67V		
每 10 秒的負載電流(mA)	6	6.5	6.8	7	8	8.1
	9	10	10.8	11	11	11
	12	14.9	16.5	23	24	25
溶液藍色消失時間	210 秒					
電源供應器電壓(V)	5V(無外加磁場)			負載電壓為 4.97~4.87V		
每 10 秒的負載電流(mA)	20.5	26	34	36.5	48	60
	55	70	60	90	50	
溶液藍色消失時間	116 秒					
電源供應器電壓(V)及外加磁場	5V(S [⊖] 、 [⊕] N)			負載電壓為 4.98~4.97V		
每 10 秒的負載電流(mA)	16	20	23	29	45	120
	80	100	85	60		
溶液藍色消失時間	101 秒					
電源供應器電壓(V)	7.5V(無外加磁場)			負載電壓為 7.21~7.19V		
每 10 秒的負載電流(mA)	30	35	70	50	70	110
溶液藍色消失時間	106 秒					
電源供應器電壓(V)及外加磁場	7.5V(S [⊖] 、 [⊕] N)			負載電壓為 7.18~7.17V		
每 10 秒的負載電流(mA)	43	55	90	120	110	150
溶液藍色消失時間	91 秒					
電源供應器電壓(V)	10.0V(無外加磁場)			負載電壓為 10.17~10.23V		
每 10 秒的負載電流(mA)	60	90	70	80	120	
溶液藍色消失時間	56 秒					
電源供應器電壓(V)及外加磁場	10.0V(S [⊖] 、 [⊕] N)			負載電壓為 10.12~10.16V		
每 10 秒的負載電流(mA)	70	80	110	130	130	
溶液藍色消失時間	50 秒					

附件六：實驗八、不同直流電壓下，外加不同角度的磁場對電解二滴 0.5M 硫酸銅溶液的影響

【實驗記錄】2 滴 0.5M 的 CuSO_4 溶液，電壓全為 10.0V

電源供應器電壓(V)	無外加磁場			負載電壓為 9.59~9.52V		
每 10 秒的負載電流(mA)	7	8	8	8	9	9
	11	10	11	10	11	12
	5	13	13	15	16	16
	17	16	18	18	19	20
	21	22	24	26	28	29
	42	35	31	47		
溶液藍色消失時間	381 秒					
電壓(V)及 外加磁場	N [⊖] 、 [⊕] S			負載電壓為 9.85~9.68V		
每 10 秒的負載電流(mA)	15	13	15	19	20	27
	32	36	80	70	70	80
	70	60	70			
溶液藍色消失時間	155 秒					
電壓(V)及 外加磁場	S [⊖] 、 [⊕] N			負載電壓為 9.10~9.63V		
每 10 秒的負載電流(mA)	14	15	18	17	23	25
	25	27	31	30	37	42
	50	80	110	80		
溶液藍色消失時間	172 秒					
電壓(V)及 外加磁場				負載電壓為 10.09~9.72V		
每 10 秒的負載電流(mA)	10	12	10	11	10	13
	16	19	20	19	19	21
	28	35	45	50	50	50
溶液藍色消失時間	186 秒					
電壓(V)及 外加磁場				負載電壓為 9.65~9.39V		
每 10 秒的負載電流(mA)	6	6.5	7	7	7.5	8
	8	9	9	9	11	10
	10	11	13	14.5	16	17
	19	20	21	23	24	25
	27	27	26	27	30	32
	34	35	37	46		
溶液藍色消失時間	352 秒					

附件七：實驗九、不同直流電壓下，加熱對電解一滴 1M 硫酸銅溶液的影響

【實驗記錄】正負電極均用大頭針、電極相距一滴溶液邊緣(約 0.5cm)、電解液為 1 滴 1M 的 CuSO₄溶液

電源供應器電壓(V)	2.5V(無加溫)										負載電壓為 2.41~2.49V							
每 10 秒的負載電流(mA)	5.3	5	5	4.7	4	4	3	3	3	4	4	5	3.5	4	3	5	4	4.5
溶液藍色消失時間	1773																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	5.0V(無加溫)										負載電壓為 4.86~4.83V							
每 10 秒的負載電流(mA)	19.7	20.7	20	20	20	20	16	18	19	17	18	22	21	20	20	21	17	20
溶液藍色消失時間	342 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	7.5V(無加溫)										負載電壓為 7.40~7.52V							
每 10 秒的負載電流(mA)	32.3	35	36	42	45	30	34	36	40	41	44	44	35	40	42	40	30	35
溶液藍色消失時間	194 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	10.0V(無加溫)										負載電壓為 9.62 ~9.78V							
每 10 秒的負載電流(mA)	40	50	45	60	70	75	66	70	75	70	80	90	95	90	92	110	100	90
溶液藍色消失時間	126 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	2.5V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 2.44~2.46V							
每 10 秒的負載電流(mA)	4	3	3	3	4	4.5	4.5	4.5	4.8	4.9	4.9	5	5.1	5.1	5.1	5	5.1	5.1
	5	6	5.1	5.1	5.1	4.9	4.5	4.4	4	4	6	4.5	3.1	3.1	2.9	0.9		
溶液藍色消失時間	370 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	5V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 4.83~4.80V							
每 10 秒的負載電流(mA)	12	15	18	26	25	27	18	20	26	19	15	24	21	32	31	22	2.5	
溶液藍色消失時間	185 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	7.5V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 7.78~7.70V							
每 10 秒的負載電流(mA)	26	34.9	39	44	50	55	60	75	40	30	11	11	9					
溶液藍色消失時間	132 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	10.0V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 7.21~7.19V							
每 10 秒的負載電流(mA)	45	80	80	90	60	40	10											
溶液藍色消失時間	70 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	2.5V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 2.463~2.57V							
每 10 秒的負載電流(mA)	5	6	6.5	7	8	11	13	13	14	15	15	16	17	18	17	18	18	19
溶液藍色消失時間	206 秒																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	5V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 4.87~4.92V							
每 10 秒的負載電流(mA)	20	23	27	29	30	42	45	49	50	50	55	50	60	55	70	3	3	
溶液藍色消失時間	約 150 秒電解完畢，電流瞬間下降																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	7.5V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 6.82~7.37V							
每 10 秒的負載電流(mA)	13	15	16	19	16	20	28	70	80	80	130	100						
溶液藍色消失時間	123																	
電源供應器電壓(V)及置顯微投影處加溫	10.0V(持續加溫至反應結束)										負載電壓為 8.87~8.51V							
每 10 秒的負載電流(mA)	40	50	30	60	80	90	120	130										
溶液藍色消失時間	89 秒																	