

中華民國第 54 屆中小學科學展覽會

作品說明書

國中組 化學科

030216

變形金「筆」～粉筆變身為環保電鍍裝置

學校名稱：高雄市立三民國民中學

作者：	指導老師：
國二 莊禮禎	蔡志清
國二 陳宜君	蔡美芬
國二 陳佩樺	

關鍵詞：環保、粉筆、電鍍

摘 要

學校製造的粉筆垃圾，工業、實驗室產生的硫酸銅（含銅）廢液，我們利用兩者執行教科書的電鍍實驗，並回收到純銅（紅銅）。

前半部的理論研究，我們製作出類似教科書電鍍裝置的「粉筆電鍍裝置」後，逐項討論可能影響其工作效率的九項變因（通電時間、通電電壓、硫酸銅濃度、粉筆長度、粉筆直徑、電極種類、電極埋角、電極深度、電極距離），並求得最佳數值。

後半部的應用研究，我們參考工業的電鍍作法，利用添加物使標準電鍍液（硫酸銅）改良為佳化電鍍液（硫酸銅＋硫酸）。然後考慮粉筆垃圾的實際情況，製作出「實用型粉筆電鍍裝置」，並分別求出其使用標準、佳化電鍍液時，最大紅銅質量、最大通電時間、最大平均電流的數值與發生條件。

壹、研究動機

短粉筆常被視為不可回收的一般垃圾，考慮光是台灣各層級學校、各間教室一年就不知製造出多少的粉筆垃圾；為了執行教科書的電鍍實驗，一年也不知製造出多少的硫酸銅廢液（當然工業製程則產生出更多的含銅廢液）。如果能將兩者作一回收性利用，應該就十分符合我們的核心理念－環保（微型化學）。歷屆科展作品關於粉筆的環保用途，已經有電解、電池方面的「定性」研究；我們希望將研究領域推廣到電鍍（教科書的鍍銅實驗），並將研究方法進展到「定量」層次。

貳、研究目的

- 一. 製作「粉筆電鍍裝置」並探討可能影響其電鍍效率的各項變因。
- 二. 探討外部性變因（通電時間、通電電壓）對「粉筆電鍍裝置」的影響。
- 三. 探討鍍槽性變因（硫酸銅濃度、粉筆長度、粉筆直徑）對「粉筆電鍍裝置」的影響。
- 四. 探討電極性變因（電極種類、電極埋角、電極深度、電極距離）對「粉筆電鍍裝置」的影響。
- 五. 探討電鍍液添加物（種類、莫耳數）對「粉筆電鍍裝置」的影響。
- 六. 根據研究數據與粉筆垃圾的實際情況，製作「實用型粉筆電鍍裝置」；並分別檢測其使用標準電鍍液、佳化電鍍液時，「最大紅銅質量、最大通電時間、最大平均電流」的數值與發生條件。

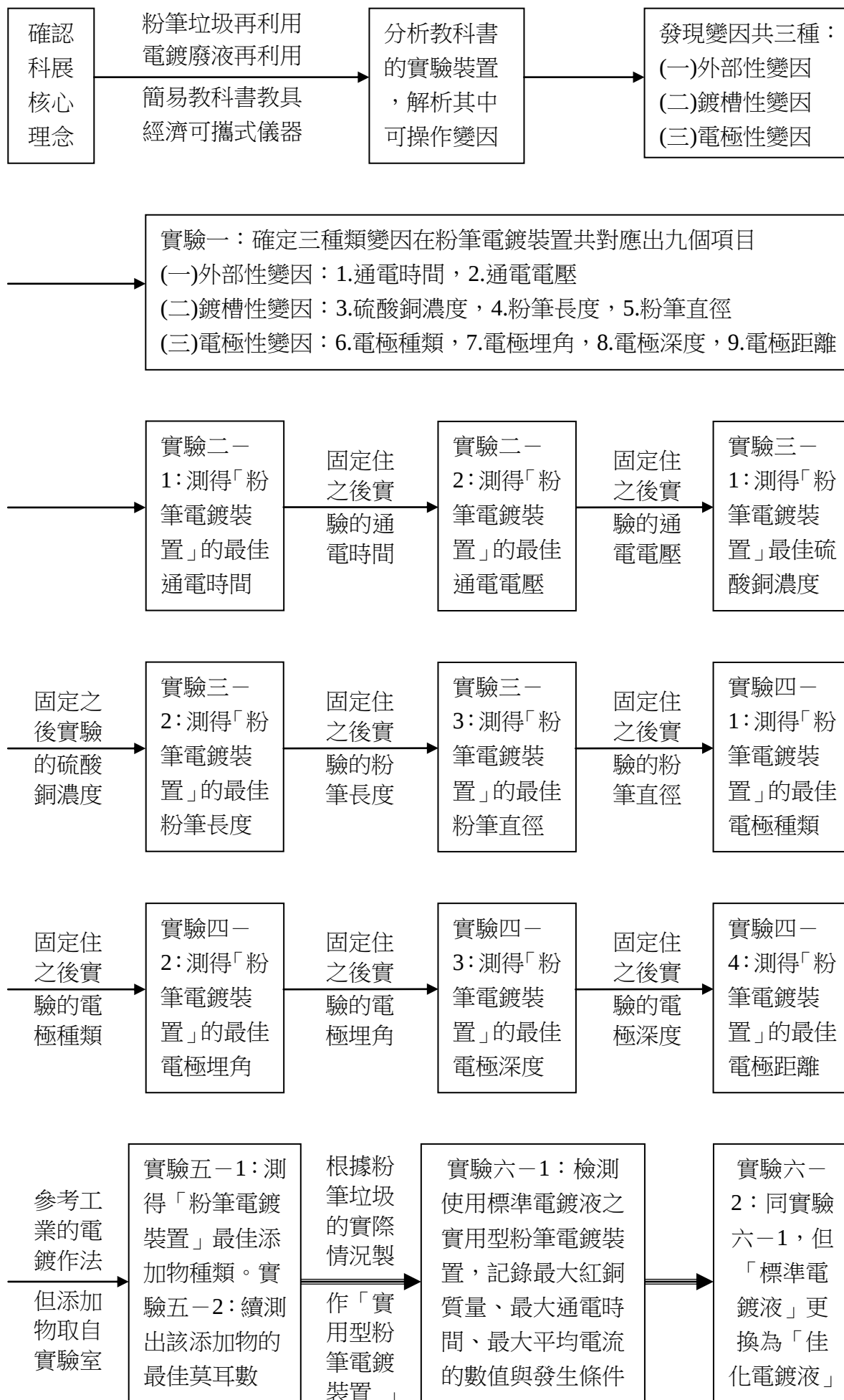
參、研究設備及器材

- 一. 藥品：五水合硫酸銅（ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ）、硫酸、鹽酸、硝酸、氫氧化鈉。
- 二. 器材：鱷魚夾、導線、三用電錶、刮杓、秤量紙、安培計、伏特計、電子天秤、電源、砂紙、電源供應器、鑽孔器、石棉心網、酒精燈、粉筆（主要成分是硫酸鈣，註一）、鐵釘、銅釘、鋁釘、碳筆（芯）（B、2B、3B、4B、6B）。

註一：市面上流通的粉筆，其成份主要有硫酸鈣、碳酸鈣兩種：前者質地較鬆軟、不易刮傷黑板、較便宜（廠商報價一支 0.5 元）、很多學校採用但較易產生飛塵；後者質地較堅硬、容易刮傷黑板、較昂貴（廠商報價一支 1.3 元）、很少學校採用但不易產生飛塵。我們使用的粉筆，廠商說明成份為硫酸鈣，但為求謹慎，研究開始前我們就嘗試把它浸泡在鹽酸液裏，結果粉筆結構體幾乎沒發生任何變化，因此確定其成份為「硫酸鈣」。

肆、研究方法與結果（含討論）

研究流程圖

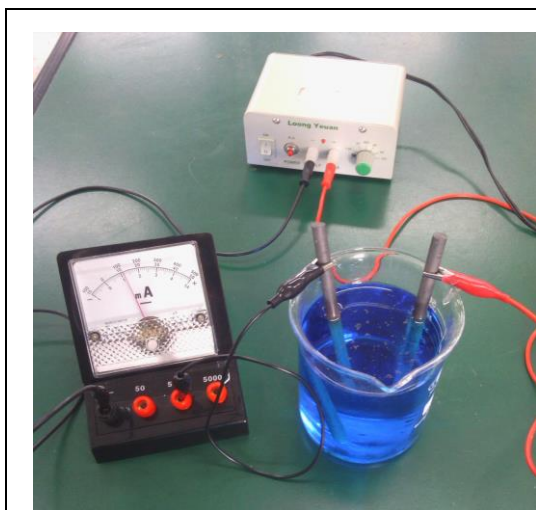


實驗一：製作「粉筆電鍍裝置」並探討可能影響其電鍍效率的各項變因。

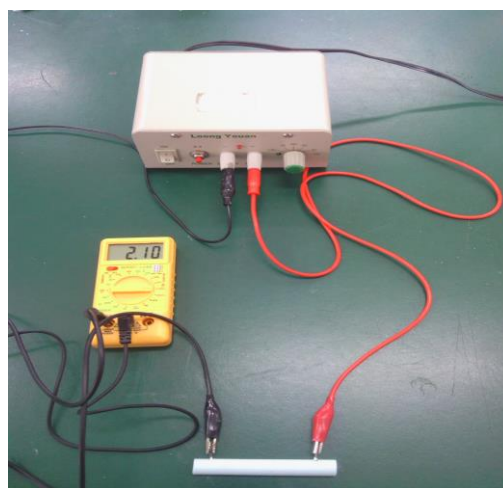
一. 實驗設計：

(一)比對教科書的電鍍實驗裝置，我們發揮創意製作出「粉筆電鍍裝置」，說明如下：

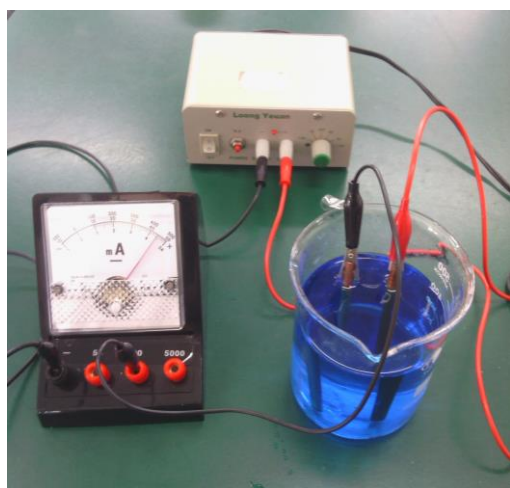
1. 鍍槽：體積大，裝盛硫酸銅溶液的燒杯→**體積小，浸泡（吸收）過硫酸銅溶液的粉筆**。
2. 電極：體積大的碳棒、銅棒→**體積小的碳筆（芯）、銅釘**【參閱圖一~圖四】。



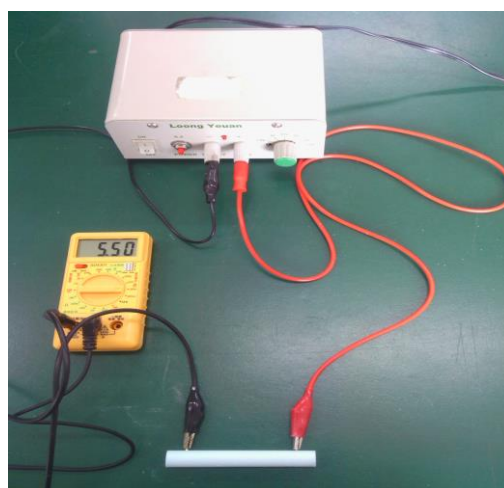
圖一：取自【實驗一】，教科書的電鍍實驗裝置（使用碳棒）。



圖二：取自【實驗一】，第一代粉筆電鍍裝置（使用碳筆）。



圖三：取自【實驗一】，教科書的電鍍實驗裝置（使用銅棒）。



圖四：取自【實驗一】，第一代粉筆電鍍裝置（使用銅釘）。

(二)分析教科書的電鍍實驗裝置，我們發現其電鍍效率是由三種類變因（外部性變因、鍍槽性變因、電極性變因）所控制。

(三)外部性變因：包括通電時間、通電電壓。

(四)鍍槽性變因：包括硫酸銅濃度、硫酸銅溶液質量。

(五)電極性變因：包括電極種類、電極的放入方式、電極距離。

(六)承(三)、(四)、(五)，同理，影響「粉筆電鍍裝置」電鍍效率的各項變因，應該也要從上述三種類變因來對應產生。

二. 實驗討論：

(一)「粉筆電鍍裝置」的外部性變因：

1. 通電時間：雖然銅離子在粉筆內的移動速率必然小於水溶液，但因為粉筆的總體積不大，電鍍理應不需太多時間，所以我們設定為「0.5 分鐘、1 分鐘、1.5 分鐘、2 分鐘、2.5 分鐘、3 分鐘、3.5 分鐘、4 分鐘、4.5 分鐘、5 分鐘」。
2. 通電電壓：考慮到方便取得的電池電壓是 1.5V、9V，所以我們設定為「1.5V、3V、4.5V、6V、7.5V、9V」。

(二)「粉筆電鍍裝置」的鍍槽性變因：

1. 硫酸銅濃度：
 - (1)因為硫酸銅藥品是水合物，所以溶液濃度之決定我們採行下述方法：
 - (2)我們在室溫（25℃）時，配製了硫酸銅的飽和溶液（以下簡稱母液）。
 - (3)吸取母液 10 ml，放蒸發皿烤乾，直到得到白色的無水硫酸銅（ CuSO_4 ）晶體後秤重。
 - (4)因為晶體質量恰為 2 克，故可知母液的莫耳濃度為：
$$(2/160) \div (10/1000) = 1.25 \text{ (M)}$$
 - (5)由母液進行稀釋，我們可得到下列濃度值「1.25M、1 M、0.75M、0.5M、0.25M」。
2. 硫酸銅質量：
 - (1)因為硫酸銅溶液會被吸入粉筆內，所以這項因素相當於是由「吸取硫酸銅溶液的粉筆體積大小」所決定。
 - (2)粉筆是圓柱體，體積是由粉筆長度（原長 8.2 cm）、粉筆直徑（原長 1.2 cm）所決定。
 - (3)考慮到實際切割、磨平的安全性與方便性，所以我們設定粉筆長度為「8 cm、6 cm、4 cm、2 cm」。
 - (4)考慮到實際切割、磨平的安全性與方便性，所以我們設定粉筆直徑為「1.2 cm、1.0 cm、0.8 cm、0.6 cm」。

(三)「粉筆電鍍裝置」的電極性變因：

1. 電極種類：
 - (1)考慮到推廣性（生活環境容易取得）和方便性（前端最好尖銳），金屬電極部分我們選擇了「鐵釘、銅釘、鋁釘」。
 - (2)承(1)，非金屬電極則選用「B 碳筆、2B 碳筆、3B 碳筆、4B 碳筆、6B 碳筆」（一般美術材料行可買到），並將其尖端像鐵釘一樣削尖。
 - (3)因為市面上鐵釘、銅釘、鋁釘最小的相同長度為 2 cm（含尖端部分 0.2 cm），所以碳筆（芯）也以 2 cm 為準切成小段。
2. 電極的放入方式：
 - (1)電極的放入方式是由電極埋角（指電極與粉筆中心軸的夾角）、電極深度所調整。
 - (2)考慮實作時角度間隔無法太小，我們設定電極埋角為「90 度、60 度、30 度、0 度」。
 - (3)雖然粉筆直徑有 1.2 cm，但太小的電極深度會導致電極容易脫落，太大的電極深度則會導致粉筆部分崩塌，所以我們設定電極深度為「1.0 cm、0.8 cm、0.6 cm、0.4 cm」。
3. 電極距離（指兩個電極中心點的距離）：考慮到粉筆原始長度就只有 8.2 cm，而且電極

的刺入點太靠近粉筆兩端常會造成粉筆損壞崩塌，所以我們設定電極距離為「6 cm、5 cm、4 cm、3 cm、2 cm、1 cm」。

實驗二—1：探討外部性變因（通電時間）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電 電壓	硫酸銅 濃 度	粉筆 長度	粉筆 直徑	電極 種類	電極 埋角	電極 深度	電極 距離
1.5V	0.25M	8 cm	1.2 cm	2B 碳筆	90 度	1 cm	6 cm

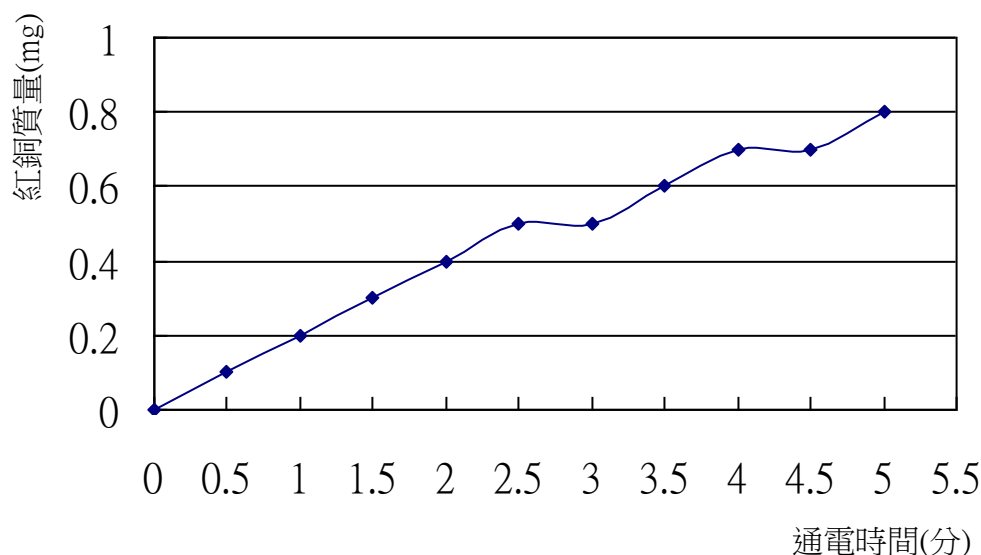
(二)操作變因：通電時間

(三)應變變因：紅銅質量

二. 實驗數據：

表一：不同通電時間的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

通電時間(分鐘)	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	6.6
平均電流 (mA)	5.98	5.96	5.93	5.91	5.88	5.84	5.85	5.81	5.78	5.72	5.32
紅銅質量 (mg)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.5	0.6	0.7	0.7	0.8	
備註	維持紅銅										變黑



圖五：不同通電時間的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

(一)電鍍過程由於粉筆內銅離子逐漸變少，正常情況電流本來就會緩慢地跟著變小；換句話說，記錄瞬間電流意義性不大！因此本實驗改記錄「平均電流」（可將其視為電鍍速率指標）；也就是每隔 2 秒紀錄一次瞬間電流，然後將其加總求平均值【參閱圖七】。

- (二)但**鍍得快未必就鍍得多**，有時電鍍速率太快甚至會造成實驗失敗（提早結束—形成黑色氧化銅，實驗結果是由負極新增的「**紅銅質量**」（**電鍍產量指標**）所決定。
- (三)電極變黑表示電鍍物同時混有紅銅與氧化銅，所以該組數據不列入分析、討論。
- (四)考慮到「探討變因的實驗流程中」必將消耗掉大量的電極材料（雖然長度只有 2 cm），而銅釘等...成本（價格）遠高於 2B 碳筆；因此，在實驗四—1 確認出「最佳電極種類」前，亦即實驗二—1~三—3，我們基於「方便取樣」原則先選用 2B 碳筆作電極材料。
- (五)以上四點兼有解釋、說明的性質，**之後的實驗討論不再贅述**。
- (六)觀察表一可知：通電時間愈大，平均電流—電鍍速率有「遞減」的情況。由粒子觀點看來，通電愈久則銅離子含量愈少，電鍍速率變小是合理的。
- (七)從教科書的內容提要可知，通電電壓、硫酸銅濃度愈大，電鍍效果愈好；所以我們從最小值的（1.5V、0.25M）開始，以確保可得到電鍍時間的最大值。
- (八)由於預設時間（5 分鐘）內尚未產生黑色的氧化銅，所以我們再持續進行電鍍；並於 6 分 40 秒時發現碳筆上生成 1.2 mg 的黑色氧化銅（實驗的極限時間）。
- (九)綜上實驗數據可知：
- 1.當通電時間介於 **0~2.5 分鐘**→鍍層**維持紅銅**，且通電時間幾乎與紅銅質量**具有線性關係**。
 - 2.當通電時間介於 2.5~5 分鐘→鍍層仍是紅銅，但通電時間與紅銅質量已經沒有線性關係。
 - 3.當通電電壓大於 6 分 40 秒→鍍層被汙染。
- (十)承(九)，本實驗之通電電壓採 1.5 V，極限時間是 6.6 分鐘；電源供應器最大電壓可達 9V，極限時間預估約 1.1 分鐘。
- (十一)綜合上述討論可知，後續研究的電鍍時間應控制為 1.5 分鐘。

實驗二—2：探討外部性變因（通電電壓）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	硫酸銅濃度	粉筆長度	粉筆直徑	電極種類	電極埋角	電極深度	電極距離
1.5 分鐘	0.25M	8 cm	1.2 cm	2B 碳筆	90 度	1 cm	6 cm

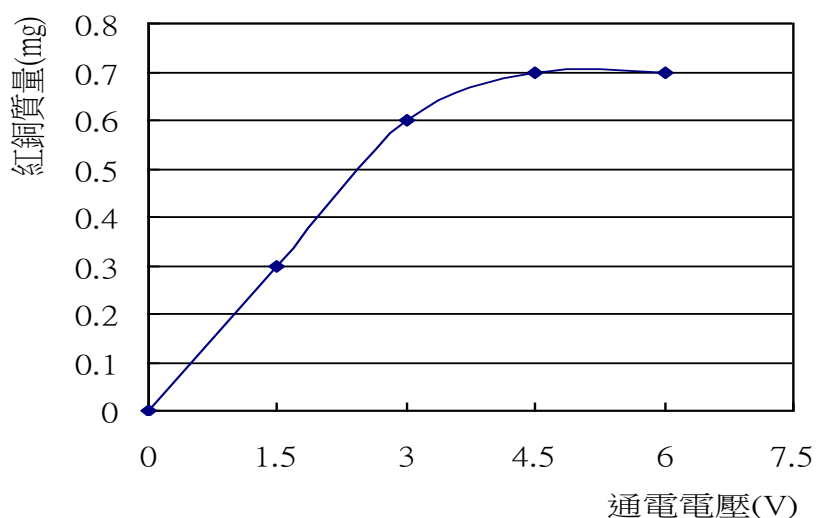
(二)操作變因：通電電壓

(三)應變變因：紅銅質量

二. 實驗數據：

表二：不同通電電壓的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

通電電壓 (V)	1.5	3	4.5	6	7.5	9
平均電流 (mA)	5.92	10.48	11.02	11.43	11.25	10.82
紅銅質量 (mg)	0.3	0.6	0.7	0.7		
備註	維持紅銅				78 秒 時變黑	56 秒 時變黑



圖六：不同通电电压的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

(一)由於本實驗群的【7.5V】組通电 90 秒會產生黑色氧化銅，所以我們重複實驗，並在通电 60 秒後每隔 2 秒觀察一次，結果發現這個子實驗的極限時間是 78 秒。

(二)同(一)，【9V】組的極限時間是 56 秒。

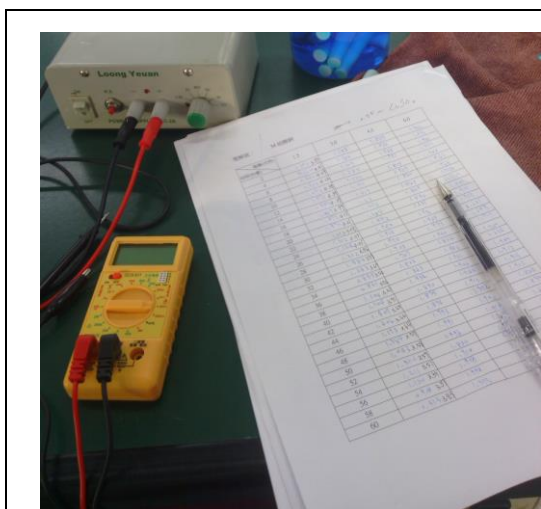
(三)不論是【7.5V】組或【9V】組，一旦生成氧化銅後，瞬間電流都有突然變小的狀況：我們可以推論：氧化銅的導電效果小於紅銅。

(四)承(三)，並且間接造成「平均電流」登錄值變小。

(五)綜上實驗數據可知：

- 1.當通电电压介於 0 ~ 3V → 鍍層維持紅銅【參閱圖八】，且通电电压幾乎與紅銅質量具有線性關係。
- 2.當通电电压介於 3 ~ 6V → 鍍層仍是紅銅，但通电电压與紅銅質量已經沒有線性關係。
- 3.當通电电压大於 6 V → 鍍層被汙染【參閱圖八】。

(六)綜合上述討論可知，後續研究的通电电压應控制為 3V。



圖七：取自【實驗二—1】，每隔 2 秒紀錄一次瞬間電流，然後求平均值。



圖八：取自【實驗二—2】—正常碳筆、鍍上紅銅情況、被氧化銅汙染的情況。

實驗三—1：探討鍍槽性變因（硫酸銅濃度）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	通電電壓	粉筆長度	粉筆直徑	電極種類	電極埋角	電極深度	電極距離
1.5 分鐘	3V	8 cm	1.2 cm	2B 碳筆	90 度	1 cm	6 cm

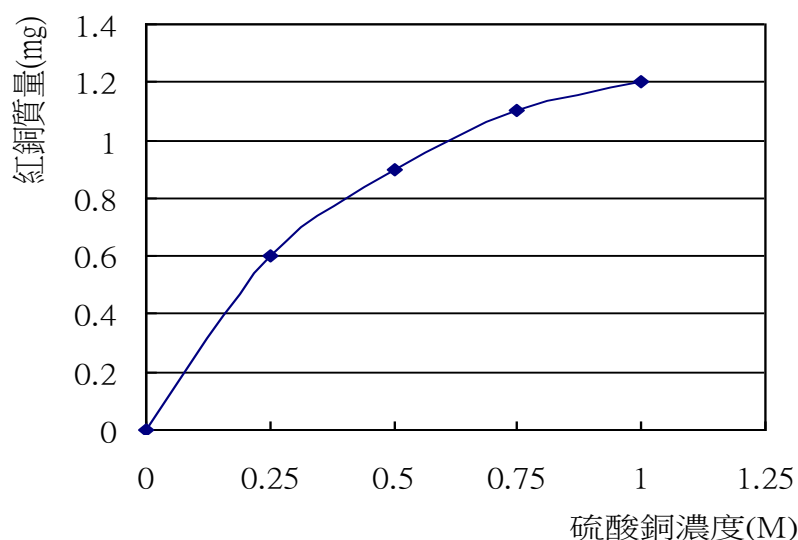
(二)操作變因：硫酸銅濃度

(三)應變變因：紅銅質量

二. 實驗數據：

表三：不同硫酸銅濃度的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

硫酸銅濃度 (M)	0.25	0.5	0.75	1	1.25
平均電流 (mA)	10.52	14.89	16.14	18.35	17.72
紅銅質量 (mg)	0.6	0.9	1.1	1.2	
備註	維持紅銅				68 秒 時變黑

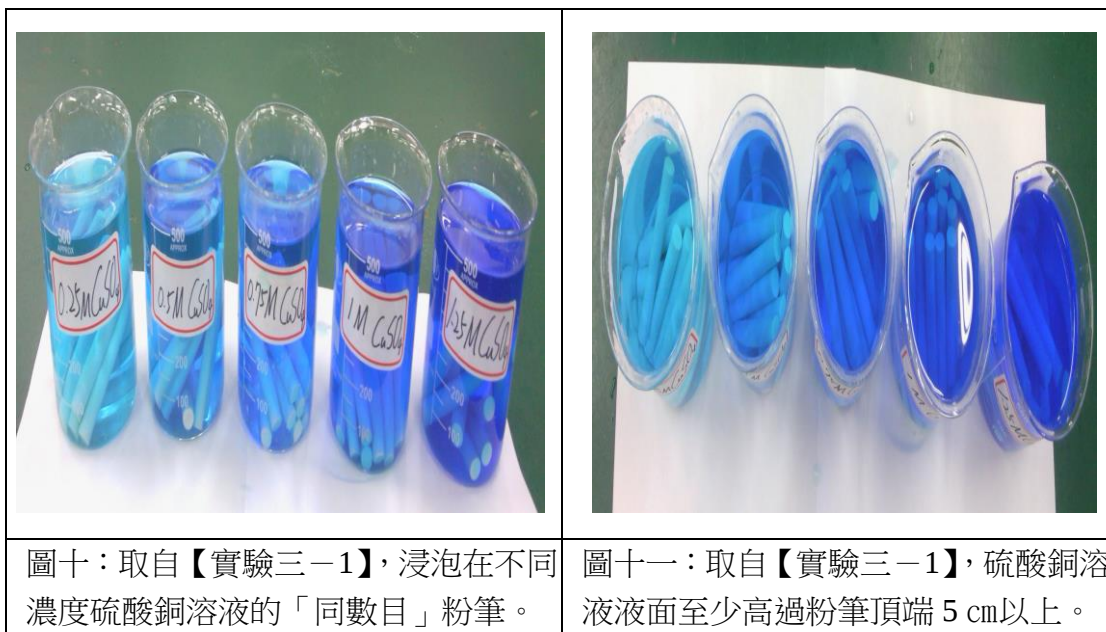


圖九：不同硫酸銅濃度的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

(一)本實驗對於「硫酸銅濃度」的外部性定義是：配置好 500 毫升該濃度之硫酸銅溶液後，把 10 隻粉筆靜置溶液中 24 小時；過程中持續維持液面高過粉筆頂端 5 cm 以上，且燒杯加封鋁箔以避免水分蒸發【參閱圖十~圖十一】。

(二)由於本實驗群的【1.25 M】組通電 90 秒會產生黑色氧化銅，所以我們重複實驗，並在通電 60 秒後每隔 2 秒觀察一次，結果發現這個子實驗的極限時間是 68 秒。



圖十：取自【實驗三－1】，浸泡在不同濃度硫酸銅溶液的「同數目」粉筆。

圖十一：取自【實驗三－1】，硫酸銅溶液液面至少高過粉筆頂端 5 cm 以上。

(三)綜上實驗數據可知：

- 1.當硫酸銅濃度介於 $0 \sim 1M$ → 鍍層維持紅銅，且硫酸銅濃度愈大則紅銅質量愈大。
- 2.當硫酸銅濃度大於 $1M$ → 鍍層被污染。

(四)綜合上述討論可知，後續研究的硫酸銅濃度應控制為 $1M$ 。

實驗三－2：探討鍍槽性變因（粉筆長度）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電 時間	通電 電壓	硫酸銅 濃 度	粉筆 直徑	電極 種類	電極 埋角	電極 深度	電極 距離
1.5 分鐘	3V	1 M	1.2 cm	2B 碳筆	90 度	1 cm	1 cm

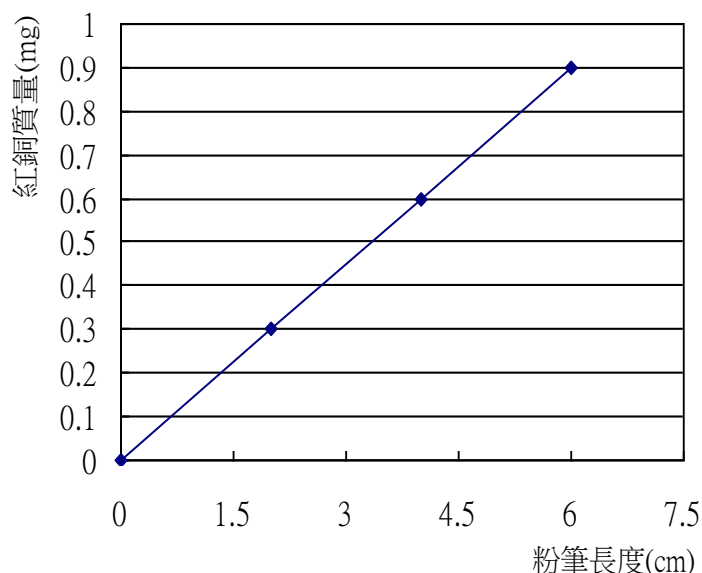
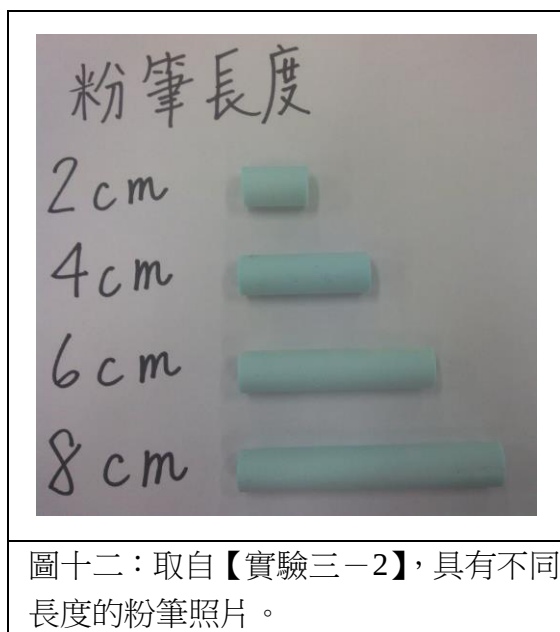
(二)操作變因：粉筆長度【參閱圖十二】

(三)應變變因：紅銅質量

二. 實驗數據：

表四：不同粉筆長度的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

粉筆長度 (cm)	2	4	6	8
平均電流 (mA)	4.72	9.33	14.15	17.47
紅銅質量 (mg)	0.3	0.6	0.9	
備註	52 秒後急降 維持紅銅	74 秒後急降 維持紅銅	正常性緩降 維持紅銅	76 秒 時變黑



三. 實驗討論：

- (一)實驗二－1~三－1，各分組的瞬間電流幾乎都是「正常性緩降」，但本實驗群的【2 cm】組、【4 cm】組，瞬間電流分別在第 52 秒、第 74 秒出現急速降低的特殊表現；推論應該是因為銅離子耗盡，導致電鍍反應變得很難持續。
- (二)由於本實驗群的【8 cm】組通電 90 秒會產生黑色氧化銅，所以我們重複實驗，並在通電 60 秒後每 2 秒觀察一次，結果發現這個子實驗的極限時間是 76 秒。
- (三)承(二)，【8 cm】組會變黑其實是「出乎我們意料之外」，於是我們往回比對實驗二－1~三－1 的控制變因，我們推論造成這樣結果的原因應該是「電極距離太小」而不是「粉筆長度太大」。且為驗證我們的想法，我們特地重做一次實驗，並將這次實驗的「電極距離」更改為 6 cm。結果【8 cm】組電極果然不再變黑，平均電流為 18.39 mA，生成的紅銅質量則是 1.2 mg；我們的想法由實驗獲得驗證。
- (四)綜上實驗數據可知：當粉筆長度介於 0~8 cm→鍍層維持紅銅，且粉筆長度愈大則紅銅質量愈大。
- (五)綜合上述討論可知，後續研究的粉筆長度應控制為 8 cm。

實驗三－3：探討鍍槽性變因（粉筆直徑）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	通電電壓	硫酸銅濃度	粉筆長度	電極種類	電極埋角	電極深度	電極距離
1.5 分鐘	3V	1 M	8 cm	2B 碳筆	90 度	0.4 cm	6 cm

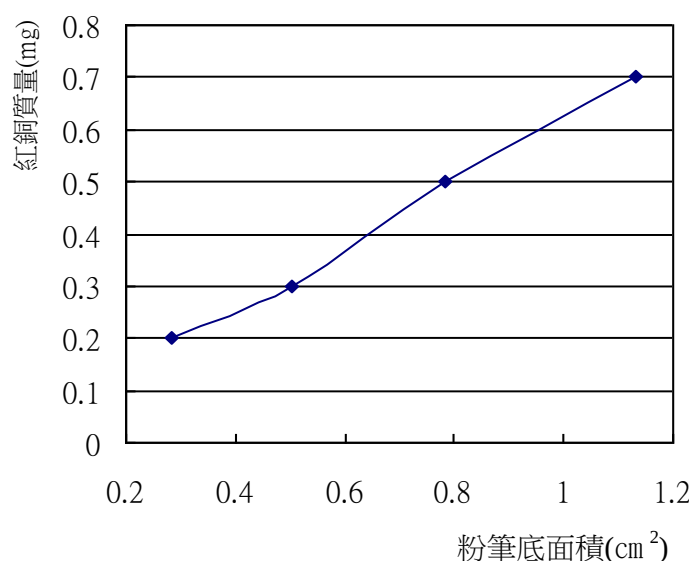
(二)操作變因：粉筆直徑【參閱圖十四】

(三)應變變因：紅銅質量

二. 實驗數據：

表五：不同粉筆直徑的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

粉筆直徑 (cm)	0.6	0.8	1.0	1.2
粉筆底面積(cm^2)	0.28	0.50	0.79	1.13
平均電流 (mA)	2.31	3.97	6.18	9.22
紅銅質量 (mg)	0.2	0.3	0.4	0.7
備註	42 秒後急降 維持紅銅	61 秒後急降 維持紅銅	78 秒後急降 維持紅銅	正常性緩降 維持紅銅



三. 實驗討論：

- (一)因為粉筆直徑必須大於電極深度，而且必須留下 0.2 cm 預防崩塌。另外，碳筆長 2 cm，太小的電極深度也無法穩固；經過實測，粉筆直徑 0.6 cm、電極深度 0.4 cm 已經是極限。
- (二)為了讓實驗數據更準確，我們用砂紙仔細磨擦粉筆，使其接近標準的圓柱體。
- (三)剛開始我們用「粉筆直徑－紅銅質量」作圖，但圖線趨勢並不理想。後來我們想到，圓柱體體積是由底面積乘於高所得。換句話說，要解釋紅銅產量，**粉筆底面積**應該是比粉筆直徑更來得「精確」；並且，事實上圖形果然更接近「線性分布」【參閱圖十五】。
- (四)本實驗群（三－3）的四個子實驗都沒有生成黑色的氧化銅。
- (五)實驗二－1~三－1，各分組的瞬間電流幾乎都是「正常性緩降」，但本實驗群的【0.6 cm】組、【0.8 cm】組、【1 cm】組，瞬間電流分別在第 42 秒、第 61 秒、第 78 秒出現急速降低的特殊表現；推論應該是因為銅離子耗盡，導致電鍍反應變得很難持續。
- (六)綜上實驗數據可知：當粉筆直徑介於 0.6 ~ 1.2 cm → 鍍層**維持紅銅**，且**粉筆直徑愈大則紅銅質量愈大**。
- (七)綜合上述討論可知，後續研究的粉筆直徑應控制為 1.2 cm。

實驗四—1：探討電極性變因（電極種類）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	通電電壓	硫酸銅濃度	粉筆長度	粉筆直徑	電極埋角	電極深度	電極距離
1.5 分鐘	3V	1 M	8 cm	1.2 cm	90 度	1 cm	6 cm

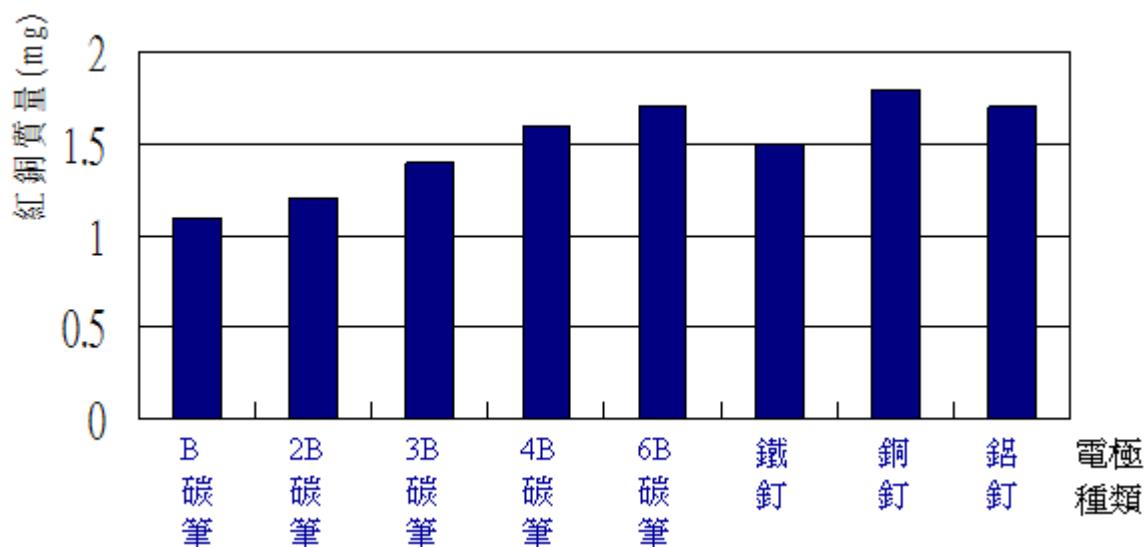
(二)操作變因：電極種類【參閱圖十七】

(三)應變變因：紅銅質量

二. 實驗數據：

表六：不同電極種類的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

電極種類	B 碳筆	2B 碳筆	3B 碳筆	4B 碳筆	6B 碳筆	鐵釘	銅釘	鋁釘
平均電流 (mA)	16.57	18.39	20.55	24.31	25.73	22.28	27.34	25.25
紅銅質量 (mg)	1.1	1.2	1.4	1.6	1.7	1.5	1.8	1.7
備註	維持紅銅							



圖十六：不同電極種類的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

- (一)若電極使用碳筆，則「粉筆電鍍裝置」**兼可當作教具使用**；除**可觀察負極半反應** [附上紅銅]外，還可觀察正極半反應 [氧氣生成]。
- (二)承(一)，在粉筆上塗上泡泡水，**則正極附近可看到氧氣汽泡產生**【參閱圖二十】。
- (三)置備好的粉筆電鍍裝置即使因水分蒸發而乾涸，只要**使用前（用滴管）回補水分**即可。
- (四)本實驗群（四—1）的八個子實驗都沒有生成黑色的氧化銅。
- (五)綜上實驗數據可知：對相同的實驗條件而言，**電極的效用排比為：銅釘 > 6B 碳筆 >**

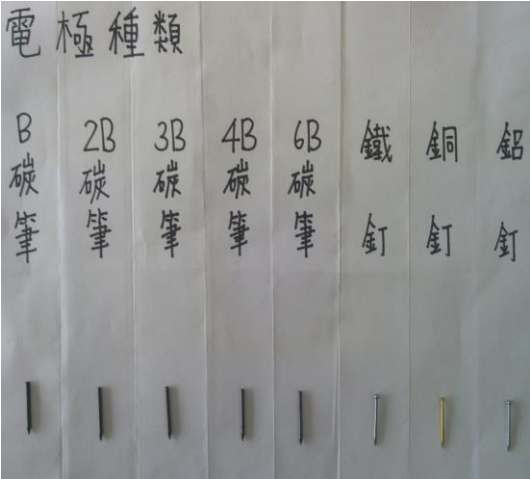
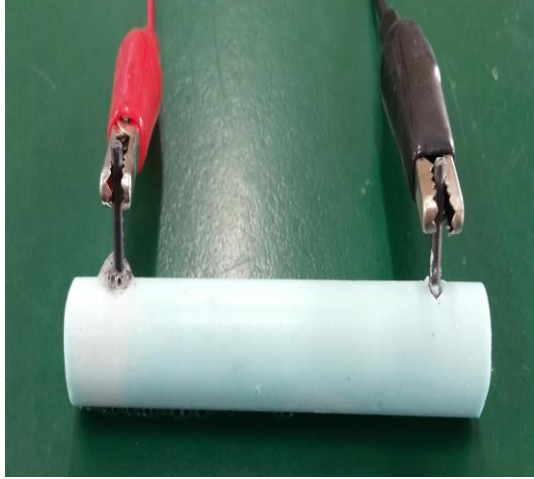
鋁釘 > 4B 碳筆 > 鐵釘 > 3B 碳筆 > 2B 碳筆 > B 碳筆【參閱圖十八、十九】。

(六)承(五)，雖然 6B 碳筆和鋁釘生成的紅銅質量都是 1.7 mg，但是因為 6B 碳筆的平均電流稍大於鋁釘（可能有小數點第二位後的多出質量），所以判定上應屬較好的電極選擇。

(七)承(五)，可再細分為「銅釘 > 鋁釘 > 鐵釘」，「碳筆含碳量（B 係數）愈大則所求愈大」。

(八)鐵釘、鋁釘附上的紅銅，和其它電極附上的相比較，結構明顯較鬆散且容易剝落。我們推論是因為活性關係，也就是鋁釘、鐵釘不只發生電鍍反應，還發生了「置換反應」。

(九)綜合上述討論可知，後續研究的電極種類應控制為銅釘。

	
圖十七：取自【實驗四－1】，不同種類的電極照片。	圖十八：取自【實驗四－1】，本研究電鍍效果次好的電極種類是 6B 碳筆。
	
圖十九：取自【實驗四－1】，本研究電鍍效果最好的電極種類是銅釘。	圖二十：取自【實驗四－1】，粉筆塗泡泡水則正極附近可看到氧氣汽泡產生。

實驗四－2：探討電極性變因（電極埋角）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一．實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	通電電壓	硫酸銅濃度	粉筆長度	粉筆直徑	電極種類	電極深度	電極距離
1.5 分鐘	3V	1 M	8 cm	1.2 cm	銅釘	0.6 cm	≒6.8 cm

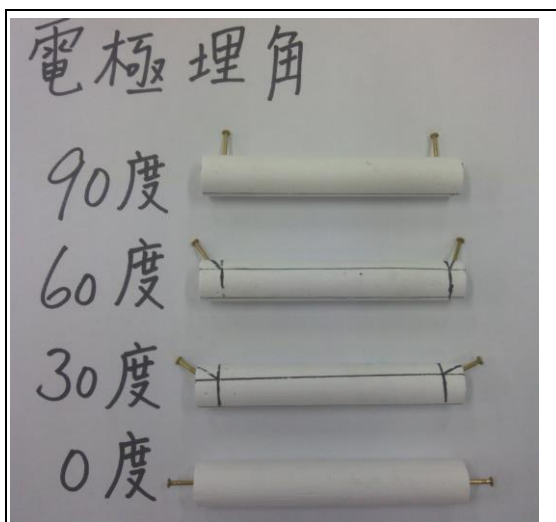
(二)操作變因：電極埋角【參閱圖二十一】

(三)應變變因：紅銅質量

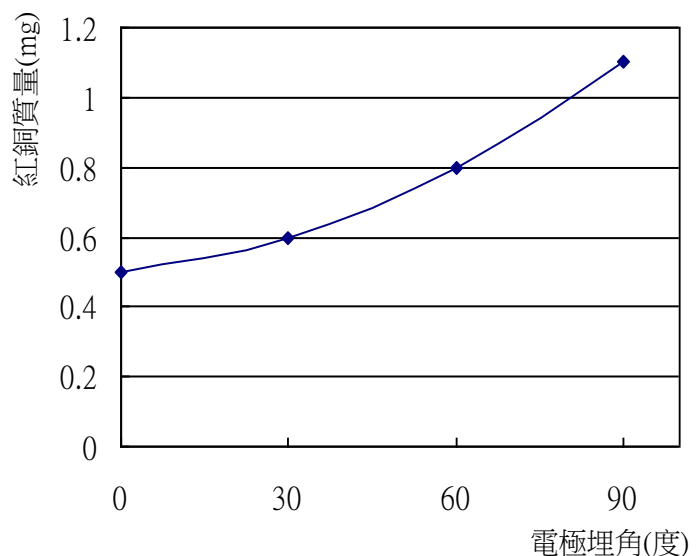
二. 實驗數據：

表七：不同電極埋角的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

電極埋角(度)	0	30	60	90
平均電流(mA)	6.45	7.29	8.25	13.13
紅銅質量(mg)	0.5	0.6	0.8	1.1
備註	維持紅銅			



圖二十一：取自【實驗四-2】，採用不同電極埋角的粉筆照片。

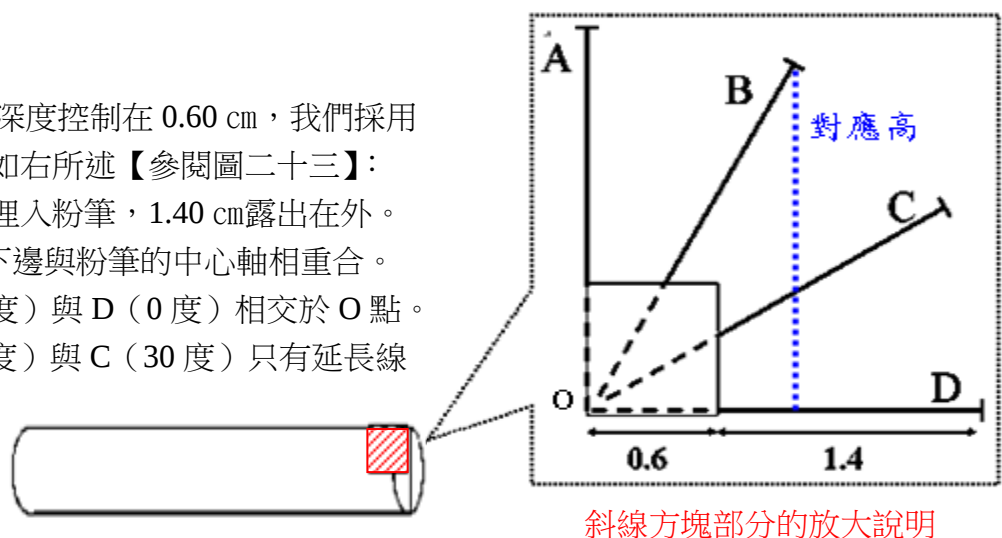


圖二十二：不同電極埋角的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

(一)為了要把電極深度控制在 0.60 cm，我們採用的裝置設計圖如右所述【參閱圖二十三】：

- 1.銅釘 0.60 cm埋入粉筆，1.40 cm露出在外。
- 2.斜線方塊的下邊與粉筆的中心軸相重合。
- 3.銅釘 A (90 度) 與 D (0 度) 相交於 O 點。
- 4.銅釘 B (60 度) 與 C (30 度) 只有延長線通過 O 點。



斜線方塊部分的放大說明

圖二十三：不同電極埋角的空間分布示意圖

$$\begin{aligned} \text{誤差百分率} &= \frac{\text{測量值} - \text{標準值}}{\text{標準值}} \times 100\% = \frac{6.89 - 6.80}{6.80} \times 100\% = 1.32\% \quad (\text{可接受誤差範圍內}) \\ \text{誤差百分率} &= \frac{\text{測量值} - \text{標準值}}{\text{標準值}} \times 100\% = \frac{6.96 - 6.80}{6.80} \times 100\% = 2.35\% \quad (\text{可接受誤差範圍內}) \end{aligned}$$

表八：銅釘 B、銅釘 C 電極距離的誤差百分率計算式

(二)本實驗群（四－2）的四個子實驗都沒有生成黑色的氧化銅。

(三)綜上實驗數據可知：當電極埋角介於 **0~90 度**→鍍層維持紅銅，且電極埋角愈大則紅銅質量愈大。

(四)綜合上述討論可知，後續研究的電極埋角應控制為 90 度。

實驗四－3：探討電極性變因（電極深度）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	通電電壓	硫酸銅濃度	粉筆長度	粉筆直徑	電極種類	電極埋角	電極距離
1.5 分鐘	3V	1 M	8 cm	1.2 cm	銅釘	90 度	6 cm

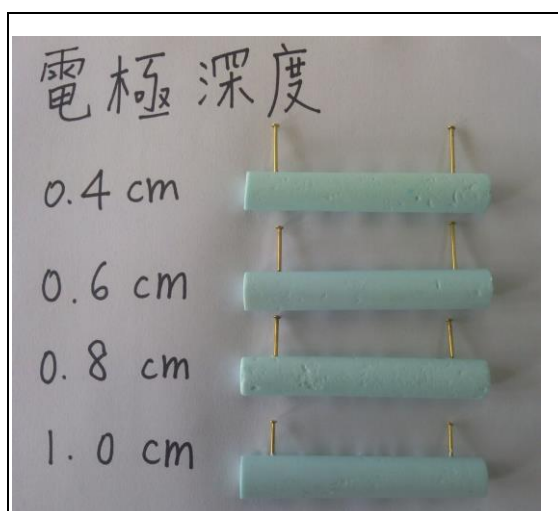
(二)操作變因：電極深度【參閱圖二十四】

(三)應變變因：紅銅質量

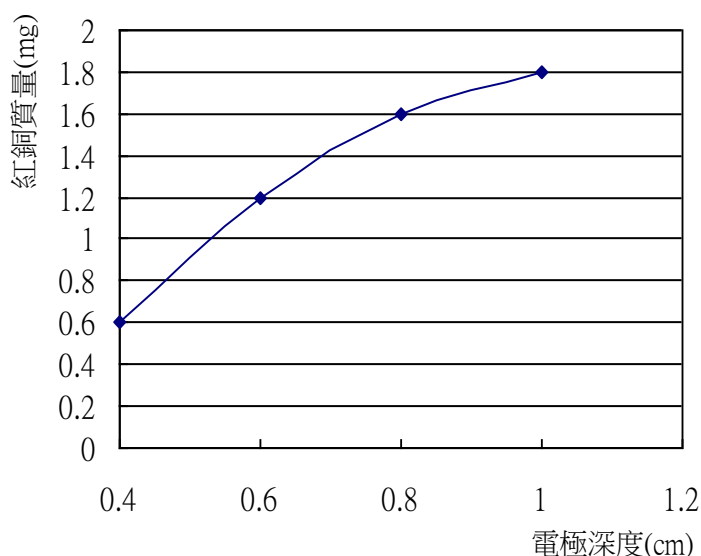
二. 實驗數據：

表九：不同電極深度的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

電極深度 (cm)	0.4	0.6	0.8	1
平均電流 (mA)	8.35	16.19	22.97	27.26
紅銅質量 (mg)	0.6	1.2	1.6	1.8
備註	維持紅銅			



圖二十四：取自【實驗四－3】，採用不同電極深度的粉筆照片。



圖二十五：不同電極深度的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

- (一)電極深度不能太小，否則電極不穩固，0.4 cm已是極限。
- (二)本實驗群（四－3）的四個子實驗都沒有生成黑色的氧化銅。
- (三)綜上實驗數據可知：當電極深度介於 0.4 ~1 cm→鍍層維持紅銅，且電極深度愈大則紅銅質量愈大。
- (四)綜合上述討論可知，後續研究的電極深度應控制為 1 cm。

實驗四－4：探討電極性變因（電極距離）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	通電電壓	硫酸銅濃度	粉筆長度	粉筆直徑	電極種類	電極埋角	電極深度
1.5 分鐘	3V	1 M	8 cm	1.2 cm	銅釘	90 度	1 cm

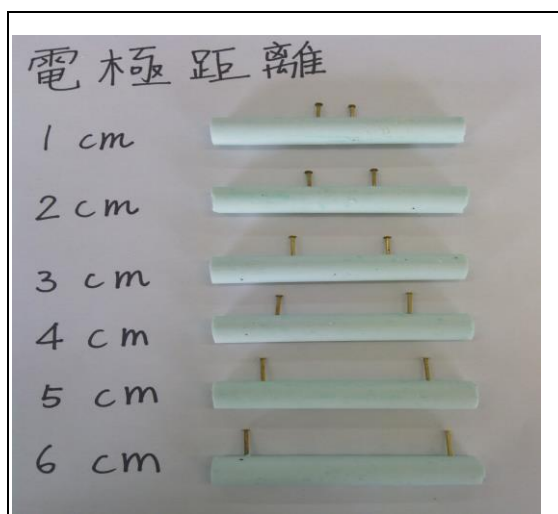
(二)操作變因：電極距離【參閱圖二十六】

(三)應變變因：紅銅質量

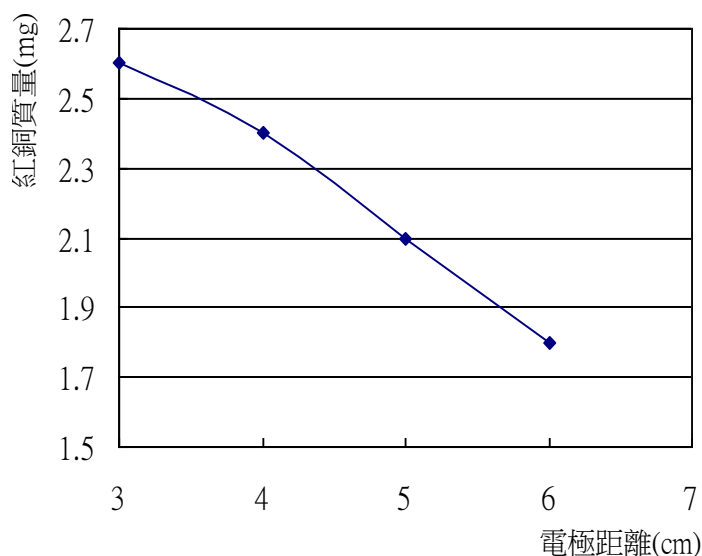
二. 實驗數據：

表十：不同電極距離的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

電極距離 (cm)	1	2	3	4	5	6
平均電流 (mA)	28.71	31.32	34.16	32.45	29.93	27.41
紅銅質量 (mg)			2.6	2.4	2.1	1.8
備註	66 秒時變黑	72 秒時變黑	維持紅銅			



圖二十六：取自【實驗四－3】，採用不同電極距離的粉筆照片。



圖二十七：不同電極距離的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

- (一)由於本實驗群的【1 cm】組通電 90 秒會產生黑色氧化銅，所以我們重複實驗，並在通電 60 秒後每隔 2 秒觀察一次，結果發現這個子實驗的極限時間是 66 秒。
- (二)同(一)，【2 cm】子實驗的極限時間是 72 秒。
- (三)如同實驗二-2 的情況，【1 cm】組、【2 cm】組在氧化銅生成後，瞬間電流都突然變小，並間接造成「平均電流」登錄值變小。
- (四)綜上實驗數據可知：
- 1.當電極距離介於 3~6 cm→鍍層維持紅銅，且電極距離愈大則紅銅質量愈小。
 - 2.當電極距離小於 3 cm→鍍層被汙染。
- (五)綜合上述討論可知，後續研究的電極距離應控制為 3 cm。

實驗五-1：探討電鍍液添加物（種類）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一.實驗設計：

- (一)我們查詢工業上的電鍍作法，發現其與實驗室最大的不同，在於「工業製程多會在鍍槽內放入增強導電效果的添加物」。
- (二)從學理上來看，「電鍍」其實就是「電解硫酸銅溶液」。
- (三)查詢教科書，其內是有提到「電解水」時會加入「硫酸或氫氧化鈉」幫助導電。
- (四)然而水為中性，硫酸銅溶液卻是酸性，所以合適的添加物種類可能不同。
- (五)綜合上述資料，於是我們取實驗室常用來「增強導電效果」的六種物質「醋酸、鹽酸、硫酸、硝酸、氨水、氫氧化鈉」作測試。
- (六)從「定量」觀點來看，電鍍液添加物不能和銅離子、銅原子起反應，而且所含的正離子也不能在負極析出，否則將對實驗數據造成干擾。

二.實驗數據：

- (一)我們將醋酸、鹽酸、硫酸、硝酸、氨水、氫氧化鈉六種 1M 水溶液，分別和銅離子（1M 硫酸銅溶液）、銅原子（銅釘），並記錄通電過程負極是否有物質析出，結果如下表所示：

表十一：不同電鍍液添加物與銅離子、銅原子反應，負極析出的「定性」描述

	醋酸	鹽酸	硫酸	硝酸	氨水	氫氧化鈉
和銅離子發生反應	無反應	無反應	無反應	無反應	有反應	有反應
和銅原子發生反應	無反應	無反應	無反應	有反應	無反應	無反應
電鍍時有負極析出	無反應	無反應	無反應	無反應	無反應	無反應

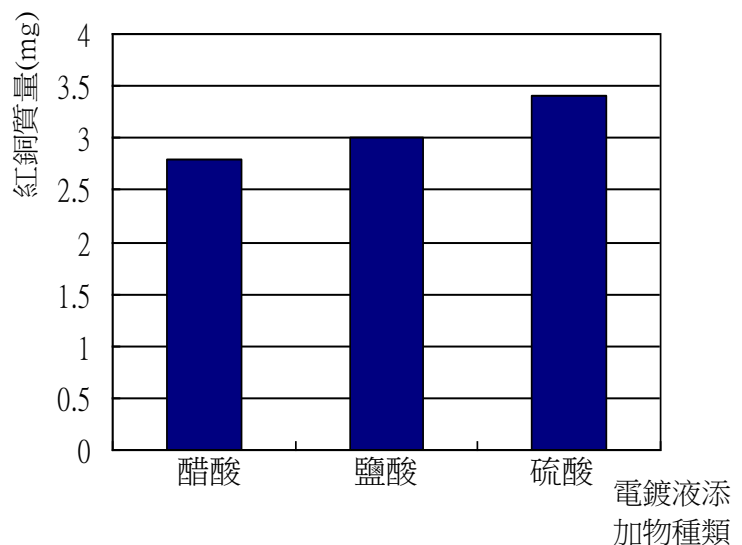
- (二)由上表可知，硝酸、氨水、氫氧化鈉，並不適合作為本研究的電鍍液添加物。
- (三)承(二)，我們再進一步測試「定量」的反應結果，以下列出醋酸、鹽酸、硫酸三種 1M 水溶液 250ml 和 1M 硫酸銅水溶液 250ml 混合液的「定量」電鍍結果：

表十二：不同電鍍液添加物（種類）的電鍍效果描述

粉筆電鍍裝置的各項控制變因	粉筆電鍍裝置（通電時間為 1.5 分鐘，通電電壓為 3V， 硫酸銅 0.5 莫耳 ，粉筆長度為 8 cm，粉筆直徑為 1.2 cm，電極種類為銅釘，電極埋角為 90 度，電極深度為 1 cm，電極距離為 3 cm）
電鍍液添加物種類	
醋酸 0.5 莫耳	平均電流 35.87mA，紅銅質量 2.8mg
鹽酸 0.5 莫耳	平均電流 38.61mA，紅銅質量 3.0mg
硫酸 0.5 莫耳	平均電流 43.72mA，紅銅質量 3.4mg



圖二十八：取自【實驗五－1】，氨水、氫氧化鈉都與銅離子反應生成氫氧化銅



圖二十九：不同電鍍液添加物的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

- (一)硝酸與銅原子的反應式： $3\text{Cu} + 8\text{HNO}_3 \rightarrow 3\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{NO} \uparrow$ 。
- (二)氨水、氫氧化鈉與銅離子的反應式都是： $\text{Cu}^{2+} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cu}(\text{OH})_2 \downarrow$ 【參閱圖二十八】。
- (三)因為放入電鍍液添加物將造成溶液總體積大於 500 毫升，並**連動性改變硫酸銅的莫耳濃度**，所以實驗五我們改以硫酸銅的莫耳數為控制變因。
- (四)為使硫酸銅的莫耳濃度保持為 1M，我們配置溶液時**先以 400 毫升蒸餾水**溶解掉「電鍍液添加物+125 克（0.5 莫耳）的五水合硫酸銅」，讓結晶水併入溶劑中，然後**再加水到 500 毫升**。
- (五)再說明醋酸、鹽酸、硫酸 0.5 莫耳的取法如下：
 - 1.取冰醋酸（98%，分子量 60，密度 1.05 g/cm^3 ；原液莫耳濃度約 17.15 M）29.15 毫升。
 - 2.取濃鹽酸（37.5%，分子量 36.5，密度 1.18 g/cm^3 ；原液莫耳濃度約 12.12 M）41.25 毫升。
 - 3.取濃硫酸（98%，分子量 98，密度 1.84 g/cm^3 ；原液莫耳濃度約 18.40 M）27.17 毫升。
- (四)綜上實驗數據可知：當添加物莫耳數相同，**添加物的效用排比**為：硫酸＞鹽酸＞醋酸。
- (五)綜合上述討論可知，後續研究的添加物種類應控制為硫酸。

實驗五－2：探討電鍍液添加物（莫耳數）對「粉筆電鍍裝置」的影響

一. 實驗設計：

(一)控制變因：

通電時間	通電電壓	硫酸銅莫耳數	粉筆長度	粉筆直徑	電極種類	電極埋角	電極深度	電極距離
1.5 分鐘	3V	0.5 莫耳	8 cm	1.2 cm	銅釘	90 度	1 cm	3 cm

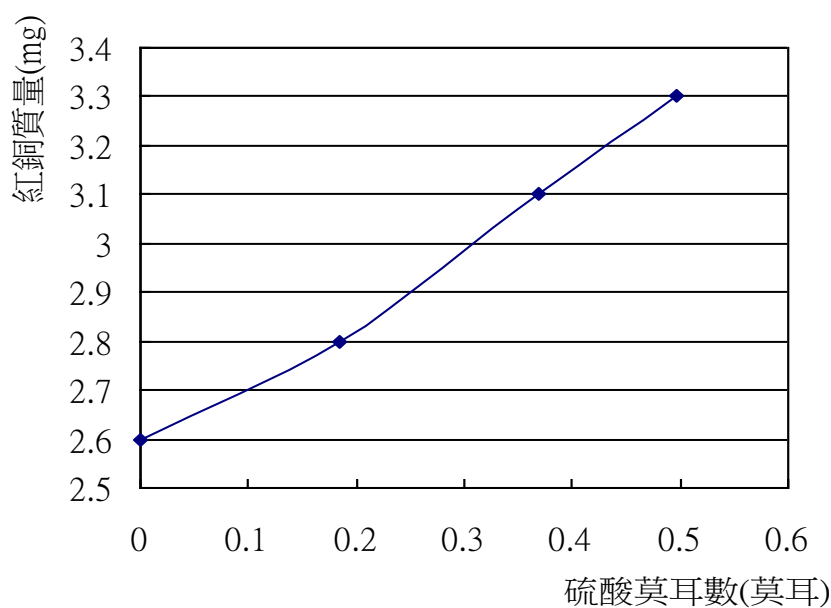
(二)操作變因：硫酸（電鍍液添加物）的莫耳數

(三)應變變因：紅銅質量

二. 實驗數據：

表十三：不同硫酸（電鍍液添加物）莫耳數的平均電流、紅銅質量、鍍物描述

濃硫酸體積 (ml)	0	10	20	27	30	40
硫酸莫耳數(莫耳)	0	0.184	0.368	0.497	0.552	0.736
平均電流 (mA)	33.95	37.28	40.54	42.87	30.44	22.58
紅銅質量 (mg)	2.6	2.8	3.1	3.3		
備註	維持紅銅				82 秒時變黑	70 秒時變黑



圖三十：不同硫酸莫耳數的紅銅質量比較

三. 實驗討論：

(一)與實驗六－1 相同，為使硫酸銅的莫耳濃度保持為 1M，我們配置溶液時先以 400 毫升蒸餾水溶解掉「電鍍液添加物+125 克（0.5 莫耳）的五水合硫酸銅」，讓結晶水併入溶劑中，然後再加水到 500 毫升。

(二)由於【0 莫耳】組仍有紅銅產生，表示即使不添加硫酸，電鍍仍可順利進行，只是紅銅質量較小。

(三)因為濃硫酸莫耳濃度是 18.40 M，基於方便取樣原則，我們先以 10ml 為間隔。

(四)承(三)，因為 30ml、40 ml 都產生了黑色氧化銅，故可知所求必須低於 30ml。

(五)承(四)，於是我們從 30 ml 遞減回來，每次減少 1ml，結果發現 27ml (0.497 莫耳) 是最佳的添加量。

(六)承(五)，有添加過適量硫酸的硫酸銅電鍍液（以下簡稱佳化電鍍液），其電鍍成品和純硫酸銅電鍍液（以下簡稱標準電鍍液）比起來，不但紅銅產量增加，鍍層的排列也更為緊密【參閱圖三十一】。

(六)綜上實驗數據可知：

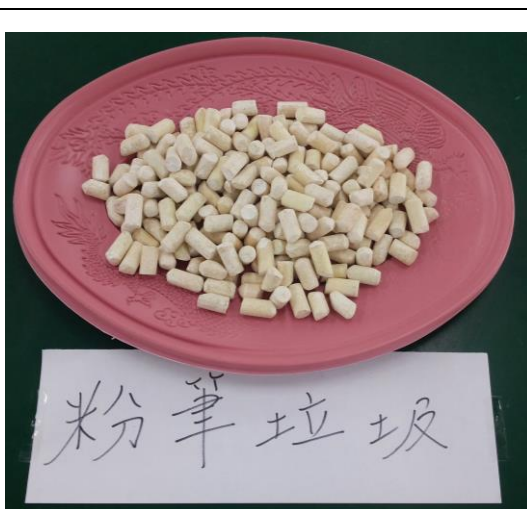
1.當硫酸莫耳數介於 0 ~ 0.497 莫耳→鍍層維持紅銅，且硫酸莫耳數愈大則紅銅質量愈大。

2.當硫酸莫耳數大於 0.497 莫耳→鍍層被污染。

(七)綜合上述討論可知，後續研究的硫酸（電鍍液添加物）莫耳數應控制為 0.497 莫耳。



圖三十一：取自【實驗五－2】正常銅釘，標準電鍍液、佳化電鍍液電鍍成品



圖三十二：取自【實驗六－1】，粉筆垃圾的實際狀況。

實驗六－1：製作「實用型粉筆電鍍裝置」並檢測其使用標準電鍍液時，「最大紅銅質量、通電時間、平均電流」的數值與發生條件

一.實驗設計：

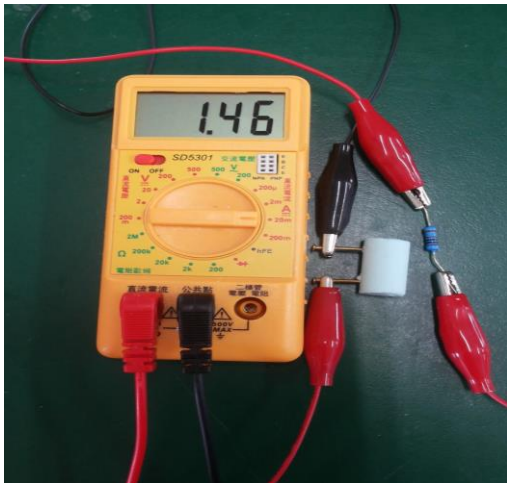
(一)所謂□M 標準電鍍液是指：準備□M 硫酸銅 500 毫升，把 10 隻粉筆靜置溶液中 24 小時；過程中持續維持液面高過粉筆頂端 5 cm 以上，且燒杯加封鋁箔以避免水分蒸發。

(二)由實驗二－1~四－4 可知，在沒有產生黑色氧化銅之前，若「粉筆電鍍裝置」想鍍得較多的紅銅，則：1.通電時間愈久愈好，2.通電電壓愈大愈好，3.硫酸銅濃度愈大愈好，4.粉筆長度愈大愈好，5.粉筆直徑愈大愈好，6.電極種類選銅釘較好，7.電極埋角愈大愈好，8.電極深度愈大愈好，9.電極距離愈小愈好。

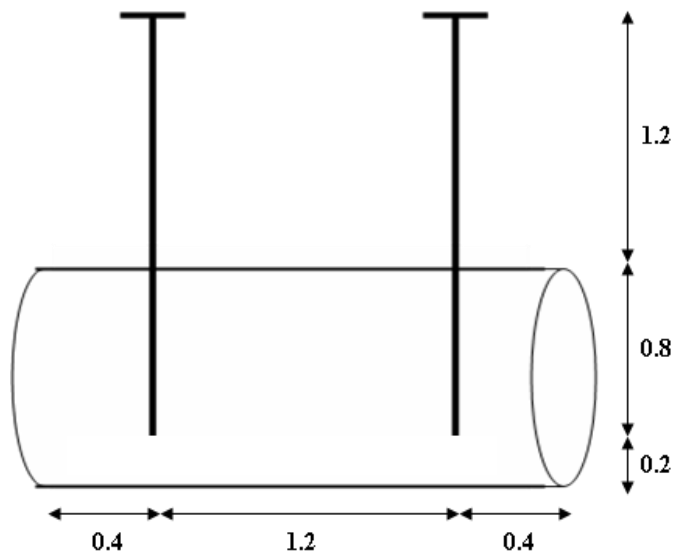
(三)因為「實用型粉筆電鍍裝置」是以環保、廢物回收為主要訴求，所以我們對變因的規

劃如下所述：

- 1.通電時間：通電時間比照實驗一設定為：0.5 分鐘、1 分鐘、1.5 分鐘、2 分鐘、2.5 分鐘、3 分鐘、3.5 分鐘、4 分鐘、4.5 分鐘、5 分鐘。
- 2.通電電壓：將電源應器換成「一顆電池」，所以我們限制通電電壓為 1.5V。
- 3.標準電鍍液的濃度：標準電鍍液是教科書指定的溶液－硫酸銅溶液，考慮到「實用型粉筆電鍍裝置」長度比「粉筆電鍍裝置」少許多，適合的硫酸銅濃度當然也只會更少；所以標準電鍍液濃度比照實驗一設定為：1 M、0.75M、0.5M、0.25M，並新增 0.125M。
- 4.粉筆長度：我們注意到一旦粉筆短於一個指節後教師通常不喜歡使用，而被回收到的粉筆垃圾，長度大部分接近 2 cm【參閱圖三十二】，所以我們限制粉筆長度為 2 cm。
- 5.粉筆直徑：同上，因回收的粉筆垃圾大多在使用時已被部分磨損，直徑大部分接近 1 cm【參閱圖三十二】，所以我們限制粉筆直徑為 1 cm。
- 6.電極種類：根據實驗四－1，電極種類限制為銅釘。
- 7.電極埋角：根據實驗四－2，電極埋角限制為 90 度。
- 8.電極深度：根據實驗四－3，電極深度本來應該是 1 cm，但因為太大的電極深度則會導致粉筆部分崩塌，所以我們限制電極深度為 0.8 cm。
- 9.電極距離：因為電極距離必小於粉筆長度（2 cm），考慮實務上的可外部性，我們設定為 1.2 cm、0.8 cm、0.4 cm。
- 10.由於「實用型粉筆電鍍裝置」電極距離太小，瞬間電流過大易導致紅銅轉變氧化銅。我們以三用電錶檢測「實用型粉筆電鍍裝置」，發現其最大電阻只有 974 歐姆（電極距離最大－1.2 cm，硫酸銅濃度最小－0.125M），為使電流減半，我們在電路中再多串聯一個 1000 歐姆電阻。



圖三十三：取自【實驗六－1】，實用型粉筆電鍍裝置的實際情況。



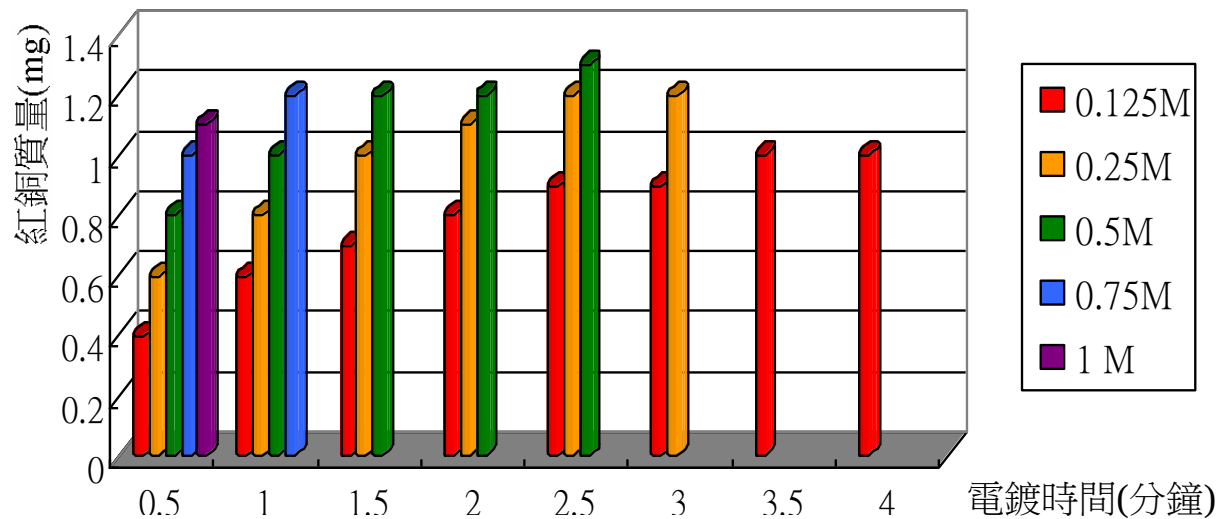
圖三十四：實用型粉筆電鍍裝置的構造示意圖

二.實驗數據：

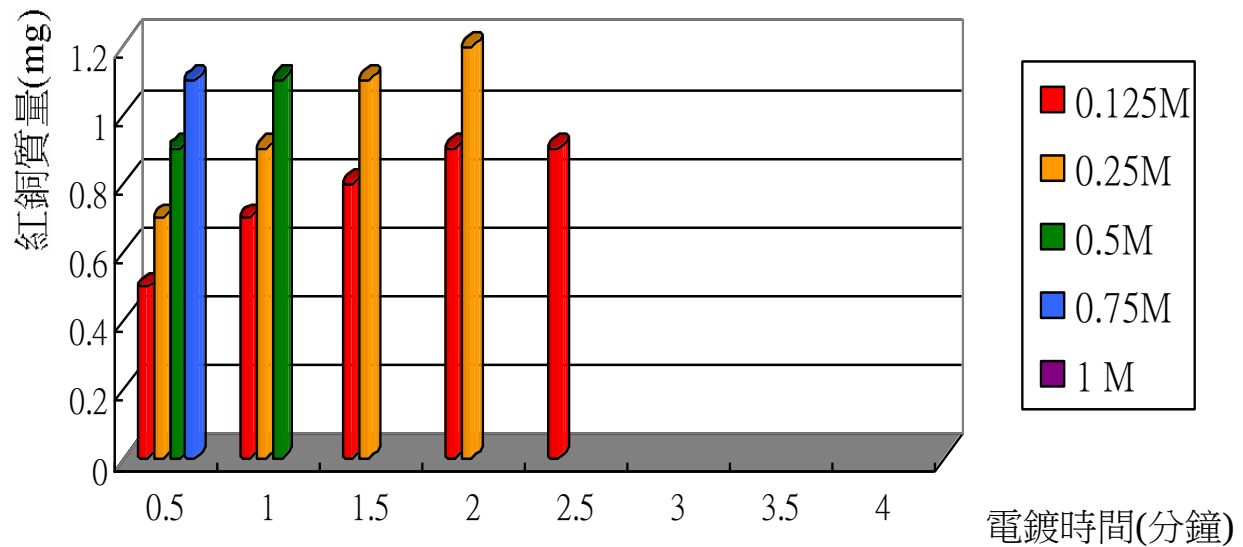
表十四：使用標準電鍍液之實用型粉筆電鍍裝置的平均電流、紅銅質量、鍍物描述
【表格內大字體是紅銅質量(mg)，較小字體(加框者)則是平均電流(mA)】

電極距離是 1.2 cm的實用型粉筆電鍍裝置（標準電鍍液）										
	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘	3 分鐘	3.5 分鐘	4 分鐘	4.5 分鐘	5 分鐘
0.125M	0.4 [5.31]	0.6 [5.05]	0.7 [4.77]	0.8 [4.46]	0.9 [4.03]	0.9 [3.47]	1.0 [3.38]	1.0 [2.92]	變黑	
0.25M	0.6 [7.69]	0.8 [7.08]	1.0 [6.33]	1.1 [5.41]	1.2 [4.26]	1.2 [3.62]	變黑			
0.5M	0.8 [9.32]	1.0 [7.58]	1.2 [6.73]	1.2 [5.45]	1.3 [4.42]	變黑				
0.75M	1.0 [9.87]	1.2 [7.73]	變黑							
1 M	1.1 [10.42]	變黑								
電極距離是 0.8 cm的實用型粉筆電鍍裝置（標準電鍍液）										
	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘	3 分鐘	3.5 分鐘	4 分鐘	4.5 分鐘	5 分鐘
0.125M	0.5 [6.12]	0.7 [5.86]	0.8 [5.47]	0.9 [4.71]	0.9 [4.17]	變黑				
0.25M	0.7 [9.67]	0.9 [6.82]	1.1 [7.58]	1.2 [6.39]	變黑					
0.5M	0.9 [10.56]	1.1 [7.95]	變黑							
0.75M	1.1 [10.88]	變黑								
1 M	變黑									
電極距離是 0.4 cm的實用型粉筆電鍍裝置（標準電鍍液）										
	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘	3 分鐘	3.5 分鐘	4 分鐘	4.5 分鐘	5 分鐘
0.125M	0.5 [8.68]	0.7 [7.12]	0.8 [5.51]	0.9 [4.75]	變黑					
0.25M	0.8 [10.56]	1.0 [8.92]	1.1 [6.65]	變黑						
0.5M	1.0 [10.74]	變黑								
0.75M	變黑									
1 M	變黑									

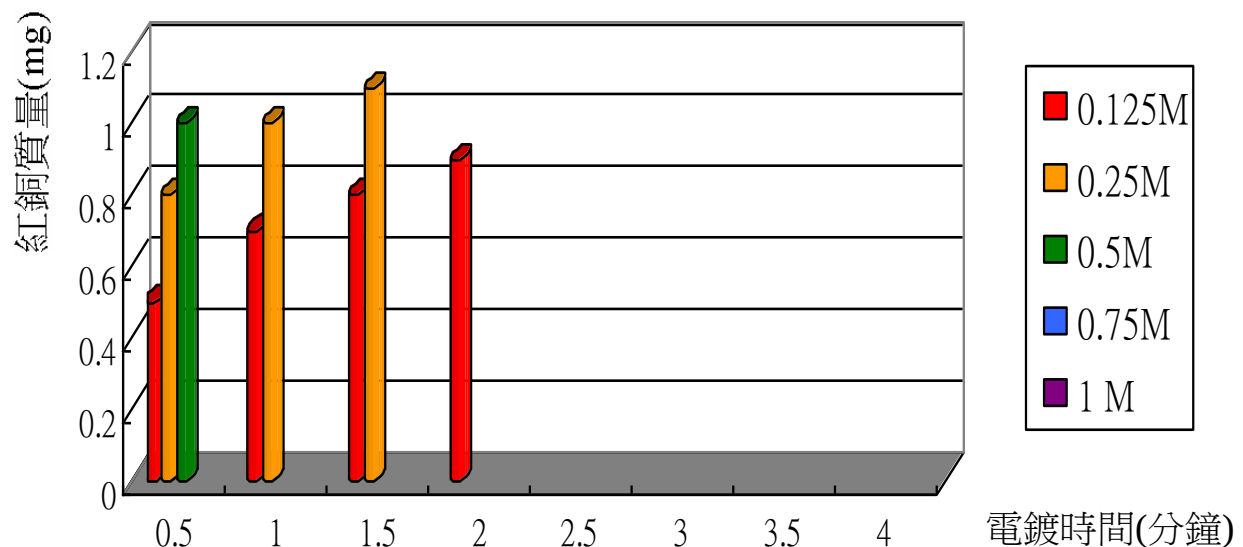
電極距離是 1.2 cm的實用型粉筆電鍍裝置（標準電鍍液）



電極距離是 0.8 cm的實用型粉筆電鍍裝置（標準電鍍液）



電極距離是 0.4 cm的實用型粉筆電鍍裝置（標準電鍍液）



三. 實驗討論：

- (一)一旦銅釘變黑（產生氧化銅），不但平均電流劇烈性變小（氧化銅難導電）而且目標物質－紅銅也會被汙染，我們視為「實驗終止」的訊號。
- (二)由實驗數據可知：
- 1.當電極距離、通電時間固定，若標準電鍍液濃度愈大→則紅銅質量愈大。
 - 2.當電極距離、標準電鍍液濃度固定，若通電時間愈大→則紅銅質量愈大。
 - 3.當通電時間、標準電鍍液濃度固定，若電極距離愈大→則紅銅質量愈小。
- (三)承(二)，實用型粉筆電鍍裝置產生最大紅銅質量的條件是：電極距離 1.2 cm，標準電鍍液濃度 0.5M，通電 2.5 分鐘→最大紅銅質量 1.3 mg【參閱圖三十五】。
- (四)由實驗數據可知：
- 1.對相同的標準電鍍液濃度而言，當電極距離愈大→最大通電時間愈大。
 - 2.對相同的電極距離而言，當標準電鍍液濃度愈大→最大通電時間愈小。
- (五)承(四)，實用型粉筆電鍍裝置達到最大通電時間的條件是：電極距離 1.2 cm，標準電鍍液濃度 0.125M→最大通電時間 4 分鐘。
- (六)承(五)，實用型粉筆電鍍裝置達到最大平均電流的條件是：電極距離 0.4 cm，標準電鍍液濃度 0.5M，通電 0.5 分鐘→最大平均電流 10.74 mA。

實驗六－2：製作「實用型粉筆電鍍裝置」並檢測其使用佳化電鍍液時，「最大紅銅質量、通電時間、平均電流」的數值與發生條件

一.實驗設計：

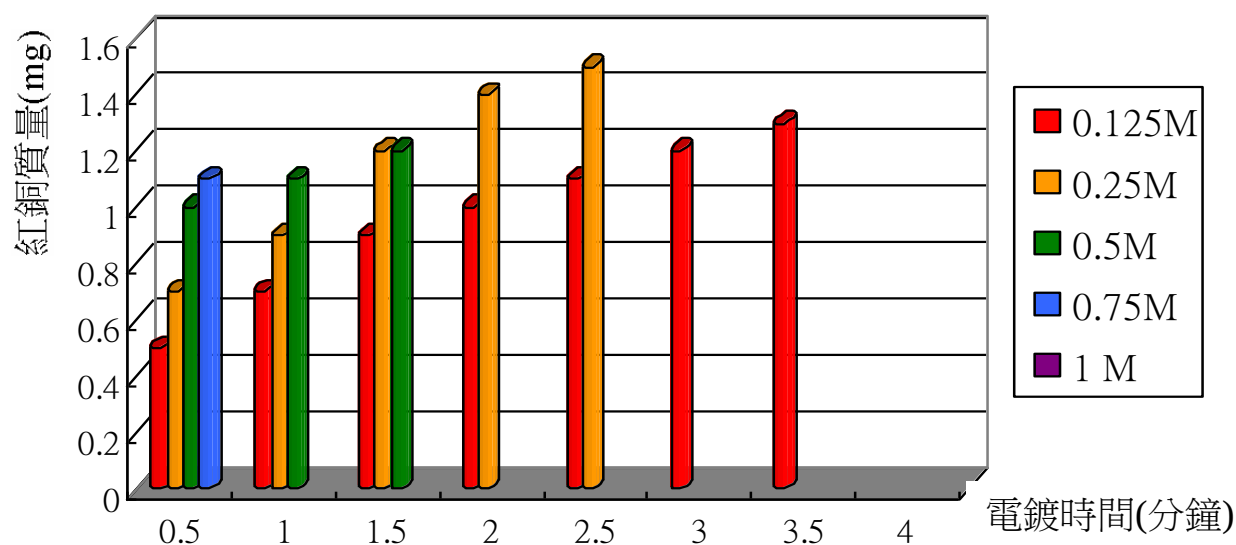
- (一)除了「標準電鍍液的濃度」外，所有變因的設定都與實驗六－1 相同。
- (二)所謂□M 佳化電鍍液是指：我們配置溶液時先以 400 毫升蒸餾水溶解掉「0.497 莫耳硫酸（即 27ml 的 98%濃硫酸）+□×125 克（□×0.5 莫耳）的五水合硫酸銅」，讓結晶水併入溶劑中，然後再加水到 500 毫升。

二. 實驗數據：

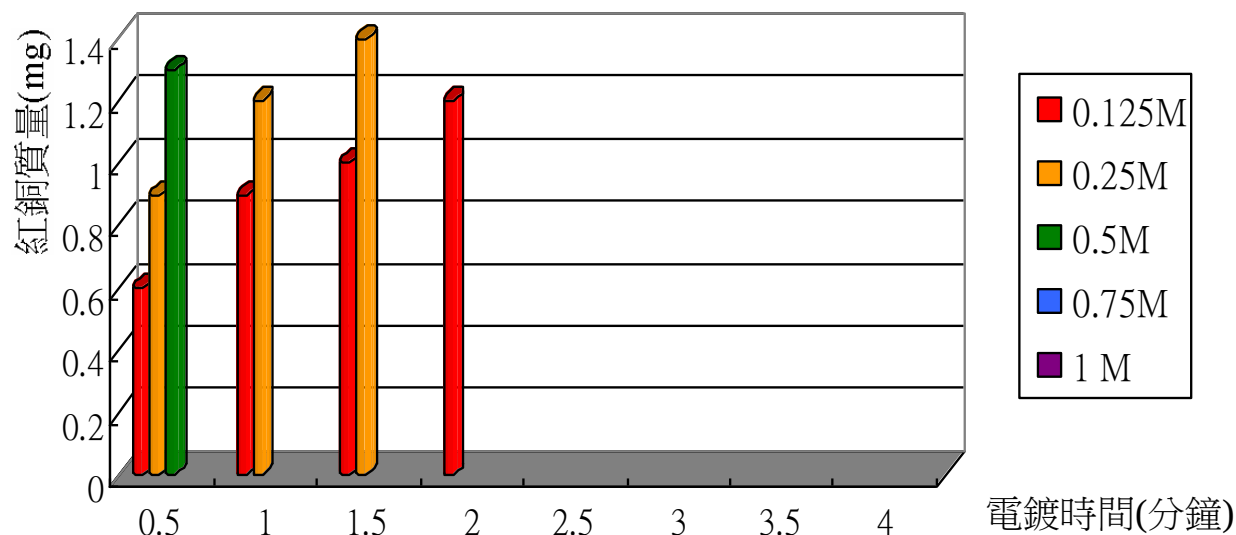
表十五：使用佳化電鍍液之實用型粉筆電鍍裝置的平均電流、紅銅質量、鍍物描述
【表格內大字體是紅銅質量(mg)，較小字體(加框者)則是平均電流(mA)】

電極距離是 1.2 cm的實用型粉筆電鍍裝置（佳化電鍍液）										
	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘	3 分鐘	3.5 分鐘	4 分鐘	4.5 分鐘	5 分鐘
0.125M	0.5 [6.74]	0.7 [6.48]	0.9 [6.07]	1.0 [5.54]	1.1 [5.03]	1.2 [4.46]	1.3 [3.89]	變 黑		
0.25M	0.7 [9.74]	0.9 [8.77]	1.2 [7.68]	1.4 [6.44]	1.5 [5.12]	變 黑				
0.5M	1.0 [11.28]	1.1 [10.24]	1.2 [8.75]	變 黑						
0.75M	1.1 [11.58]	變 黑								
1 M	變 黑									
電極距離是 0.8 cm的實用型粉筆電鍍裝置（佳化電鍍液）										
	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘	3 分鐘	3.5 分鐘	4 分鐘	4.5 分鐘	5 分鐘
0.125M	0.6 [7.58]	0.9 [7.33]	1.0 [6.93]	1.2 [6.35]	變 黑					
0.25M	0.9 [12.32]	1.2 [11.60]	1.4 [10.18]	變 黑						
0.5M	1.3 [13.91]	變 黑								
0.75M	變 黑									
1 M	變 黑									
電極距離是 0.4 cm的實用型粉筆電鍍裝置（佳化電鍍液）										
	0.5 分鐘	1 分鐘	1.5 分鐘	2 分鐘	2.5 分鐘	3 分鐘	3.5 分鐘	4 分鐘	4.5 分鐘	5 分鐘
0.125M	0.6 [10.97]	0.9 [9.04]	1.0 [7.04]	變 黑						
0.25M	1.0 [14.58]	變 黑								
0.5M	變 黑									
0.75M	變 黑									
1 M	變 黑									

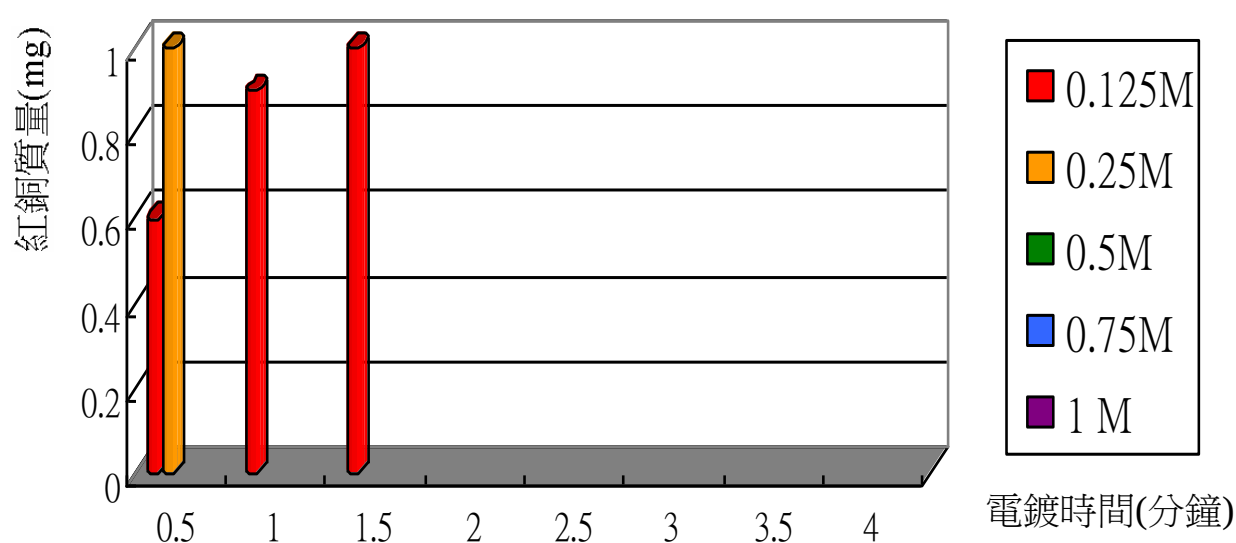
電極距離是 1.2 cm的實用型粉筆電鍍裝置（佳化電鍍液）



電極距離是 0.8 cm的實用型粉筆電鍍裝置（佳化電鍍液）



電極距離是 0.4 cm的實用型粉筆電鍍裝置（佳化電鍍液）



三. 實驗討論：

(一)與實驗六－1 相同，銅釘變黑視為「實驗終止」的訊號。

(二)由實驗數據可知：

- 1.當電極距離、通電時間固定，若佳化電鍍液濃度愈大→則紅銅質量愈大。
- 2.當電極距離、佳化電鍍液濃度固定，若通電時間愈大→則紅銅質量愈大。
- 3.當通電時間、佳化電鍍液濃度固定，若電極距離愈大→則紅銅質量愈小。

(三)承(二)，實用型粉筆電鍍裝置產生最大紅銅質量的條件是：電極距離 1.2 cm，

佳化電鍍液濃度 0.25M，通電 2.5 分鐘→最大紅銅質量 1.5 mg【參閱圖三十五】。

(四)由實驗數據可知：

- 1.對相同的佳化電鍍液濃度而言，當電極距離愈大→最大通電時間愈大。
- 2.對相同的電極距離而言，當佳化電鍍液濃度愈大→最大通電時間愈小。

(五)承(四)，實用型粉筆電鍍裝置達到最大通電時間的條件是：電極距離 1.2 cm，

佳化電鍍液濃度 0.125M→最大通電時間 3.5 分鐘。

(六)承(五)，實用型粉筆電鍍裝置達到最大平均電流的條件是：電極距離 0.4 cm，

佳化電鍍液濃度 0.25M，通電 0.5 分鐘→最大平均電流 14.58 mA。



圖三十五：相使用教科書電鍍裝置（標準電鍍液）的紅銅鍍層，原始銅釘，實用型粉筆筆電鍍裝置（標準電鍍液）的紅銅鍍層，實用型粉筆筆電鍍裝置（佳化電鍍液）的紅銅鍍層。

伍、研究結論

- 一、本研究將教科書的電鍍實驗裝置改良成具有下列特色的粉筆電鍍裝置：
 - (一)可攜性：裝置輕巧，攜帶方便。
 - (二)環保性：可用來回收廢液的銅離子（甚至可推廣到其他金屬離子）和粉筆垃圾。
 - (三)耐久性：置備好的粉筆電鍍裝置即使因為水分蒸發而乾涸，只要使用前（用滴管）回補水分即可。
 - (四)微型化：每次電鍍消耗的硫酸銅液量很少。
 - (五)精緻化：由於粉筆電鍍裝置的電阻大，流通電流小，鍍層排列緊密且幾乎沒被氧化，呈現漂亮的淡粉紅色；反之，教科書的電鍍裝置很難得到這樣的純銅鍍層。
- 二、本研究歸納出三種（外部性、鍍槽性、電極性），九項（通電時間、通電電壓、硫酸銅濃度、粉筆長度、粉筆直徑、電極種類、電極埋角、電極深度、電極距離）可能會影響粉筆電鍍裝置工作效率的變因後，「規律性、系統性」地逐一探討其數值與平均電流（電鍍速率指標）、紅銅質量（電鍍產量指標）的關係。
- 三、本研究測得粉筆電鍍裝置在「通電時間是 1.5 分鐘，通電電壓是 3V，硫酸銅濃度是 1M，粉筆長度是 8 cm，粉筆直徑是 1.2 cm，電極種類是銅釘，電極埋角是 90 度，電極深度是 1 cm，電極距離是 3 cm」時，電鍍附上的紅銅質量可達到最多。
- 四、本研究發現「電極是碳筆的粉筆電鍍裝置」兼可當作教具使用；除可觀察負極半反應 [附上紅銅]外，還可觀察正極半反應 [氧氣生成]。
- 五、本研究參考工業上的電鍍作法，測得適合粉筆電鍍裝置的電鍍液添加物—0.497 莫耳硫酸，並把標準電鍍液（硫酸銅）改良為佳化電鍍液（硫酸銅+硫酸）。
- 六、本研究根據粉筆垃圾的實際情況，製作出「實用型粉筆電鍍裝置」。
- 七、本研究以標準電鍍液、佳化電鍍液裝填實用型粉筆電鍍裝置後，分別測出其：
 - (一)最大紅銅質量的數值與發生條件。
 - (二)最大通電時間的數值與發生條件。
 - (三)最大平均電流的數值與發生條件。

陸、參考資料

- 一、胡喬淵、韓奐宇（民 93）。百變粉筆—粉筆在國中理化實驗課程中的運用。台北市：國立臺灣科學教育館。
- 二、康軒文教編輯委員（民 102）。國中自然與生活科技第六冊。新北市：康軒文教事業股份有限公司。
- 三、翰林文教編輯委員（民 102）。國中自然與生活科技第四冊。台南市：翰林文教事業股份有限公司。
- 四、蘇癸陽（民 70）。實用電鍍理論與實際。台南市：復文書局。

【評語】 030216

改良國中電鍍實驗，過程設計用心，然粉筆為常探討題材，若能選用其他未曾研究過之題材，可有更好佳績。