

# 中華民國第 56 屆中小學科學展覽會 作品說明書

---

高級中等學校組 化學科

佳作

050211

$\pm 10^{\circ}\text{C}$  的秘密

學校名稱：南投縣立旭光高級中學

作者：  高三 黃俊翰  高二 林育皚  高二 黃韋傑	指導老師：  李佩樺  陳英田
---	-----------------------------

關鍵詞：反應速率、阿瑞尼士公式、活化能

## 摘 要

廢棄乾電池之碳棒可為惰性電極之材料，鋅殼材質可當作一般鋅片使用，電解質經純化過程所得之錳氧化物，與一般實驗室之二氧化錳對雙氧水之分解催化能力相當。以電子天平連接電腦紀錄重量隨時間之損失量可用來定量一些化學反應之反應速率。反應溫度每升高 10℃，則反應速率增加 2 倍之說法有活化能大小及溫度適用之限制，利用阿瑞尼士方程式可計算出  $\text{MnO}_2$  催化  $\text{H}_2\text{O}_2$  之活化能值約 75 KJ/mole，鋅片加鹽酸活化能為 60KJ/mole，大理石加鹽酸之反應活化能值 41 KJ/mole。碘鐘反應微量化實驗有其實際執行上之困難，而以改良型光敏電阻實驗可得到此反應速率定律式為  $r=k [\text{IO}_3^-][\text{HSO}_3^-][\text{H}^+]$ ，且該反應之活化能為 34.7 KJ/mol，而在溫度 20.4℃ 升高至 29.4℃ 時，理論與實驗皆證實其反應速率增加為 1.5 倍。

## 壹、研究動機

自從進入科學研習社之後，我們便持續研究廢棄碳鋅電池的再利用，到了高二之後更是在化學反應速率方面著實有興趣，在高中化學課本提到提倡及推廣 4R 的辦法，即 Reduce、Reuse、Recycle 及 Regenerate；因此廢棄乾電池的再利用研究即是我們實踐結合課本理論與實際生活的驗證，而廢棄碳鋅電池中電解質對環境的污染最為嚴重，所以我們便選擇廢電池之回收再利用此題材為出發點，在瞭解了廢棄乾電池之構造後，即著手瞭解整個乾電池可回收之部分，更針對電解質中之回收錳氧化物作更深入之瞭解與探討，除了要驗證課本中所學之化學反應速率之問題外，更欲嘗試使廢棄乾電池之回收再利用之剩餘價值再升級。

## 貳、研究目的

- 一、瞭解乾電池之組成，將拆解下來之碳棒為電解池電極之利用，另外在固定電壓下，將廢電池碳棒排成行列狀，探討其兩面承受壓力大小與電流大小之關係，探討廢棄乾電池碳棒再利用之可行性。
- 二、將拆解下來之金屬外殼作分類，將屬於鋅材質之金屬材料與一般實驗室購買之鋅片作一化性分析比較其差異，探討廢棄乾電池金屬外殼再利用之可行性。
- 三、瞭解乾電池之電解質組成成份，將其中二氧化錳分離純化出來並探討分離純化效果與二氧化錳再利用之可行性。
- 四、結合高中課程，探討從廢棄乾電池分離純化之錳氧化物催化雙氧水之化學反應速率，從其中瞭解反應速率基本原理並驗證課堂所學之阿瑞尼士公式。
- 五、以高中課本秒錶反應(碘鐘反應)驗證溫度升高 10℃，反應速率是否增加 2 倍。

## 參、研究設備與器材

- 一、**實驗器材**：各式量筒、量瓶(500ml、1000ml)及燒杯、鱷魚夾、廢棄碳鋅乾電池、針筒、三向閥、熱溶膠、尺、塑膠管、乾電池、C型夾、波以耳氣壓計、濾紙、漏斗、玻棒、五金工具。
- 二、**實驗藥品**：二氧化錳( $\text{MnO}_2$ )、30%過氧化氫( $\text{H}_2\text{O}_2$ )、氫氧化鈉( $\text{NaOH}$ )、12M鹽酸( $\text{HCl}$ )、12M硫酸( $\text{H}_2\text{SO}_4$ )、亞硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ )、硫代硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ )、焦亞硫酸鈉( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$ )、碘酸鉀( $\text{KIO}_3$ )、大理石( $\text{CaCO}_3$ )、澱粉。
- 三、**儀器設備**：電源供應器、恆溫烘箱、恆溫水槽、電子溫度計。
- 四、**測量工具儀器**：游標卡尺、電子天平、萬用電表、碼錶、電腦。

## 肆、研究步驟與方法

將回收之廢棄乾電池拆解之後分類，分成正極碳棒、負極鋅殼與電解質(含二氧化錳)三部分，我們根據研究目的與所欲探討之問題，設計實驗步驟與流程圖如圖 1。

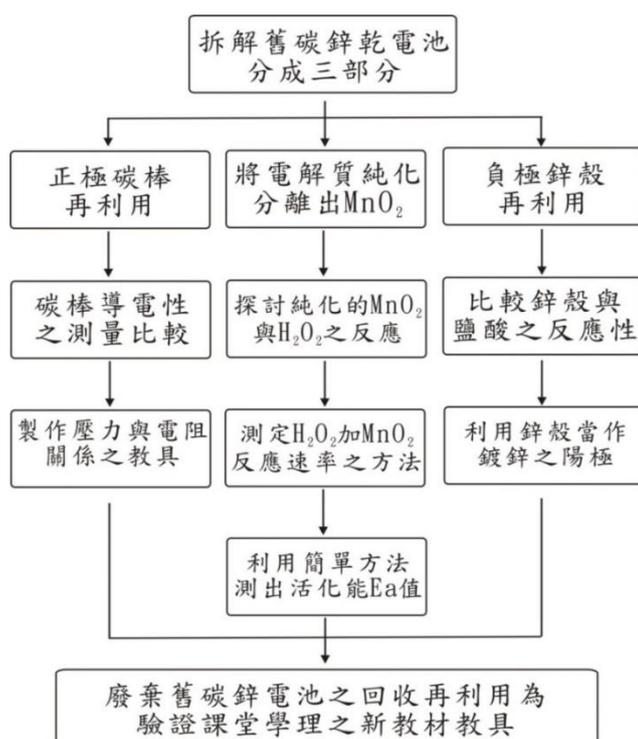


圖 1、實驗流程圖。

### 一、廢棄舊碳鋅乾電池之碳棒再利用。

#### (一) 碳棒導電性之測量。

1. 碳棒是唯一可以導電之非金屬，又具有惰性不易與其他物質產生化學反應，因此常用來當作電解池與電池之電極。
2. 使用三用電表測量拆解廢棄碳鋅電池內的碳棒之導電性並與學校實驗室用碳棒作一性質比較。

(二) 考慮碳棒之特殊性質，設計利用壓力之改變方式來影響電流之實驗。

1. 利用原理：碳棒是導電之非金屬具有比金屬柔軟之性質，其導電性會因為接觸面積之不同而有所改變，接觸面積愈大電阻愈低，電流就愈大，而圓形碳棒之間的接觸面積可由藉由外加壓力來改變，碳棒之間又具有恢復彈性，故可將碳棒數個整齊排列增加接觸面積之改變量藉以改變其電阻值。

2. 步驟：

- (1) 將廢棄之乾電池碳棒拆解下來，先以砂紙磨光表面乾燥後取長度 2.50 公分，直徑 0.8 公分。
- (2) 依序將 10 根上述製備之小碳棒整齊黏貼在小直尺上，放入 50ml 針筒中備用。
- (3) 在第一根及最後一根的小碳棒拉出導電，再接通電源（3V）及萬用電表。
- (4) 將針筒裝置放入 C 型夾中固定，依序每次旋入一圈，紀錄每次旋入一圈之電流變化值，裝置如圖 2。

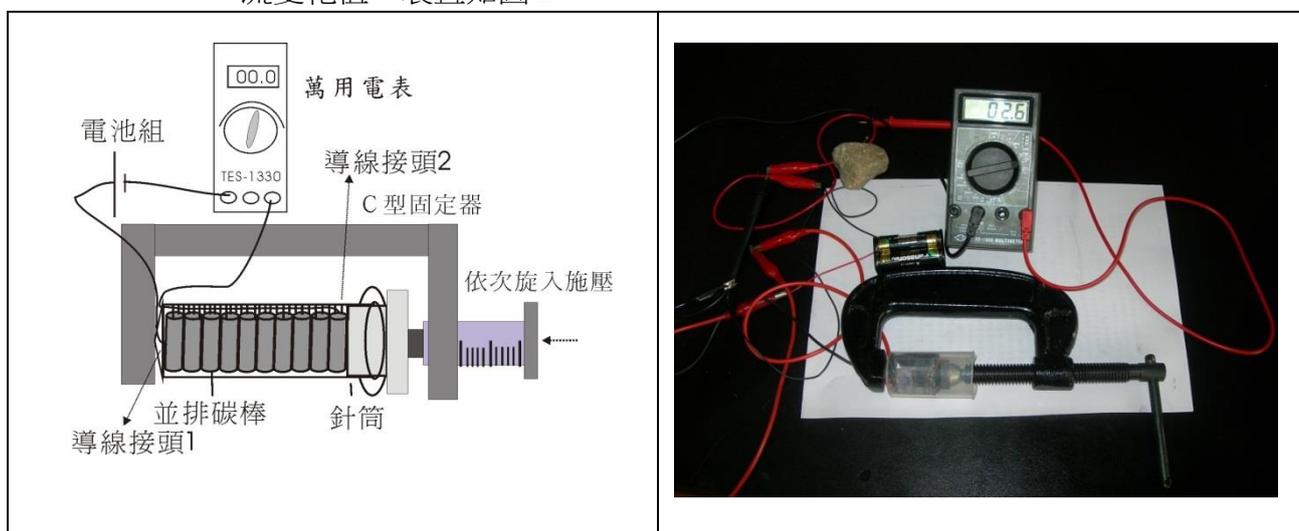


圖 2、以不同壓力之變化來改變電流大小之實驗示意圖。

二、 廢棄舊碳鋅電池之鋅殼再利用。

(一) 分類拆解乾電池之鋅殼與金屬外殼，鋅殼保留為實驗用，鐵質外殼資源回收。

(二) 將鋅殼與實驗室鋅片等量（各 1 cm<sup>2</sup> 共 10 片）測試與 30 ml 3 M 的鹽酸反應產生氫氣之速率比較（ $Zn_{(s)} + 2HCl_{(aq)} \rightarrow ZnCl_{2(aq)} + H_{2(g)}$ ），以排水集氣法，測量產生 200 ml 氫氣之反應速率快慢(圖 3)。

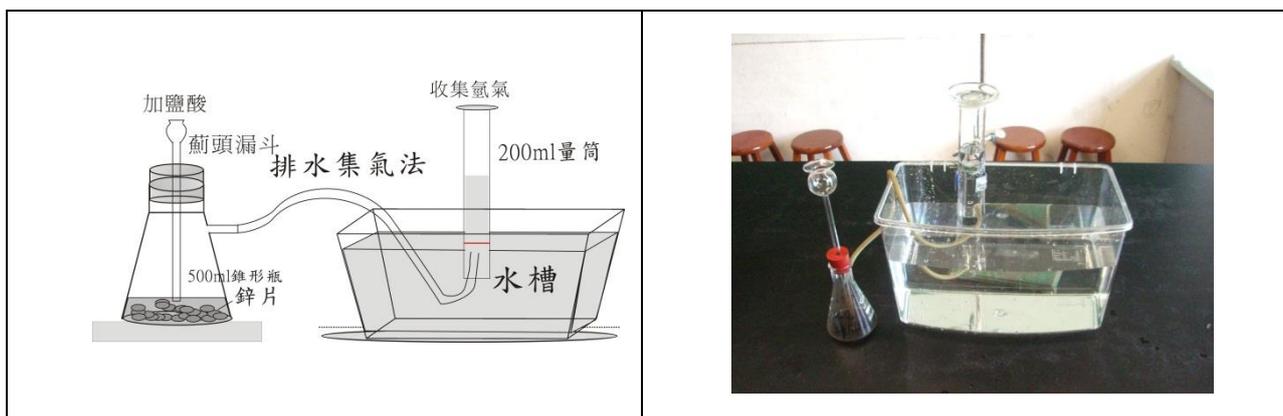


圖 3、測量鋅加鹽酸產生氫氣之反應速率比較實驗裝置圖示。

(三) 在銅片上電鍍鋅之實驗中，將鋅殼放在陽極，以 0.5M 硝酸鋅為電鍍液，固定電壓 2.0V、電鍍 10 秒後火烤 20 秒，觀察並記錄之，測試利用鋅殼之可能。

三、 從舊碳鋅電池之電解質中分離純化製備二氧化錳。

(一) 比較舊碳鋅電池電解質與實驗室藥用二氧化錳催化雙氧水分解之能力。

1. 依據高中基礎化學課本，乾電池電解質之組成有氯化銨、氯化鋅、二氧化錳與糊狀澱粉質，又電池放電之反應式  $2\text{MnO}_2(\text{s}) + 2\text{NH}_4\text{Cl}(\text{aq}) + \text{Zn}(\text{s}) \rightarrow \text{Mn}_2\text{O}_3(\text{s}) + 2\text{NH}_3(\text{aq}) + \text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{ZnCl}_2(\text{aq})$ ，其中氯化銨及氯化鋅為可溶，澱粉嘗試用火烤及乾餾去除，因此多次純化分離後，需考量的只剩下  $\text{MnO}_2$  及  $\text{Mn}_2\text{O}_3$ 。
2. 我們分別利用硫代硫酸鈉還原劑及濃硫酸氧化劑來比較其催化能力之改變。
3. 依據  $2\text{H}_2\text{O}_{2(\text{aq})} \xrightarrow{\text{MnO}_2} 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_{2(\text{g})}$  之反應，選擇多次純化分離、亞硫酸鈉氧化、濃硫酸氧化與實驗室藥用四種二氧化錳分別定量 1g 加入 30% 15ml 的雙氧水加入 40ml 水中，測量生成 500ml 氧氣所需之時間，比較其反應速率之差異。

(二) 嘗試尋找合適之測量產生氣體反應速率之方法。

(以  $2\text{H}_2\text{O}_{2(\text{aq})} \xrightarrow{\text{MnO}_2} 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_{2(\text{g})}$  為例)

1. 一般排水集氣法。

實驗裝置如上圖三，依據化學反應排氣量之多寡決定集氣瓶之大小，在收集一定量之氣體後，計算所需之時間，反應速率以氧氣產生速率來表示為  $R_{\text{O}_2} = \Delta V / \Delta t$ 。

2. 波以耳壓力計。

實驗裝置如圖 4，依據波以耳公式 ( $PV=K$ )，以產生氧氣所造成之壓力變化為反應速率表示為  $R_{\text{O}_2} = \Delta P / \Delta t$ 。

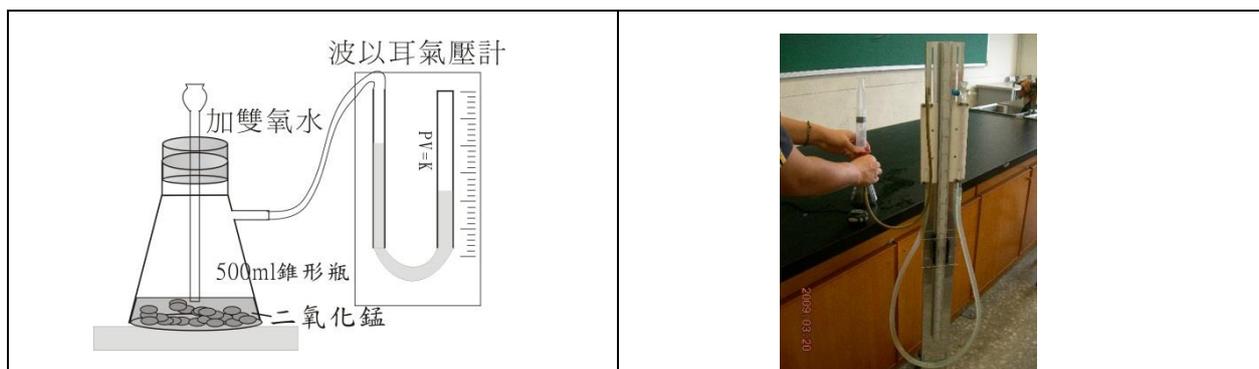


圖 4、以波以耳壓力計測量反應速率實驗裝置圖示。

3. 養樂多針筒型。

依據第四十二屆科展，宏仁國中提到以針筒改良為新型之雙氧水分解反應器(圖 5)，利用針筒之密閉設計產生微量氣體之實驗裝置，反應速率式表示為

$$R_{O_2} = \Delta V / \Delta t$$

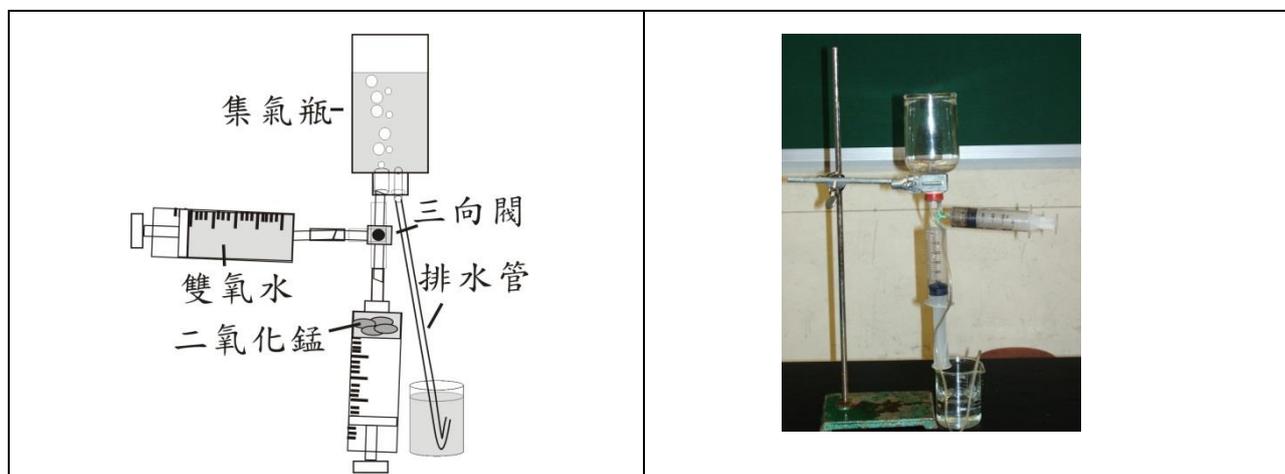


圖 5、針筒型測量反應速率實驗裝置圖示。

4. 改良型排水集氣法。

實驗裝置如圖 6，依據標準型排水集氣法薊頭漏斗密閉不佳所設計改良，反應速率式表示仍為  $R_{O_2} = \Delta V / \Delta t$ 。

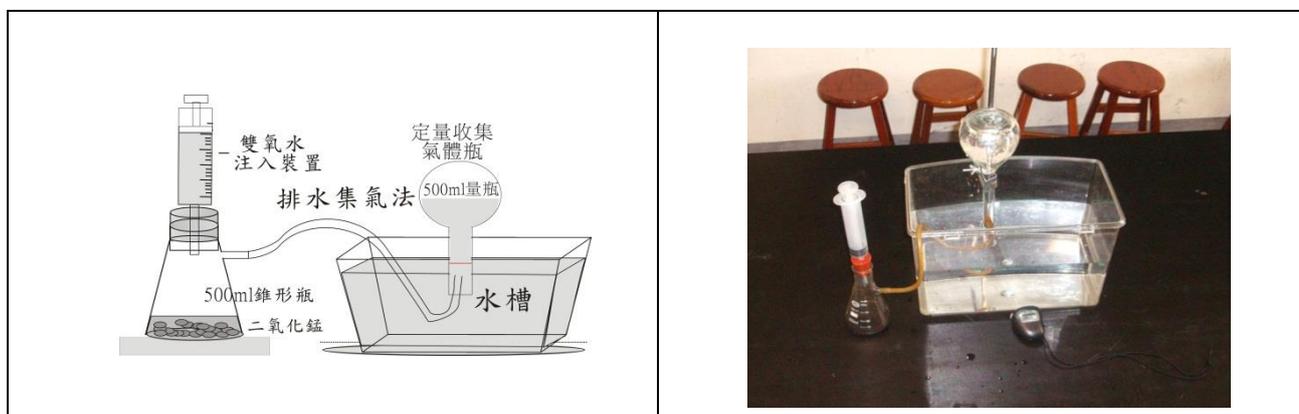


圖 6、針筒型測量反應速率實驗裝置圖示。

5. 製作控制溫度之水浴槽實驗裝置。

實驗裝置如圖 7，依據第 44 屆全國科展化學科高中組，不鳴則矣，一觸驚人之作品及 John H. Bedenbaugh 等人於 1988 年的著作改製，原設計為單位時間液滴移動之距離，我們發現移動固定距離不易測量，故更改為測量固定紅墨水之體積再測量所花費之時間，此設計的好處為可以讓反應在一固定溫度水浴槽中進行反應，水浴槽中的水可以吸收一些反應熱，故可以控制反應溫度，此反應速率式可以表示為  $R_{O_2} = \Delta V / \Delta t$ （意即  $R_{O_2} = \Delta n_{O_2} / \Delta t$ ）。

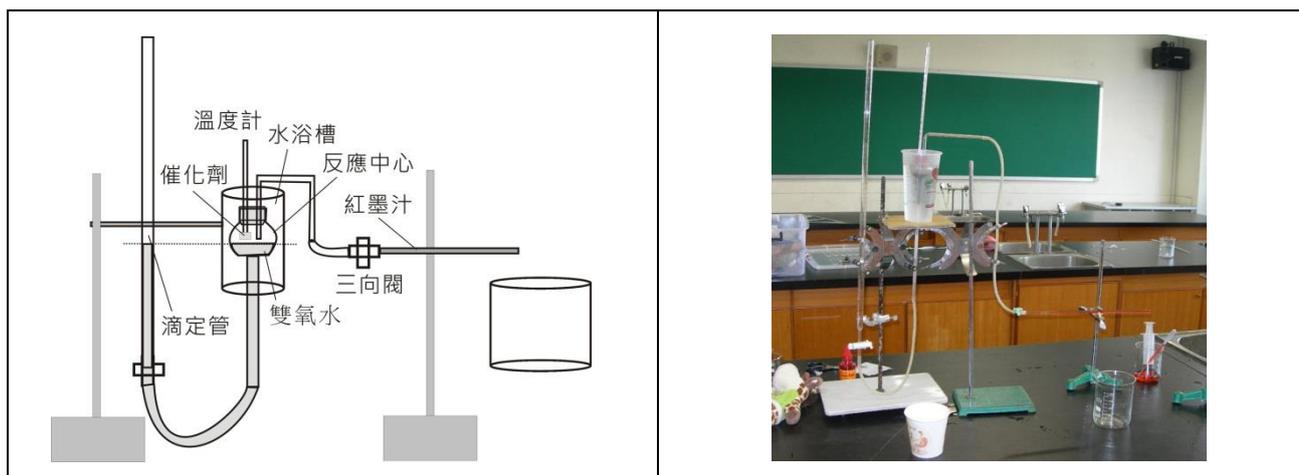


圖 7、製作控制溫度之水浴槽實驗裝置圖示。

6. 電子天平連接電腦直接測重量變化(圖 8)。

因想到只要可以精準測量到氧氣跑掉之重量損失，就可以定量反應速率，因此可考慮利用電子天平之 RS-232C 連接到電腦之裝置，甚至可以製作水浴槽來控制反應環境之溫度，表示方式可為氧氣重量變化或換算莫耳數變化  $R_{O_2} = \Delta n / \Delta t$ 。

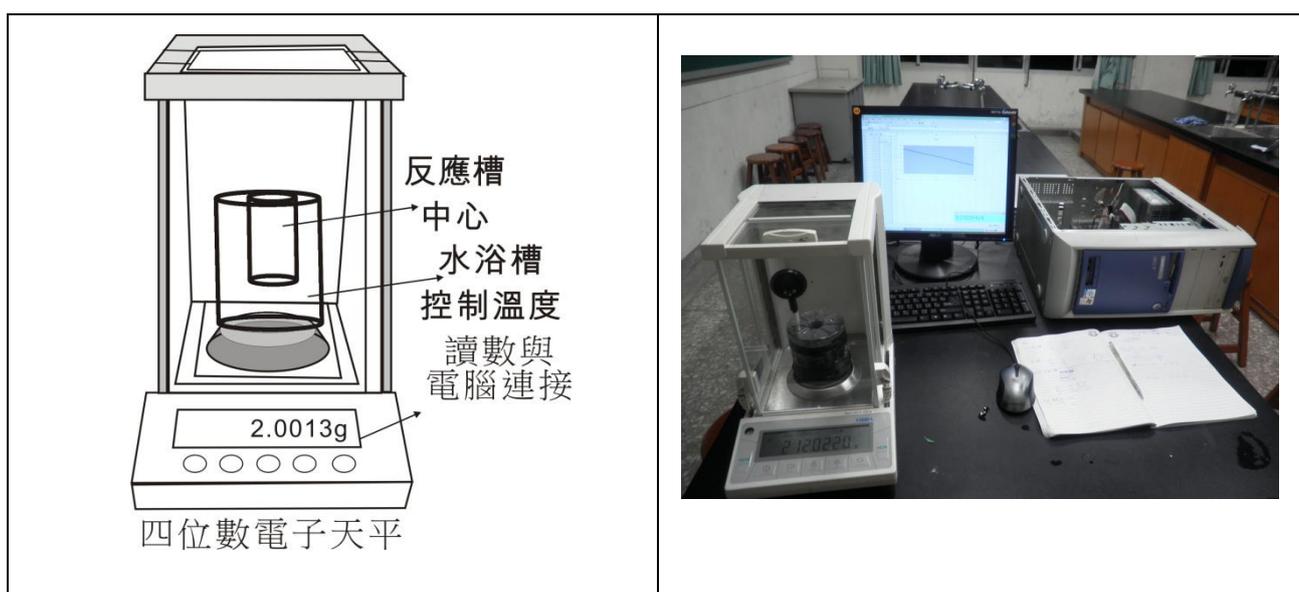
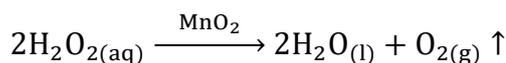


圖 8、電子天平連接電腦直接測重量變化圖示。

四、利用阿瑞尼士方程式( $k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$ )，探討計算出反應活化能( $E_a$ )之可能。

- (一) 高二所學化學反應速率表示為  $R = k[A]^n[B]^m$ ，因此知道反應速率受到濃度與反應速率常數  $k$  之影響，而  $k$  又具備阿瑞尼士方程式之特徵 ( $k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$ )。
- (二) 已知催化劑可降低活化能，溫度只是改變分子動能分佈，溫度每升高  $10^\circ\text{C}$ ，反應增快 2 倍，依據阿瑞尼士公式，溫度影響了反應速率常數，故以第 4 種之改良型排水集氣法在恆溫水槽中，分別以  $30^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ 、 $50^\circ\text{C}$  的溫度環境進行反應並測量反應速率，即可找出溫度對此反應之影響，甚至找出此反應之活化能( $E_a$ )值。
- (三) 另外考慮化學反應一定伴隨著熱量變化，因此恆溫水浴槽的設計不可忽略，因此我們以第 6 種電子天平連接電腦直接測重量變化再加裝水浴槽實驗裝置，設計以下三種在高中化學課本常見可由重量變化來求其化學反應速率之實驗，並以溫度為實驗操作變因，看看是否溫度在化學反應中的效應確實為溫度升高  $10^\circ\text{C}$ ，則反應增加 2 倍？並嘗試計算出各反應之反應活化能( $E_a$ )值並比較溫度對其之影響。

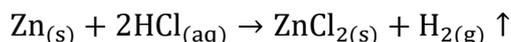
1. 雙氧水加二氧化錳。



2. 大理石加稀鹽酸。

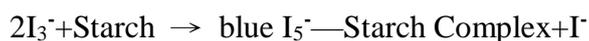
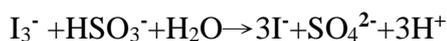
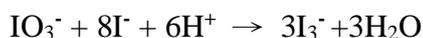


3. 鋅粉加稀鹽酸。



(四) 筆者剛好參加 104 年學科能力競賽化學科組別，在題目中的一題提到以微量計算秒錶反應之活化能，正好想到以此為驗證。

碘鐘反應：



其中  $\text{HSO}_3^-$  可由焦亞硫酸鈉與水反應而得（空氣中的  $\text{NaHSO}_3$  不穩定）



1. 該年題目是以微量實驗探究碘鐘實驗的化學動力學，實驗之步驟與特色是利用滴管使用滴數來進行實驗。首先需要找 PE 滴管一滴水之體積，經操作實驗證明一滴約是  $1/20 \text{ ml}$ 。

2. 接著需利用滴管吸取所需藥品完成測定反應級數和計算速率定律式，我們仿該題目使用之作法，並以高中課程基化(三)秒錶反應實驗配製以下之溶液進行實驗。

A 液 (KIO<sub>3</sub> 4.3 克加水配成 1 升)

$$[\text{KIO}_3] = \frac{4.3/214}{1} = 0.02 \text{ (M)}$$

B 液 (焦亞硫酸鈉 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 0.6 克，可溶性澱粉 4 克，1.0 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 5 mL 最後加水配成 1 升)

$$[\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5] = \frac{0.6/190}{1} = 0.0032 \text{ (M)}, \text{ 因 Na}_2\text{S}_2\text{O}_5 \text{ 溶於水生成 NaHSO}_3,$$

Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> + H<sub>2</sub>O → 2 NaHSO<sub>3</sub>，故 [NaHSO<sub>3</sub>] = 0.0032 × 2 = 0.0064 (M)。

3. 再以滴管以滴數為單位，完成測定反應級數和計算速率定律式最少四次之實驗數據，每次試驗的總滴數為 12 滴，完成碘鐘反應速率定律式之測定後分析討論。

## 伍、結果與討論

一、廢棄碳鋅乾電池之碳棒再利用。

(一) 碳棒導電性之測量。

以三用電表測量實驗室碳棒發現其電阻為 1.2Ω，廢電池碳棒為 0.99Ω。二者之導電性相近。

(二) 設計利用壓力之改變方式來影響電流之實驗結果。

1. 根據實驗結果整理如圖 9 所示，結果發現當 C 型固定夾旋入時，意即壓力愈大時，電流值確實愈大，應是壓力造成碳棒與碳棒之間接觸面的大小產生變化，也就是改變接觸電阻，意即壓力愈大，接觸面積愈大，電阻愈小，電流就愈大。

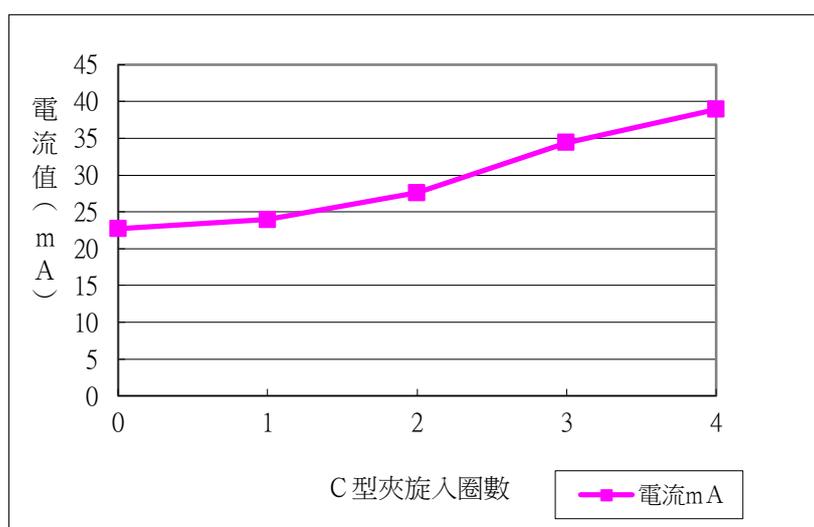


圖 9、C 型固定夾每旋入一圈之不同之壓力與電流值之關係圖。

2. 我們將萬用電表改成小燈泡，然後以手取代 C 型夾，當手壓下針筒時，燈泡就會變亮，手一鬆開，針筒就恢復原狀，燈泡也就恢復原來之亮度 (圖 10)。

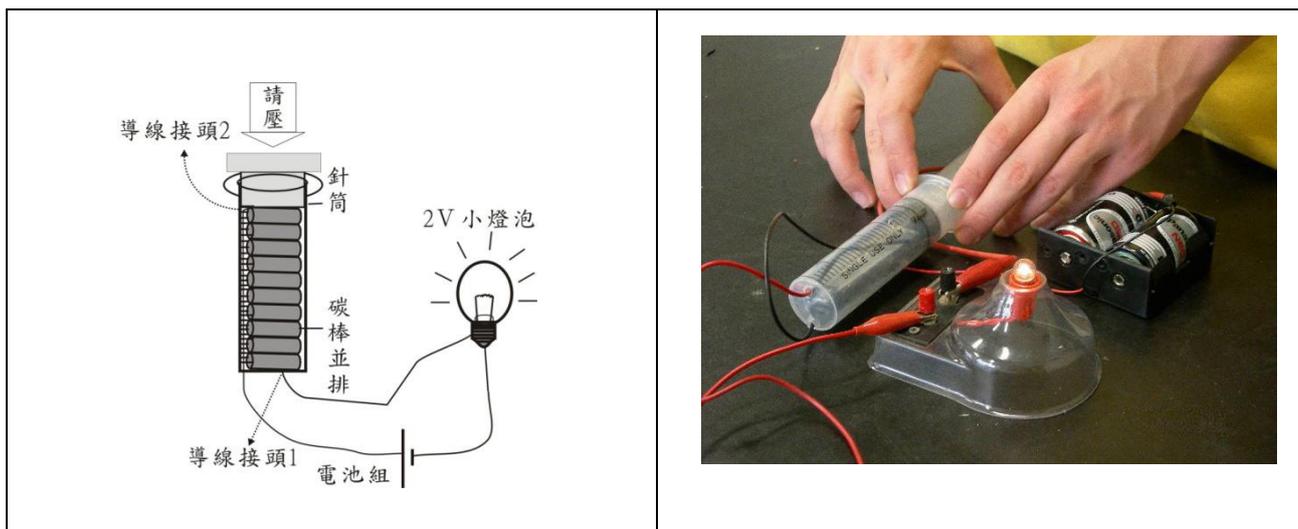


圖 10、不同壓力造成碳棒電阻不同之演示。

## 二、廢棄碳鋅電池之鋅殼再利用。

(一) 乾電池之組成如圖 11，可將鐵質金屬外殼資源回收，鋅殼可與鹽酸進行產生氫氣之反應。

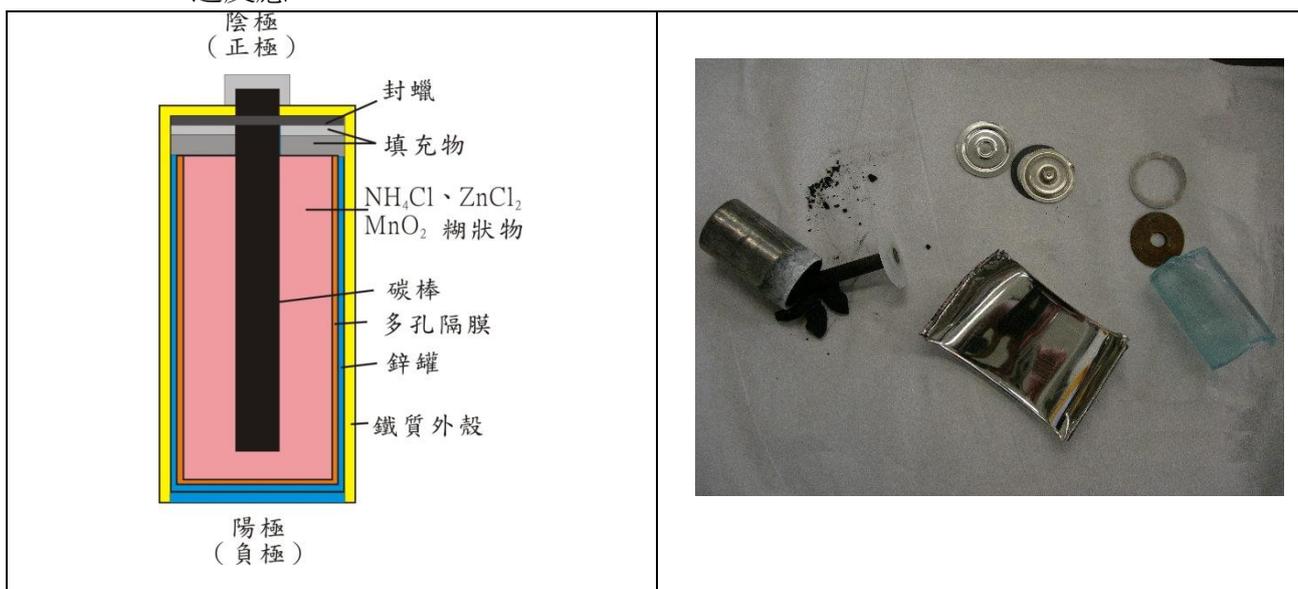


圖 11、乾電池之組成。

(二) 將鋅分別實驗室鋅片約 3.0g、以砂紙磨過之鋅殼約 3.0g (各 1 cm<sup>2</sup> 共 10 片) 測試與 30 ml 3 M 的鹽酸反應產生氫氣之速率，以電池鋅殼進行三次收集時間比較結果如圖 12。觀察到鋅片與鹽酸開始反應後，質量多之鋅片仍能繼續反應持續產生氫氣，且電池回收之鋅片經磨光後，其與鹽酸反應產生氫氣之效果可跟實驗室購買之鋅片與鹽酸反應產生氫氣效率所差無幾。

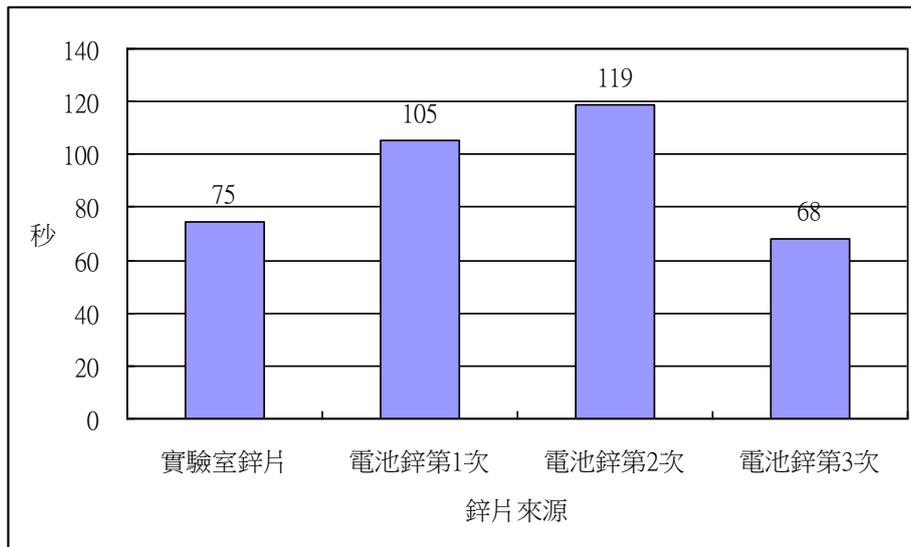


圖 12、以 10 片 1cm<sup>2</sup> 鋅片收集 200 ml 氫氣所需之時間比較圖。

- (三) 以鋅殼為陽極在銅片上實施以 2.0V、電鍍 10 秒，在火上烤 20 秒，結果呈現金黃色之黃銅，鋅殼之再利用確實可行（圖 13）。

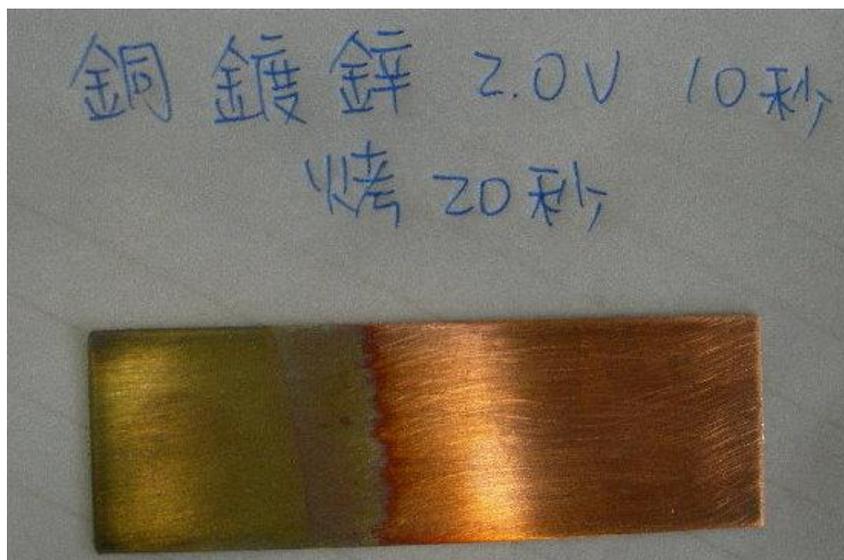


圖 13、鋅殼為陽極，銅片電鍍鋅，冶金製造出黃銅。

### 三、從舊碳鋅電池之電解質中分離純化製備二氧化錳。

- (一) 比較舊碳鋅電池電解質與實驗室藥用二氧化錳催化雙氧水分解之能力。定量比較實驗室藥用 MnO<sub>2</sub>、電解質純化分離出之錳氧化物、分離出之錳氧化物分別加硫代硫酸鈉還原劑及加濃硫酸氧化劑之四種催化劑催化分解雙氧水之反應速率。結果如圖 14，可以發現純化分離出之電解質錳氧化物依舊有相當的催化能力，而經過濃硫酸之氧化劑氧化過後呈現較為穩定之反應速率，不會忽快忽慢，尤其反應更為快速，研判因為  $Mn_2O_3 + H_2SO_4 \rightarrow MnO_2 + MnSO_4 + H_2O$  之反應，因此可以有效活化錳氧化物成四價錳，獲得更好之催化效果。

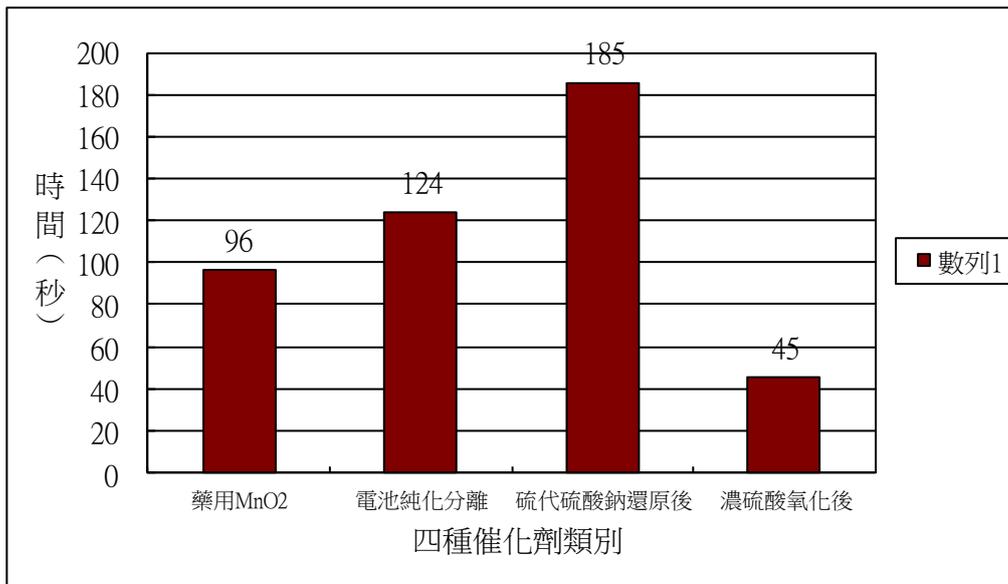
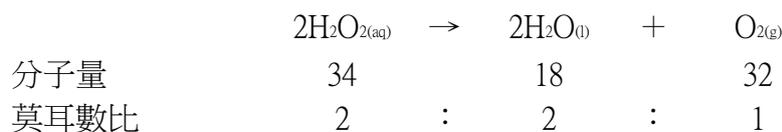


圖 14、四種錳氧化物催化雙氧水之分解速率比較。

(二) 比較幾種測量產生氣體反應速率之方法。

1. **一般排水集氣法**：誤差較大，比較不穩定且實驗值再現性不佳。
2. **波以耳壓力計**：依據  $P_1V_1 = P_2V_2$  一開始確實觀察到壓力變化，但是反應進行數秒後壓力增加太大，甚至塑膠管發生爆裂，因此不適用。
3. **養樂多針筒型**：號稱微型實驗器，但是發現微量之實驗不易，且因為量少凸顯人為觀察測量或人為誤差更容易造成數值錯誤，實驗值並不可靠。
4. **改良型排水集氣法**：目前較為可行之方式，可以避免一般型排水集氣法之缺點，又容易觀察，本實驗一開始之數據皆來自於此裝置。
5. **製作控制水溫之水浴槽實驗裝置**：可發現當放入催化劑會有擠壓反應室之問題，造成還未反應出氣體其中固定液滴指標就被擠出，且固定液滴逸出之距離不易測量。將實驗測量裝置改成排固定紅墨水體積所耗之時間，計算排出固定紅墨水體積之時間反而較為可行。
6. **電子天平加 RS-232C 連接電腦之方式**：雙氧水分解如下式，故只要測量氧氣之損失重量變化即可換算莫耳數變化量，即可正確測量反應速率，加上水浴反應槽之設計，除可以設定反應溫度之外，水更可以吸收反應熱，故可以幫助操縱溫度參數之改變。



四、利用阿瑞尼士方程式( $k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$ )，探討計算出反應活化能( $E_a$ )之可能。

(一) 由速率定律式而言， $R = k [A]^m[B]^n$ ，依據阿瑞尼士方程式  $k = Ae^{-E_a/(RT)}$ ( $k$  為速率常數， $e$  為自然對數， $A$ 、 $R$  對一定值)，今有兩不同溫度  $T_1$  及  $T_2$  ( $T_2 > T_1$ )，故不同溫度有不同之反應速率常數  $k_1 = Ae^{-\frac{E_a}{RT_1}}$ 、 $k_2 = Ae^{-\frac{E_a}{RT_2}}$ ，取自然對數值：

$$\ln k_1 = \ln A - \frac{E_a}{RT_1} \quad \ln k_2 = \ln A - \frac{E_a}{RT_2} \rightarrow \ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$$

因此我們可知道反應速率常數除了受溫度之影響外，活化能值( $E_a$ )也很重要，而依據以上推論，只要在不同溫度求出不同之  $k$  代入上式即可計算出  $E_a$ 。

(二) 嘗試找出反應  $2H_2O_2(aq) \xrightarrow{MnO_2} 2H_2O(l) + O_2(g) \uparrow$  的活化能( $E_a$ )值。

1. 依據以上步驟(一)之推論，我們先利用第4種改良型排水集氣法，讓反應在不同水浴溫度下(30°C、40°C及50°C)且利用不同之  $H_2O_2(aq)$  之濃度，分別測量其反應速率  $R$  值，首先固定溫度下，依據  $H_2O_2(aq)$  之濃度值之改變與反應速率的關係，可求得此反應之反應級數為一級  $R = k[H_2O_2]^1$ ，依據實驗數據代入上步驟(一)之公式，可以得到  $T_1$  下之  $k_1$  值以及  $T_2$  下之  $k_2$  值，可以得到利用

$$\ln \left( \frac{k_2}{k_1} \right) \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \text{ 及 } R \text{ 求出 } E_a。$$

(三) 利用電子天平之 RS-232C 與電腦連線之實驗結果來驗證。

1. 我們成功以電子天平結合電腦數據之輸出，終於能獲得更精準定量出反應速率，將雙氧水加二氧化錳之實驗電腦輸出結果整理後(圖15)，得到結果如表1所示。我們發現計算所得之  $E_a$  值為 33.6 KJ/mol。

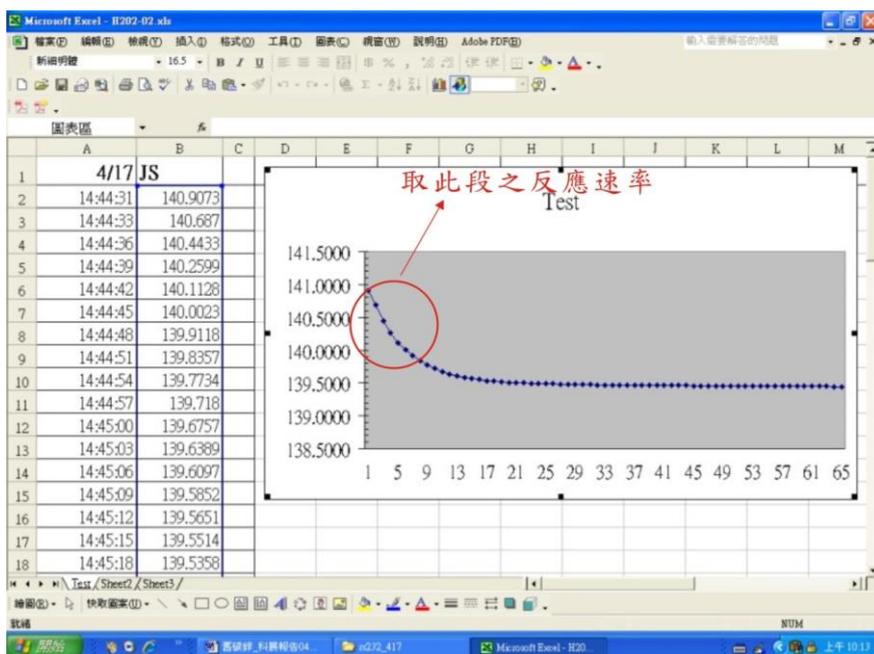


圖 15、電子天平電腦輸出數據整理圖示。

表 1、不同溫度下之雙氧水分解反應速率電腦減重各項數值分析。

項目	T <sub>1</sub> =30°C	T <sub>2</sub> =40°C	T <sub>3</sub> =50°C	備註說明
減少 O <sub>2</sub> 速率 g/sec	0.022727	0.028662	0.034395	30 秒重量減輕量
減少 O <sub>2</sub> 速率 mole/sec	0.0007102	0.000895687	0.001075	換算成 O <sub>2</sub> 莫耳數
平均 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 減少速率 mole/sec	0.0014205	0.001791375	0.00215	V <sub>H<sub>2</sub>O<sub>2</sub></sub> = 55ml
平均 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 減少速率 M/sec	0.0258266	0.032570455	0.039085	換算成 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 莫耳濃度，即反應速率
[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] 初始濃度	2.4064171	2.406417112	2.406417	初始濃度
k 值	k <sub>1</sub> 0.0107324	k <sub>2</sub> 0.013534833	k <sub>3</sub> 0.016242	依據 R = k[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] <sup>1</sup>
ln(k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub> )	ln(k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub> ) 0.2320001	ln(k <sub>3</sub> /k <sub>2</sub> ) 0.182336537	ln(k <sub>3</sub> /k <sub>1</sub> ) 0.414337	R=8.314 J/mol · K
(T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub> )/(T <sub>1</sub> T <sub>2</sub> )	(T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub> )/(T <sub>1</sub> T <sub>2</sub> ) 5.272E-05	(T <sub>3</sub> - T <sub>2</sub> )/(T <sub>2</sub> T <sub>3</sub> ) 4.94565E-05	(T <sub>3</sub> - T <sub>1</sub> )/(T <sub>1</sub> T <sub>3</sub> ) 0.000102	代入下式求出 Ea (J)
活化能 E <sub>a</sub> (J)	36586.02	30652.12437	33713.86	
平均值 (KJ)	33.650669			$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$

2. 在雙氧水加二氧化錳之分解實驗中，發現溫度升高至 40°C 及 50°C，會造成雙氧水之直接分解，而影響雙氧水之初始濃度[H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>]<sub>0</sub>，因此，重作低溫 20°C、25°C 及 30°C，結果如表 2，得到活化能 Ea=72.5 KJ/mol。

表 2、不同低溫下之雙氧水分解反應速率電腦減重各項數值分析。

項目	T <sub>1</sub> =20°C	T <sub>2</sub> =25°C	T <sub>3</sub> =30°C	備註說明
減少 O <sub>2</sub> 速率 mole/sec	0.000465	0.000708	0.001238	換算成 O <sub>2</sub> 莫耳數
平均 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 減少速率 M/sec	0.016907	0.025745739	0.045043	換算成 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 莫耳濃度，即反應速率
[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] 初始濃度	2.4064171	2.406417112	2.406417	初始濃度
k 值	k <sub>1</sub> 0.0070258	k <sub>2</sub> 0.010698785	k <sub>3</sub> 0.018718	依據 R = k[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ] <sup>1</sup>
ln(k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub> )	ln(k <sub>2</sub> /k <sub>1</sub> ) 0.4205437	ln(k <sub>3</sub> /k <sub>2</sub> ) 0.559339888	ln(k <sub>3</sub> /k <sub>1</sub> ) 0.979884	R=8.314 J/mol · K
(T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub> )/(T <sub>1</sub> T <sub>2</sub> )	(T <sub>2</sub> - T <sub>1</sub> )/(T <sub>1</sub> T <sub>2</sub> ) 5.726E-05	(T <sub>3</sub> - T <sub>2</sub> )/(T <sub>2</sub> T <sub>3</sub> ) 5.53747E-05	(T <sub>3</sub> - T <sub>1</sub> )/(T <sub>1</sub> T <sub>3</sub> ) 0.000113	代入下式求出 Ea (J)
活化能 E <sub>a</sub> (J)	61056.945	83979.77358	72326.05	
平均值 (KJ)	72.5			$\ln \frac{k_2}{k_1} = \frac{E_a}{R} \left( \frac{T_2 - T_1}{T_1 T_2} \right)$

3. 我們由公式發現，根據課本說法，如果溫度增加 10°C，反應就會增加 2 倍，而依據阿瑞尼士方程式( $k = Ae^{-\frac{E_a}{RT}}$ )，一樣的反應物，只有溫度與活化能會影響 k 值其他參數為常數，因此同一反應，如反應速率欲增為 2 倍，應該是反應常數  $k \rightarrow 2k$ ，那麼在室溫左右如 20°C、30°C 下，代入如下公式，即可算出室溫下溫度升高 10°C 反應增快 2 倍之活化能約為 51.2KJ/mol，如下述列式所示：

條件假設： $k_1=k$ 、 $k_2=2k$ 、 $R=8.314$ 、 $T_1=293$  及  $T_2=303$ ，代入下式

$$\ln(k_2/k_1)=(E_a/R)(T_2-T_1/T_1T_2) \quad \text{可以得到}$$

$$\ln(2)=(E_a/8.314)(303-293)/(303 \times 293)$$

$$E_a=51.2\text{KJ} \quad \circ$$

以此類推，甚至可以出整理在一系列溫度之下，如溫度每增加 10°C 則反應速率欲增加 2 倍，其活化能應為何值才適用，例如表 3 及圖 16。

表 3、溫度增高 10°C，反應速率增為 2 倍其活化能對應值。

溫度變化 (°C)	反應速率	活化能 (KJ/mol)	溫度差 10°C
.....	.....	.....	.....
20-30	增加 2 倍	51.16178992	$\Delta T_3$
30-40	增加 2 倍	54.65406227	$\Delta T_4$
40-50	增加 2 倍	58.26159113	$\Delta T_5$
50-60	增加 2 倍	61.98437651	$\Delta T_6$
60-70	增加 2 倍	65.8224184	$\Delta T_7$
70-80	增加 2 倍	69.7757168	$\Delta T_8$
80-90	增加 2 倍	73.84427171	$\Delta T_9$
.....	.....	.....	.....

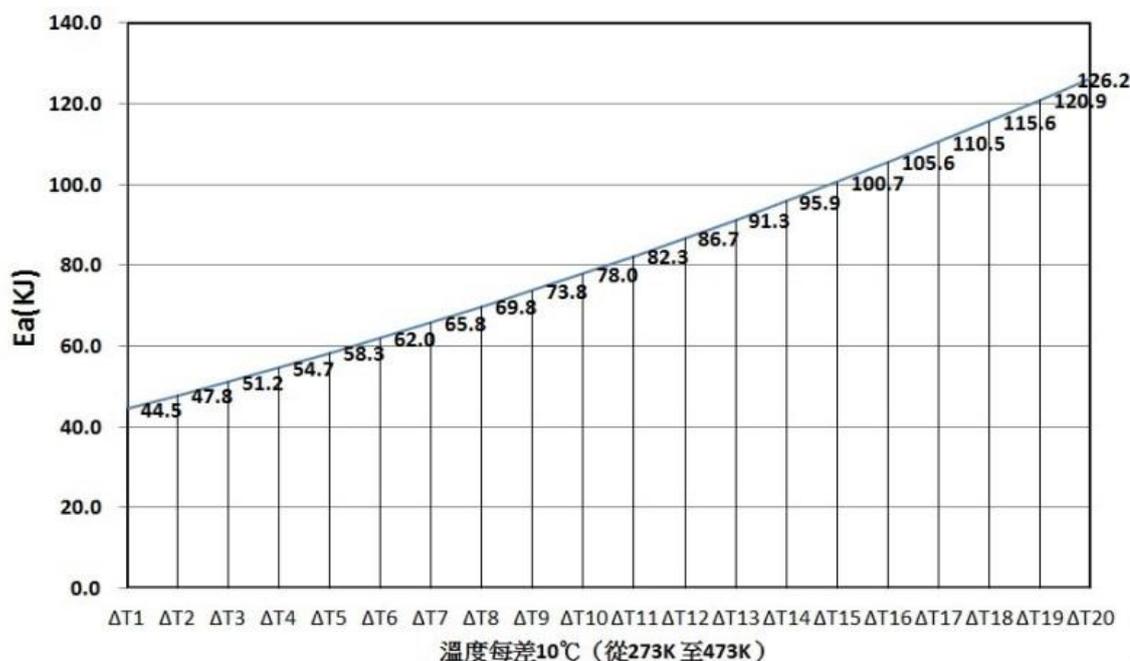


圖 16、溫度每增加 10°C，反應增加為 2 倍之活化能數值對應圖示。

4. 另外考慮恆溫水浴槽的設計，一樣避免高溫造成直接分解反應直接進行之狀況而影響到反應的初始濃度，故以水浴槽控制低溫（20°C、30°C及40°C）之環境條件，重新計算雙氧水加二氧化錳、另外嘗試以不同濃度之鹽酸加鋅片，試著找出鋅片加鹽酸產生氫氣之反應級數，發現是為鹽酸濃度 2 級之反應，意即  $R=k[\text{HCl}]^2$ ，這與高中課本內容常提及之題目亦為 2 級相吻合。我們亦發現只要將  $k=Ae^{(-E_a/RT)}$  取自然對數，即得到是  $\ln(k)=\ln A-E_a/RT$ 。所以只要將如上述表一的實驗參數計算所得不同之  $k$  及  $1/RT$  值代入上式  $\ln(k)=\ln A-E_a/RT$ ，所得之直線斜率即是活化能  $E_a$ 。我們依此將不同溫度下做出鋅片加鹽酸之反應速率，算出不同之  $k$  值，另外嘗試大理石加鹽酸等三種化學反應在不同溫度下之反應速率及活化能，比較結果如下所述。

(1) 雙氧水加二氧化錳。

實驗結果計算如表 4，活化能作圖如圖 17。計算得活化能約為 75 KJ/mol。可以發現一樣是  $2\text{H}_2\text{O}_2(\text{aq}) \xrightarrow{\text{MnO}_2} 2\text{H}_2\text{O}(\text{l}) + \text{O}_2(\text{g}) \uparrow$  的反應，隨著實驗操作愈來愈精密與反應條件控制愈精準，讓計算所得反應活化能由 33.6 KJ/mol 提升到 72.5 KJ/mol 再準確到 75 KJ/mol，意即不會將能量歸納原因到環境因素，造成活化能低估之情況。

表 4、水浴槽控溫下之雙氧水分解反應速率電腦減重各項數值分析。

項目	T <sub>1</sub> =20°C	T <sub>2</sub> =30°C	T <sub>3</sub> =40°C	備註說明
減少 O <sub>2</sub> 速率 mole/sec	5.60833E-05	0.000117	0.000405	換算成 O <sub>2</sub> 莫耳數
平均 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 減少速率 mole/sec	0.000112167	0.000233	0.000809	換算成 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 莫耳數，V <sub>HCl</sub> =15ml
平均 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 減少速率 M/sec	0.007477778	0.015553	0.053948	換算成 H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 莫耳濃度，反應速率
[H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ]初始濃度	2.4	2.4	2.4	初始濃度
$k$ 值	$k_1$ 0.003115741	$k_2$ 0.00648	$k_3$ 0.022478	因為依據 $R = k[\text{H}_2\text{O}_2]^1$
$\ln(k)$	-5.77128836	-5.03898	-3.795205	R=8.314 J/mol·K
1/RT	0.000410509	0.000396961	0.000384278	
活化能 $E_a$ (J)	75092.34			$\ln(k)=\ln A-E_a/RT$
平均值 (KJ)	75.1			

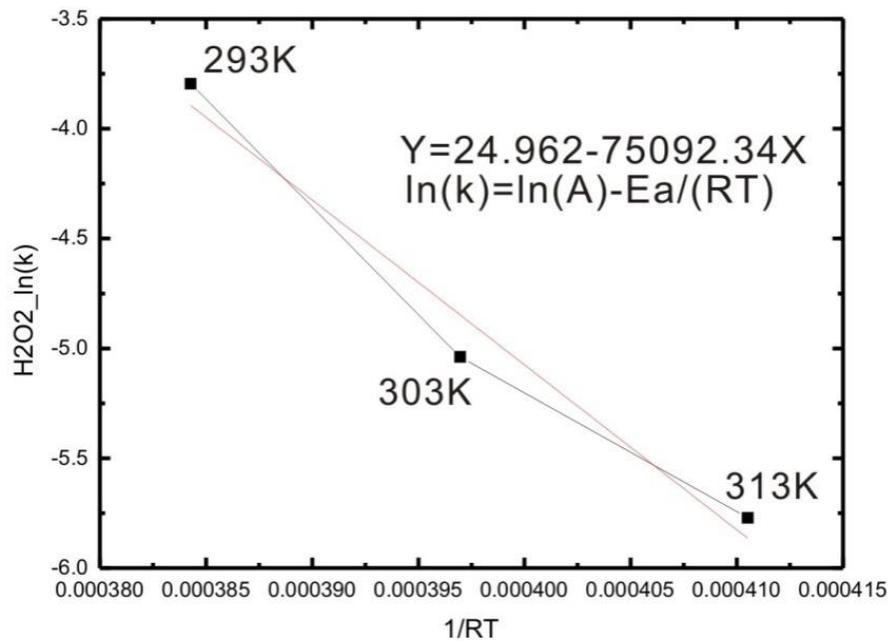


圖 17、計算雙氧水加二氧化錳之反應活化能值。

(2) 鋅粉加鹽酸。

實驗結果計算如表 5，活化能作圖如圖 18。計算得活化能約為 60 KJ/mol。降低環境影響後，活化能(Ea)亦由 23.6 KJ/mol 提升到 60 KJ/mol。

表 5、鋅粉加鹽酸反應速率電腦減重各項數值分析。

項目	T <sub>1</sub> =20°C	T <sub>2</sub> =30°C	T <sub>3</sub> =40°C	備註說明
減少 H <sub>2</sub> 速率 mole/sec	1.4E-05	3.18333E-05	6.75E-05	H <sub>2</sub> 莫耳數
平均 HCl 減少 速率 mole/sec	1.4E-05×2	3.1833E-05×2	6.75E-05×2	V <sub>HCl</sub> =10ml
平均 HCl 減少 速率 M/sec	0.0028	0.0064	0.0135	換算成 HCl 莫耳濃度，即 反應速率
[HCl]初始濃度	1	1	1	初始濃度
k 值	k <sub>1</sub> 0.0028	k <sub>2</sub> 0.0064	k <sub>3</sub> 0.0135	R=k，因為依據 R = k[HCl] <sup>2</sup>
ln(k)	-5.878135862	-5.056679233	-4.305065594	R=8.314 J/mol · K
1/RT	0.000410509	0.000396961	0.000384278	
活化能 E <sub>a</sub> (J)	59977.42			ln(k)=lnA-Ea /RT
平均值 (KJ)	60.0			

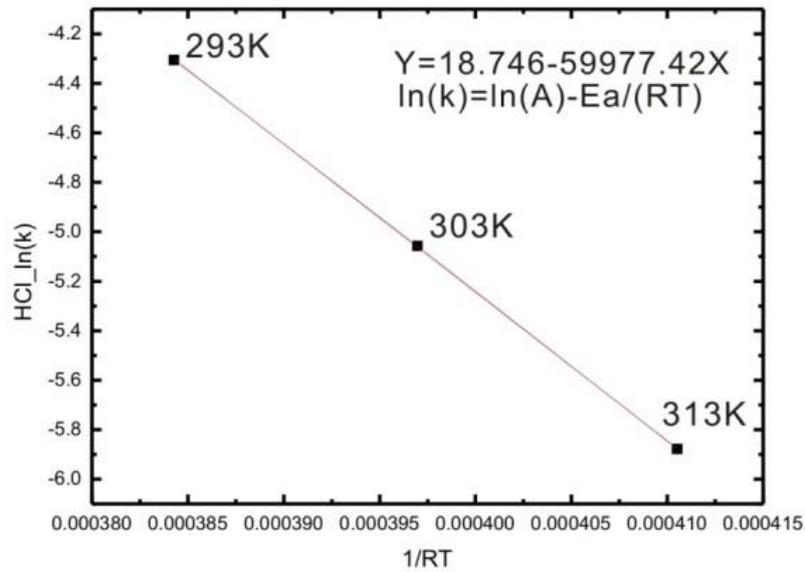


圖 18、計算鋅粉加鹽酸之反應活化能值。

(3) 大理石加鹽酸。

實驗結果計算如表 6，活化能作圖如圖 19。計算得活化能約為 41 KJ/mol。降低環境影響後，活化能(Ea)亦由 15 KJ/mol 提升到 41 KJ/mol。

表 6、大理石加鹽酸反應速率電腦減重各項數值分析。

項目	T <sub>1</sub> =20°C	T <sub>2</sub> =30°C	T <sub>3</sub> =40°C	備註說明
減少 CO <sub>2</sub> 速率 mole/sec	1.19697E-06	2.41667E-06	3.53788E-06	換算成 CO <sub>2</sub> 莫耳數
平均 HCl 減少 速率 mole/sec	2.39394E-06	4.83333E-06	7.07576E-06	換算成 HCl 莫耳數， V <sub>HCl</sub> =10ml
平均 HCl 減少 速率 M/sec	0.000239394	0.000483333	0.000707576	換算成 HCl 莫耳濃度， 即反應速率
[HCl]初始濃度	1	1	1	初始濃度
k 值	k <sub>1</sub> 0.000239394	k <sub>2</sub> 0.000483333	k <sub>3</sub> 0.000707576	R=k，依據 R=k[HCl] <sup>0.74</sup>
ln(k)	-8.337400081	-7.634804011	-7.253665856	R=8.314
1/RT	0.000410509	0.000396961	0.000384278	J/mol · K
活化能 E <sub>a</sub> (J)	41434.7			ln(k)=lnA-Ea
平均值 (KJ)	41.4			/RT

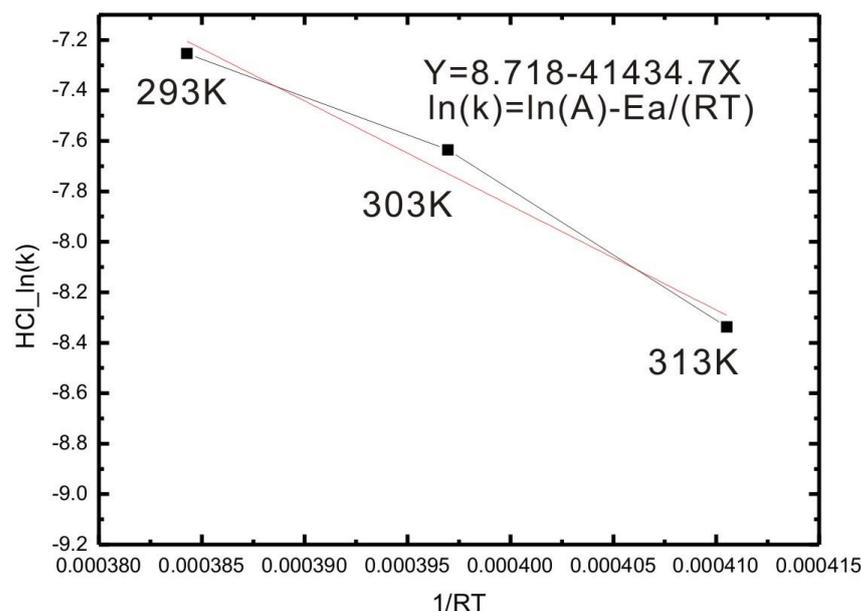


圖 19、大理石加鹽酸之反應活化能值。

- (4) 總結來說，排除環境影響後，更可以將反應能量計算到反應的本身所需求之反應活化能，而不會將反應能量歸納到環境因素，因此溫度控制如果更精確確實可以得到更好之結果，我們三個實驗的活化能皆約在 41 KJ/mol~75 KJ/mol。而鋅粉加鹽酸之反應活化能為 60 KJ/mol 與上表 3 互相比較，在 20°C~50°C 附近，比較接近溫度上升 10°C，反應增加 2 倍的相對應關係。
5. 我們發現實驗所得的活化能皆約在 40~75KJ/mol，與一般的化學反應活化能值相當接近，也與上表三所示之活化能值相接近，所以當溫度增高 10°C 時，實驗結果顯示反應速率皆確實約增加 2 倍左右，因此由圖 20 的結果可以知道當活化能愈高時，當溫度增加時，則超過底限能之粒子數增加的愈多，反應增快愈大，反之，當活化能愈小，溫度增加時，超過底限能之粒子數增加不多，因此反應增快不多，倒也不全然都是溫度增加 10°C，反應速率即增加 2 倍，只是一般化學反應之活化能如果大部分是落在 50~80 之間（如表 3），則一般來說確實溫度增加 10°C，則反應速率大約是增加 2 倍。

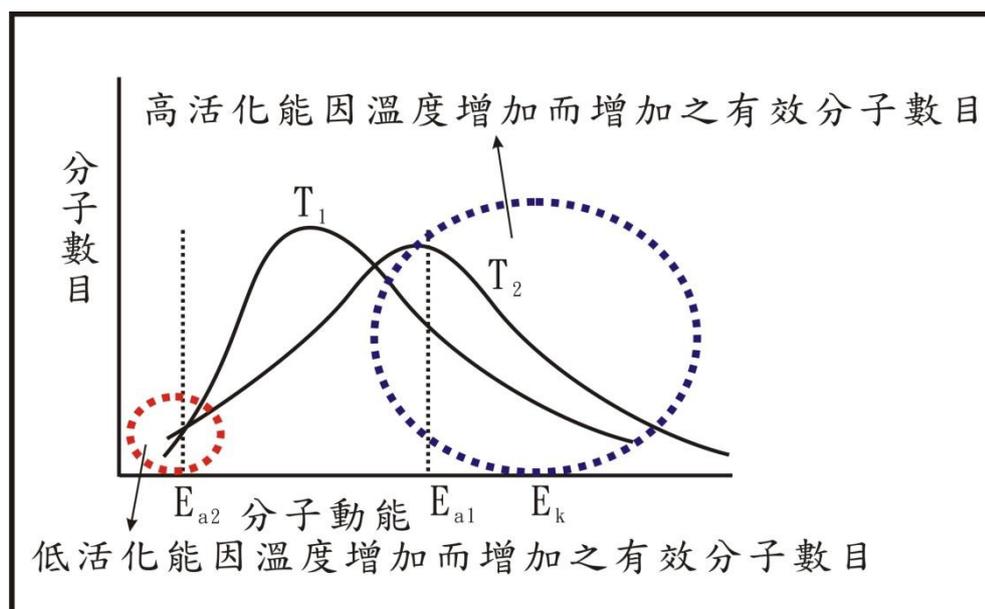


圖 20、活化能愈高，溫度增高則反應增加愈快，反之，活化能愈低，溫度影響較小。

6. 依據以上所得結果，我們亦可以假設如果有高活化能如 500 KJ/mol，如反應溫度在 273 K 起每增加 10 度，則條件如表 7 而反應速率增加倍率如圖 21 所示。而如果是低活化能如 20 KJ/mol，如反應溫度在 273 K 起每增加 10 度，則條件如表 8 而反應速率增加倍率如圖 22 所示。

表 7、高活化能 500 KJ/mol，每增加 10°C 時反應速率增加之倍率關係。

EXP(ln(r <sub>2</sub> /r <sub>1</sub> ))意即(r <sub>2</sub> /r <sub>1</sub> ) 差 10°C 之反應倍率	ln(r <sub>2</sub> /r <sub>1</sub> )	E <sub>a</sub>	R	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	ΔT
2402.210707	7.7841447	500000	8.314	283	273	ΔT <sub>1</sub>
1412.05841	7.2528038	500000	8.314	293	283	ΔT <sub>2</sub>
874.8661129	6.7740709	500000	8.314	303	293	ΔT <sub>3</sub>
567.4898606	6.3412229	500000	8.314	313	303	ΔT <sub>4</sub>
383.2078391	5.9485775	500000	8.314	323	313	ΔT <sub>5</sub>
268.0853984	5.5913056	500000	8.314	333	323	ΔT <sub>6</sub>
193.5008551	5.2652819	500000	8.314	343	333	ΔT <sub>7</sub>
143.5905253	4.9669657	500000	8.314	353	343	ΔT <sub>8</sub>
109.2133877	4.6933037	500000	8.314	363	353	ΔT <sub>9</sub>
84.91510424	4.441652	500000	8.314	373	363	ΔT <sub>10</sub>
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

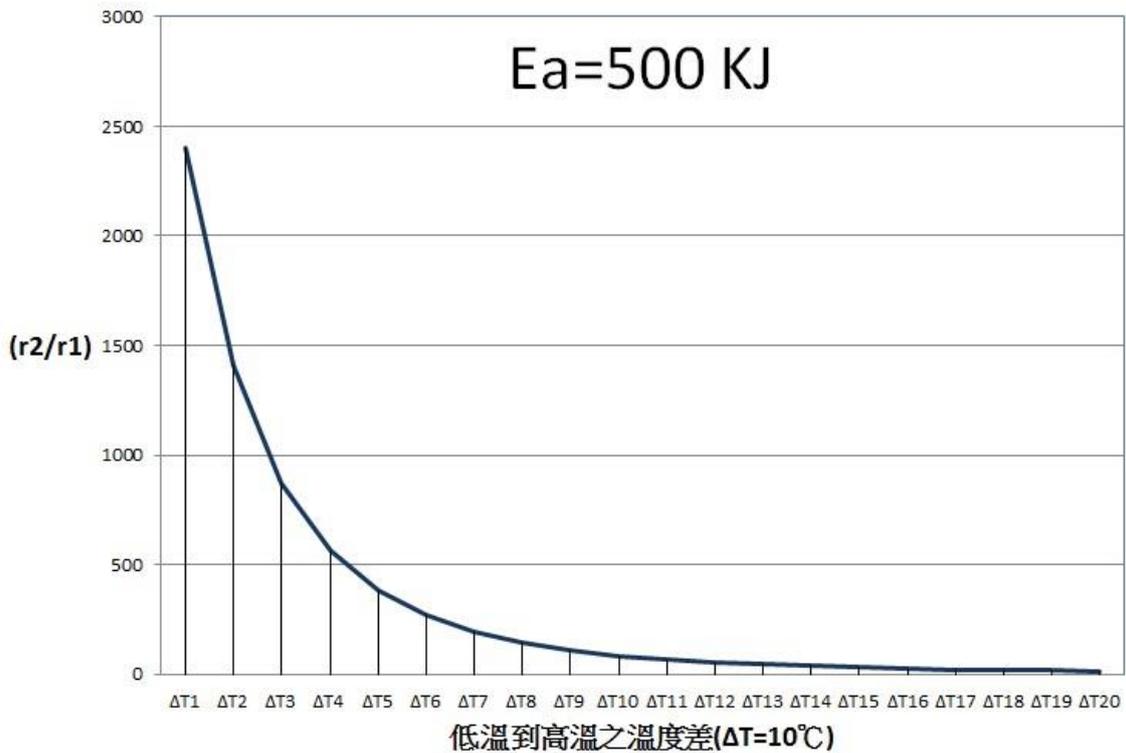


圖 21、高活化能 500 KJ/mol，每增加 10°C 時反應速率增加之倍率關係圖。

表 8、低活化能 20 KJ/mol，每增加 10°C 時反應速率增加之倍率關係。

EXP(ln(r <sub>2</sub> /r <sub>1</sub> )) 意即 (r <sub>2</sub> /r <sub>1</sub> ) 差 10°C 之反應倍率	ln(r <sub>2</sub> /r <sub>1</sub> )	E <sub>a</sub>	R	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	ΔT
1.365288537	0.3113658	20000	8.314	283	273	ΔT <sub>1</sub>
1.336577379	0.2901122	20000	8.314	293	283	ΔT <sub>2</sub>
1.311226337	0.2709628	20000	8.314	303	293	ΔT <sub>3</sub>
1.288719275	0.2536489	20000	8.314	313	303	ΔT <sub>4</sub>
1.268637005	0.2379431	20000	8.314	323	313	ΔT <sub>5</sub>
1.250636002	0.2236522	20000	8.314	333	323	ΔT <sub>6</sub>
1.23443241	0.2106113	20000	8.314	343	333	ΔT <sub>7</sub>
1.219789895	0.1986786	20000	8.314	353	343	ΔT <sub>8</sub>
1.206510304	0.1877321	20000	8.314	363	353	ΔT <sub>9</sub>
1.194426411	0.1776661	20000	8.314	373	363	ΔT <sub>10</sub>
.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

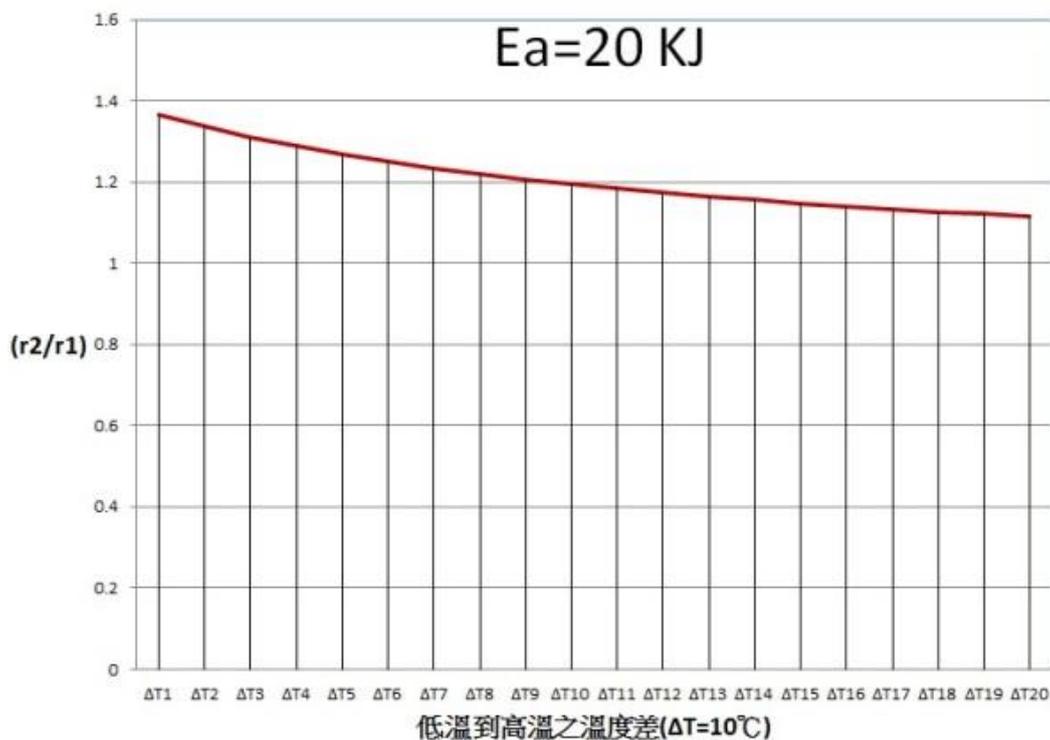


圖 22、低活化能 20 KJ/mol，每增加 10°C 時反應速率增加之倍率關係圖。

五、微量碘鐘反應之驗證結果。

(一) 以高中基化(三)所配製之 A、B 溶液仿 104 年學科能力競賽之題目進行滴定之實驗嘗試 (如圖 23)。

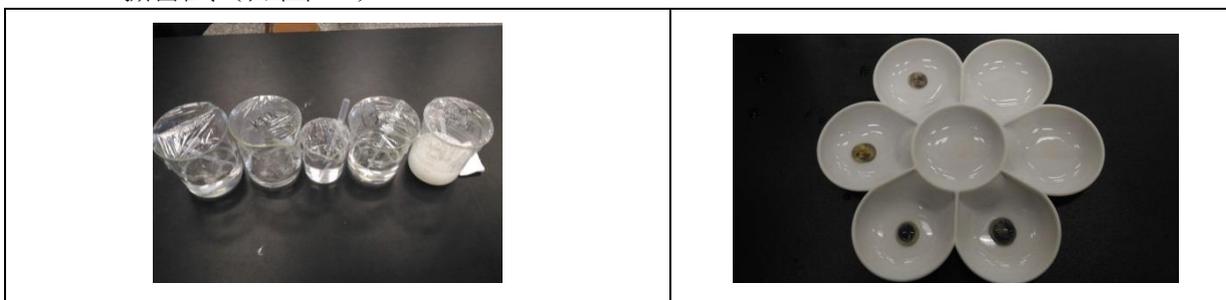


圖 23、微量實驗進行碘鐘反應圖示。

1. 實驗條件如表 9 及實驗結果取反應速率  $r$  (M/t) 對  $[A]_0$  做圖如圖 24 所示。

表 9、各次試驗反應試劑使用的滴數。

試劑 試驗	0.0064M NaHSO <sub>3</sub>	蒸餾水	0.1M H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4%澱粉 溶液	0.02M KIO <sub>3</sub>	時間 t (秒)	備註
一	6	0	1	1	6	17.8	依序滴定加入，KIO <sub>3</sub> 最慢加入。
二	6	1	1	1	5	24.8	
三	6	2	1	1	4	26	
四	6	3	1	1	3	30.4	
五	6	4	1	1	2	33.7	
六	6	5	1	1	1	44.8	

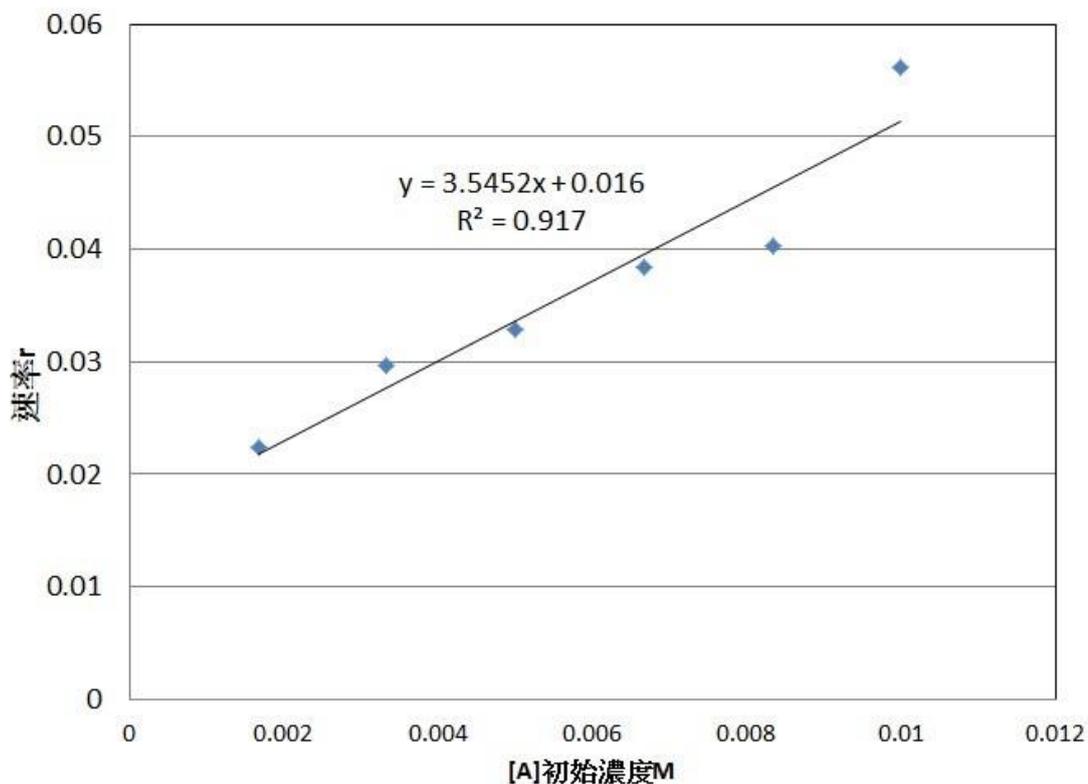


圖 24、微量實驗進行碘鐘反應  $r$  (M/t) 對  $[A]_0$  結果。

- 結果顯示 2 對  $KIO_3$  而言是一級反應，但是亦發現以微量實驗來說，逐步滴入滴數第 1 滴與第 6 滴之間亦有時間差，且微量顏色變化不易以肉眼觀察來判定實驗終止，故  $R$  平方誤差值只到 0.917，準確度不高，除非有更好之實驗終止判定方式，否則以肉眼來判定易有誤差產生。

(二) 改嘗試以自製反應器裝置驗證（針筒、光敏電阻）碘鐘反應之反應級數。

- 因滴數微量實驗不適合故再改稍多量之 0.6ml 來驗證碘鐘反應之反應級數，意即使用針筒（圖 25）取代滴管，實驗方式與步驟同微量滴數實驗。

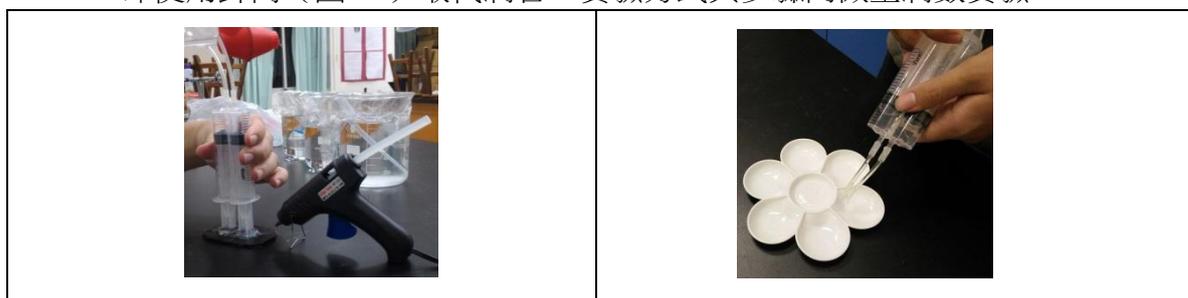


圖 25、針筒實驗進行碘鐘反應圖示。

- 實驗結果如表 10 及計算取反應速率  $r$  (M/t) 對  $[A]_0$  做圖如圖 26 所示。結果對 A 液而言，顯示  $R^2$  只提升到 0.937，誤差應是針筒操作會有壓縮噴濺及液體殘留問題，因如量少則殘存在針筒內之液體或氣泡怕會影響結果。

表 10、各次試驗反應試劑使用的毫升數。

試劑 試驗	B 液	蒸餾水	A 液	時間 t (秒)	備註
一	0.6	0	0.6	28.77	A 液、B 液 同時加入反 應槽。
二	0.6	0.1	0.5	53.64	
三	0.6	0.2	0.4	72.36	
四	0.6	0.3	0.3	80.36	
五	0.6	0.4	0.2	92.29	
六	0.6	0.5	0.1	245.86	

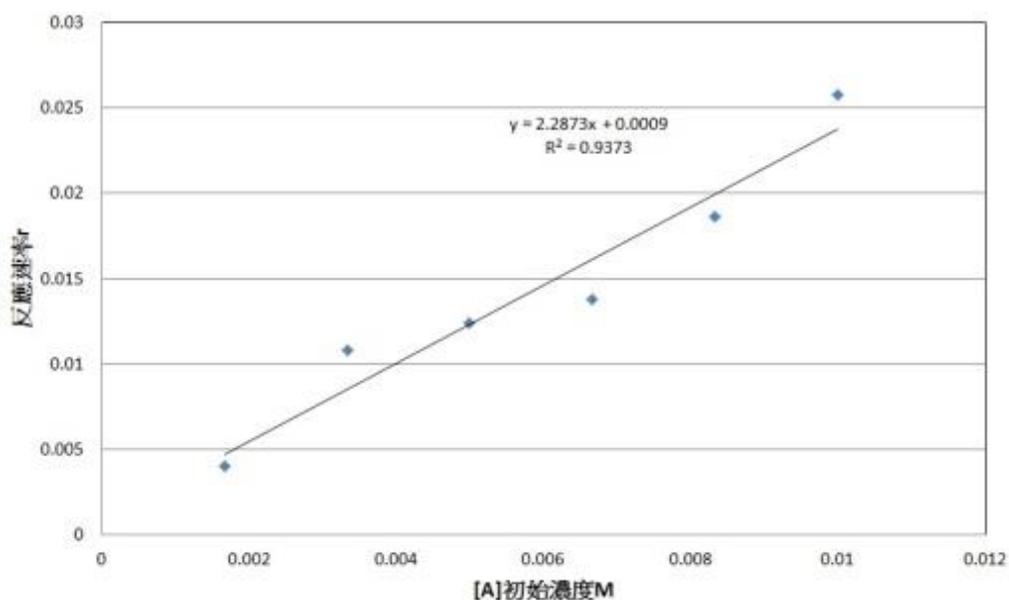


圖 26、針筒實驗進行碘鐘反應  $r (M/t)$  對  $[A]_0$  結果。

(三) 為改善以肉眼判定實驗終止之問題故改以光敏電阻為判定終止之驗證結果。

1. 為改良滴數微量實驗且肉眼判定反應終止之問題，改參考文獻 11 之實驗光敏電阻裝置取代肉眼判定之依據 (圖 27)，將 A、B 一同倒入反應槽進行觀察。



圖 27、光敏電阻為判讀依據進行碘鐘反應圖示。

2. 實驗結果如表 11 及計算取反應速率  $r (M/t)$  對  $[A]_0$  做圖如圖 28 所示。結果對 A 液而言，顯示  $R^2$  已提升到 0.99，故爾後皆以此實驗裝置及劑量進行實驗且確定此反應對 A 液而言是一級反應，意即  $r \propto [A]$ 。

表 11、光敏電阻判讀試驗所使用的毫升數。

試劑 試驗	B 液	蒸餾水	A 液	時間 t (秒)	備註
一	12	0	12	64.05	A 液、B 液同時 加入反 應槽。
二	12	2	10	75.70	
三	12	4	8	91.78	
四	12	6	6	124.71	
五	12	8	4	194.72	
六	12	10	2	453.36	

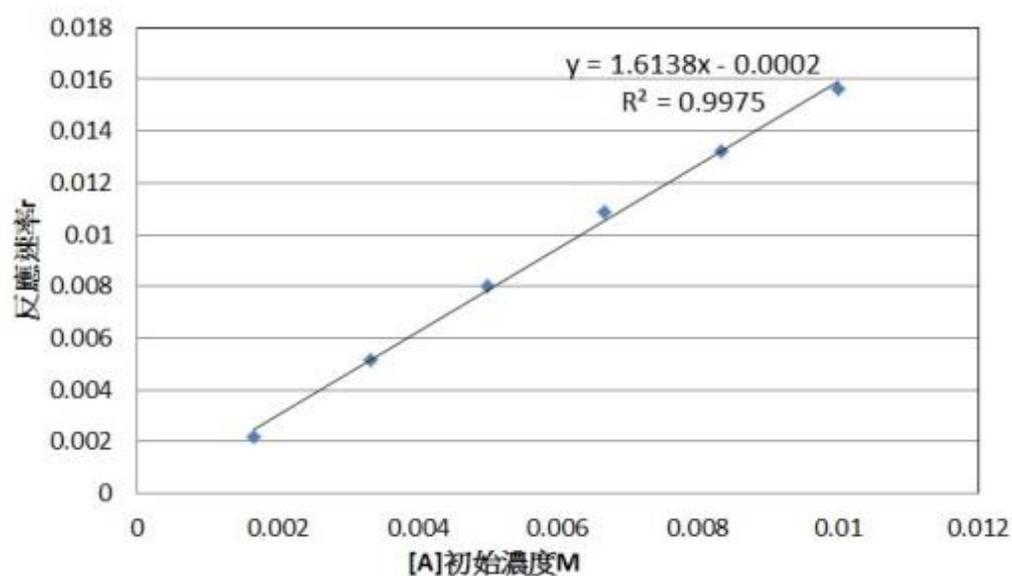


圖 28、碘鐘反應  $r$  (M/t) 對  $[A]_0$  結果。

- (四) 以上述實驗裝置及步驟進行固定 A 溶液，改以 B 溶液（加入  $H_2SO_4$ +4% 澱粉液）為變因進行一樣的實驗。實驗結果如表 12 及計算取反應速率  $r$  (1/t) 對  $[B]_0$  做圖如圖 29 所示。結果對 B 溶液而言，未呈現線性此結果與參考文獻不同，探究原因可能為硫酸與澱粉在 B 溶液應會影響實驗結果，故 B 溶液應更單純些。

表 12、光敏電阻判讀試驗，以 B 溶液為變因所使用的毫升數。

試劑 試驗	A 液	蒸餾水	B 液	時間 t (秒)	備註
一	12	0	12	8.19	A 液、B 液同時加 入反應槽。
二	12	1	11	8.82	
三	12	2	10	9.36	
四	12	3	9	12.37	
五	12	4	8	14.91	
六	12	5	7	17.82	

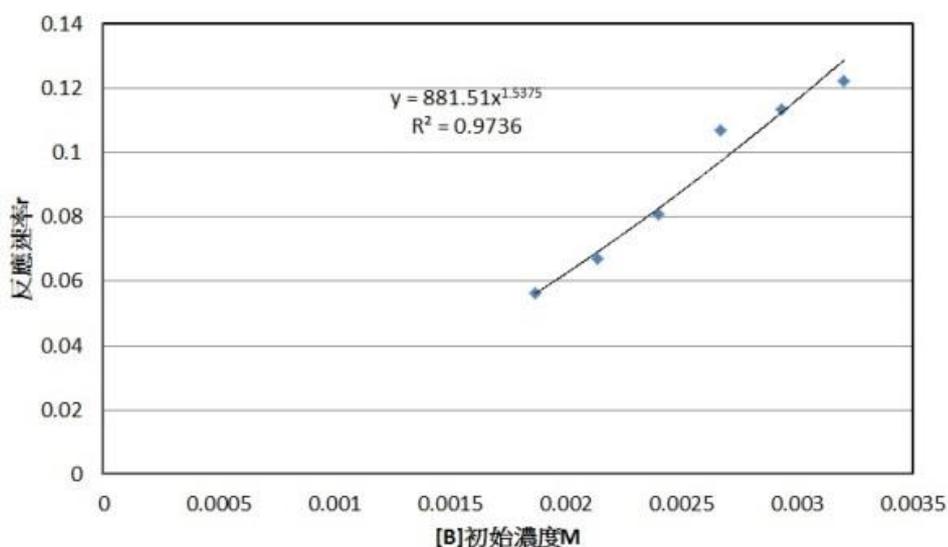


圖 29、碘鐘反應  $r$  (M/t) 對  $[B]_0$  結果。

(五) 依據上述步驟(四)改將  $H_2SO_4$ +澱粉+ $KIO_3$  分別加入反應槽，改單純 B 溶液（只有  $HSO_3^-$ ）為變因進行實驗結果如表 13 及圖 30，結果顯示結果對 B 而言亦非呈線性關係更是呈現對數圖形，此結果讓我們十分好奇，在重新檢視結果發現反應速率是以  $HSO_3^-$  的初始濃度到用完才會出現藍色，而變動  $HSO_3^-$  的比例意即改變  $[HSO_3^-]_0$  的濃度，因此反應速率  $r$  是為  $\Delta [HSO_3^-] / \Delta t$ ，重新計算結果如圖 31 所示，顯示反應速率對  $[HSO_3^-]$  而言是一級反應。

表 13、光敏電阻判讀試驗，以 B 溶液為變因所使用的毫升數。

試劑 試驗	A 液	蒸餾水	B 液	時間 t (秒)	
一	12	0	12	4.43	A 液、B 液 同時加入 反應槽。
二	12	1	11	4.55	
三	12	2	10	4.67	
四	12	3	9	4.77	
五	12	4	8	5.00	
六	12	5	7	5.57	
七	12	6	6	5.72	
八	12	7	5	6.69	
九	12	8	4	7.28	
十	12	9	3	9.13	
十一	12	10	2	11.69	

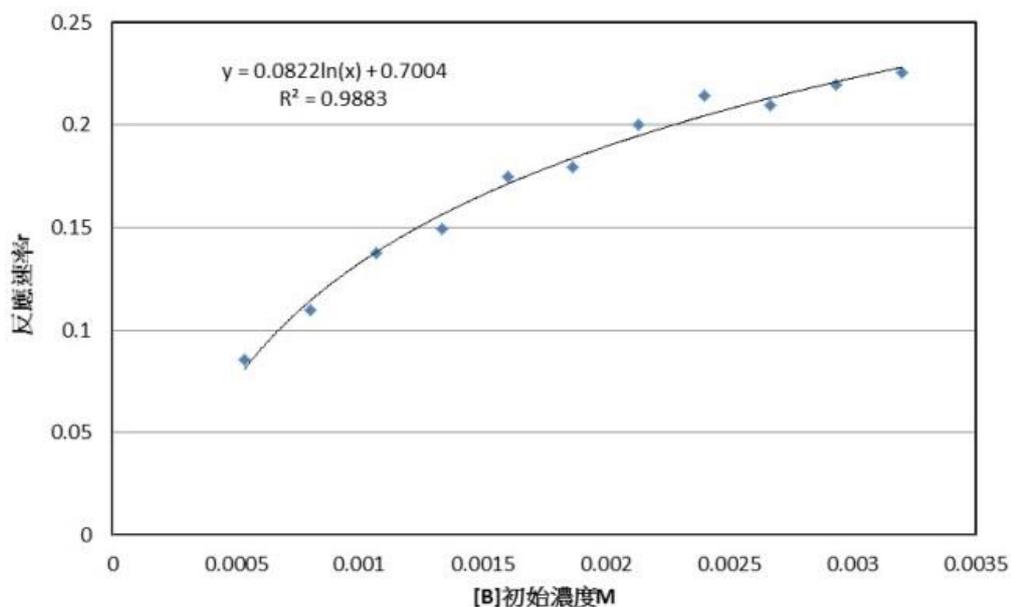


圖 30、初次計算碘鐘反應  $r$  對  $[\text{HSO}_3^-]_0$  之結果。

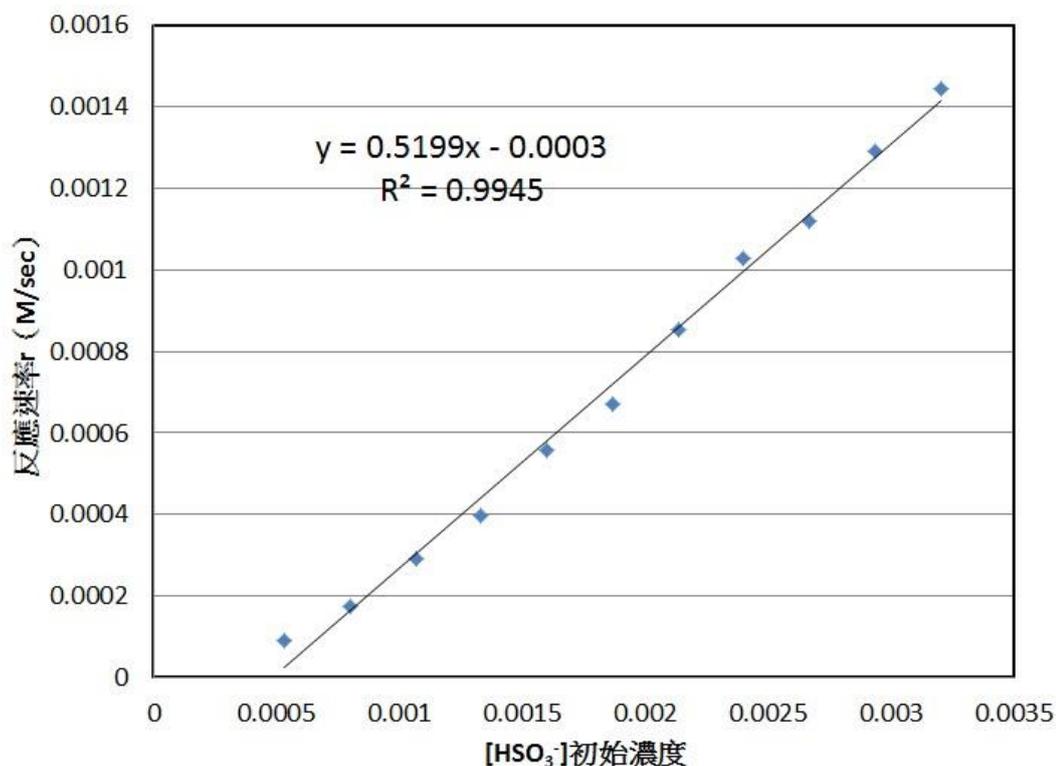


圖 31、實際碘鐘反應速率  $r$  (M/t) 對  $[\text{HSO}_3^-]_0$  結果。

- (六) 依據上述步驟(五)，並仿照學科能力競賽試題改以  $\text{HCl}$  取代  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ，且將  $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、澱粉、 $\text{KIO}_3$  個別加入反應槽，改嘗試  $[\text{H}^+]$  為變因進行實驗結果如表 14 及圖 32，顯示結果對  $[\text{H}^+]$  而言亦呈現一級反應，故可很確定該反應速率定律式為  $r = k[\text{IO}_3^-][\text{HSO}_3^-][\text{H}^+]$ 。

表 14、以  $H^+$  濃度為變因所使用的毫升數。

試劑 試驗	$KIO_3$	蒸餾水	HCl (0.01M)	澱粉 (4%)	$HSO_3^-$	時間 t (秒)	備註
一	12	0	6	3	3	17.74	加總體 積為 24 ml。
二	12	1	5	3	3	19.96	
三	12	2	4	3	3	25.19	
四	12	3	3	3	3	34.45	
五	12	4	2	3	3	54.25	

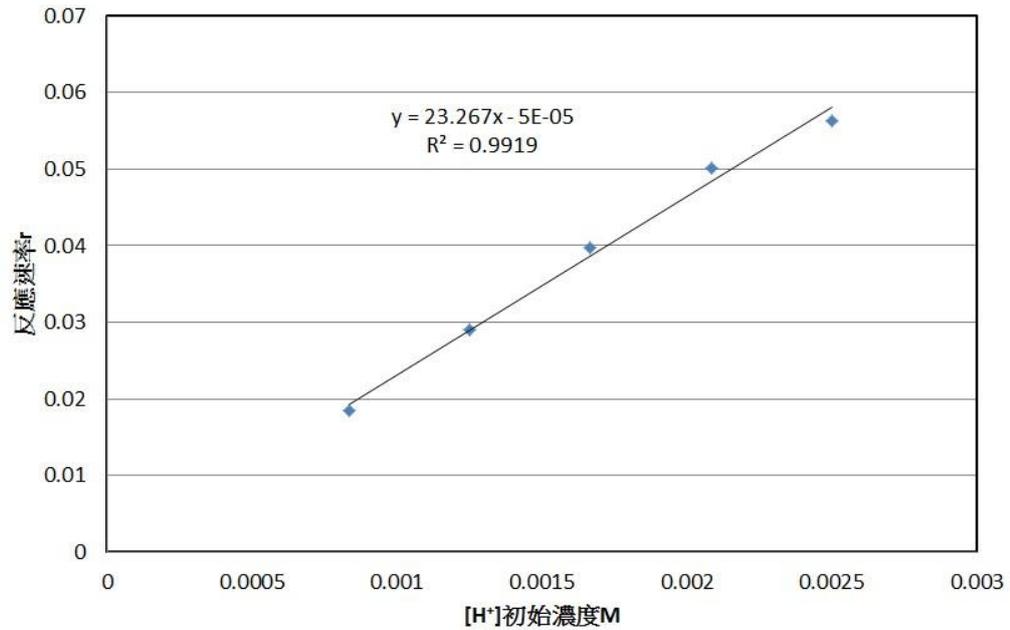


圖 32、碘鐘反應  $r$  (M/t) 對  $[H^+]_0$  結果。

(七) 依據上述步驟(六)此碘鐘反應之反應速率式  $r=k[IO_3^-][HSO_3^-][H^+]$ ，再固定其他變因只改變不同溫度進行活化能驗證，其實驗結果如表 15 及圖 33 所示。結果證明活化能為 34.7 KJ/mol，故將此活化能參考表 8 代入公式驗算，當溫度從 20.4 °C 升高到 29.4 °C 時 (近 10 °C)，反應速率應該增加為 1.528 倍 (非增加 2 倍)，而實際由實驗數據為 1.501 倍 ( $=41.11/27.39=0.00011683/0.000077839$ )。故理論值與實驗值已經十分接近了 (98%)。

表 15、本碘鐘反應以溫度為變因之實驗條件 (ml 數)。

試劑 試驗	$KIO_3$	$HSO_3^-$	HCl (0.01M)	澱粉 (4%)	溫度 (°C)	時間 t (秒)	備註
一	12	6	3	3	29.4	27.39	加總 體積 為 24 ml。
二	12	6	3	3	26.8	30.44	
三	12	6	3	3	23.4	37.58	
四	12	6	3	3	20.4	41.11	

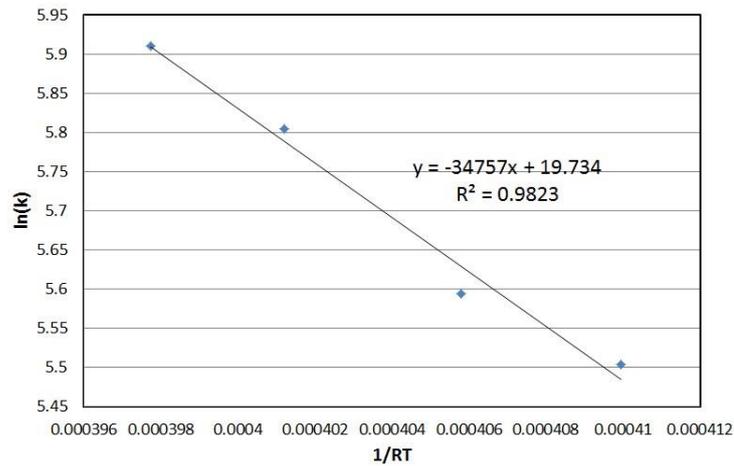


圖 33、碘鐘反應活化能驗證結果。

(八) 以反應式： $\text{IO}_3^- + 3\text{HSO}_3^- \rightarrow \text{I}^- + 3\text{SO}_4^{2-} + 3\text{H}^+$  本身之 pH 變化量為判定依據之實驗嘗試如表 16 及圖 34，結果可以發現未施加酸溶液，由 pH 之變化確實可為反應時間之判斷依據，而添加酸確實可以恆定 pH 值，而不致於影響實驗結果。

表 16、碘鐘反應以溫度為變因之實驗條件毫升數（看 pH 變化）。

試劑 試驗	$\text{KIO}_3$ (ml)	$\text{HSO}_3^-$ +澱粉 (ml)	溫度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	時間 t (秒)	備註
一	12	12	29.6	60.02	加總 體積 為 24 ml。
二	12	12	36.3	48.08	
三	12	12	45.9	35.42	
四	12	12	49.2	31.22	
五	12	12	55	26.1	
六	12	12	59	22.42	
七	12	12	63.3	19.65	
八	12	12	69.3	16.73	

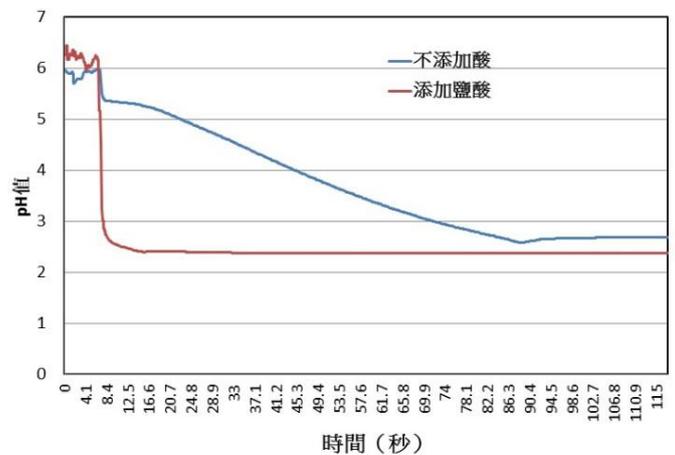
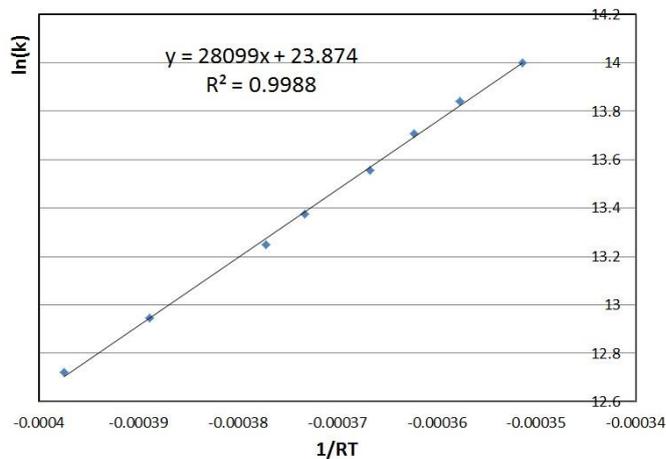


圖 34、碘鐘反應以溫度為變因之實驗條件毫升數（看 pH 變化）結果。

## 陸、結論

- 一、舊碳鋅電池之碳棒確實可為惰性電極之材料，且可適當利用製作有趣之教材教具。
- 二、舊碳鋅電池之鋅殼材質與實驗室之鋅片所差無幾，可利用為一般實驗當鋅片用。
- 三、舊碳鋅電池之電解質經過簡單純化過程分離之錳氧化物，與一般實驗室二氧化錳對雙氧水之分解催化能力相當，且廢棄乾電池電解質之錳氧化物如經濃硫酸氧化後會活性更大更有催化效果，而還原劑如硫代硫酸鈉則無此效果。
- 四、比較幾種測量  $2H_2O_{2(aq)} \xrightarrow{MnO_2} 2H_2O_{(l)} + O_{2(g)}$  反應速率之方法發現，依照歷屆有些作品之實驗，實際跟著操作發現結果再現性不高，皆有操作上之缺點不若報告所述之簡便，我們發現目前還是以將課本所介紹之一般排水集氣法稍加改良即可方便操作又確實可行。如要更精準計算得到實際活化能值，則需利用天平與電腦之連接裝置，加上控制環境溫度水浴槽的設計，則可排除環境之影響，獲得更準確的反應活化能值。
- 五、可以實際操作簡單之實驗，再利用阿瑞尼士方程式( $k=Ae^{(-E_a/RT)}$ )，計算出反應活化能( $E_a$ )。依據我們目前之低溫環境控制的實驗操作可以獲得實驗室藥用二氧化錳催化雙氧水分解之活化能值約 75 KJ/mole 及計算出鋅粉加鹽酸之反應活化能( $E_a$ )約為 60KJ/mole，而大理石加鹽酸之反應活化能值約 41 KJ/mole。
- 六、我們亦發現課本中常提到溫度每升高 10°C，則反應增加 2 倍之說法不全然是正確的，普通室溫下溫度如要得此結果，活化能必須約為 51.2 KJ/mole，然而如果活化能是 40~80 KJ/mole 之間，在某一些特定溫度之內，亦確實大約可以遵循此結果，一般的化學反應活化能亦是介於此值之間，所以可以說一般來說，確實溫度每升高 10°C，則反應速率增加 2 倍是有條件限制的（活化能大小與溫度範圍）。而活化能愈高，則溫度的效應欲明顯意即反應速率增快更多，相對的，活化能愈低則溫度的影響欲不顯著。
- 七、在驗證碘鐘反應之活化能實驗中，可以發現微量實驗有其實際執行上之困難，意即微量肉眼觀察之限制以及人為滴數操作有其誤差的可能，而以改良型光敏電阻實驗可以準確得到此碘鐘反應之反應速率定律式為  $r=k [IO_3^-][HSO_3^-][H^+]$ ，且依據此實驗裝置測量該反應之活化能約為 34.7 KJ/mol，而此活化能在溫度 20.4°C 升高至 29.4°C 時，理論上反應速率應該增加為 1.5 倍，而實驗驗證與理論值相符。

## 柒、參考資料

1. 高中化學(下)，泰宇，陳竹亭，民 97 年 12 月。
2. 266 個挑戰創意的科學實驗，世茂出版社，瀧川洋二、山村紳一郎，民 92 年 9 月。
3. 第 42 屆全國國中科展化學科國中組，養樂多一雙氧水的研究與新反應器的研製，宏仁國中，蔡皓羽、謝伊婷、蒙惠玲、劉家慈，民 91 年。
4. 第 41 屆全國國中科展化學科國中組，二氧化錳催化角色的探討，興雅國中，劉榕芝、劉千榕、徐靈兒，民 90 年。
5. John H. Bedenbaugh, Angela O. Bedenbaugh, and Thomas S. Heard, *J. Chem. Educ.* **1988**, *65*, p455-456。
6. 第 44 屆全國科展化學科高中組，不鳴則矣，一觸驚人，高雄市立高雄高級中學，李韋德、張建偉、蔡承志、柯星宇，民 93 年。
7. Tiffany A. Vetter and D. Philip Colombo, Jr. *J. Chem. Educ.* **2003**, *80*, p788-789。
8. 張建利、孫忠杰、張澤祥，碳酸鹽岩油藏酸岩反應動力學實驗研究，民國 104 年 12 月查詢。  
[http://www.chemyq.com/expert/ep62/613707\\_646FD.htm](http://www.chemyq.com/expert/ep62/613707_646FD.htm)
9. 化學滿分掃瞄，詹弘編著，建強出版社，民 91 年 6 月。
10. 104 學年度高級中學化學科能力競賽實驗試題，104 年 11 月 10 日，中投區，以微量實驗探究碘鐘實驗的化學動力學。
11. 第 51 屆全國科展化學科國中組，「硫晶」歲月一自製偵測器探討硫代硫酸鹽與鹽酸之反應速率，葉亦心、葉亦修、林瑋晟，民 100 年。

## 【評語】 050211

此項研究藉由回收乾電池之碳棒，二氧化錳與鋅金屬，驗證高中課程所討論的(一)物質導電性、(二)反應速率動力學研究、(三)金屬間的氧化還原能力、(四)化學產氫研究。參與同學藉由化學品之回收與再生利用，展現化學理論與生活化學之深厚連結，並驗證化學的各項實驗論證。