

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
作品說明書

國中組 理化科

031617

運動學直搗化學速率~從鹽酸與碳酸鈣粉筆的
反應中，追縱〔 H^+ 〕與 CO_2 的動態變化

高雄市立國昌國民中學

作者姓名：

國三 曾理

指導老師：

陳惠玲 何莉芳

運動學直搗化學速率…嘛！通

-從鹽酸與碳酸鈣粉筆的反應中，追縱 $[H^+]$ 與 CO_2 的動態變化

壹、摘要：

以國中理化課本常見的製備 CO_2 為起點，用電子天平量化反應過程（研究一），比照運動學設計簡易數據分析的方法，動態追蹤 CO_2 生成速率對時間的關係（研究二），並以 pH 計追蹤 pH 值變化對時間的關係（研究三），再以斜率處理方法，利用運動學分析方法分析 R_{CO_2} 對應 $[H^+]$ 的關係，並進一步分計算起始反應速率，比較不同 $[H^+]$ 的實驗中下， $[H^+]$ 對 R_{CO_2} 的影響（研究四）。

在研究二三四的基礎下，試著用數學中對數的觀念及作圖法，計算 $R = K[H^+]^n$ （研究五）；有別於 R_{CO_2} 的實驗方法，也求出 R_{H^+} 與 $[H^+]$ 的關係式 $R = K[H^+]^n$ （研究六），最後以真實數據套入不同方法作出的 R_{H^+} 三反應速率方程式作比較（研究七）。期待能以簡單易懂的分析法，做出完整深入且具有價值的研究。

貳、研究動機：

製備二氧化碳是國中基本實驗，其中為方便觀察，多使用排水集氣法收集氣體。我注意到反應在一開始好快，但最後總是變慢許多……是什麼因素影響了反應速率呢？課本上提到催化劑、表面積、濃度與溫度都會影響！

課本說反應速度與濃度等因素有關，又總是「定性」地總結反應速率，因此在比較各實驗材料後，選擇粉筆與鹽酸，以國中理化課本常見的製 CO_2 實驗為起點，利用天平與 pH 計追蹤過程，鎖定在 $[H^+]$ 這個變項，企圖以「定量」方式展開粉筆與鹽酸反應之「長時間」觀察研究，希望藉由更細膩的角度來觀察這個簡單的實驗，一窺其動態反應的世界！

參、研究目的：

- 一、在酸對碳酸根反應中，以電子天平追蹤反應過程中總質量的減少。
- 二、探討 CO_2 生成速率、 $[H^+]$ 濃度變化與時間的對應關係。
- 三、利用運動學概念分析 CO_2 生成速率 R_{CO_2} 的快慢與 $[H^+]$ 的關係。
- 四、以數學中對數的觀念及作圖法，求出 $R_{H^+} = K[H^+]^n$ 關係式的 K、n 值。
- 五、比較不同分析法的差異處。

肆、研究器材：

- *藥品：鹽酸、碳酸鈣、 $CaCO_3$ 粉筆、蒸餾水
- *器材：透明塑膠杯、量筒、滴管、筷子
- *儀器：電子天秤、pH 計、電腦



伍、研究過程與方法：

一、實驗方法：

1. 將 9g 的粉筆分成兩段，兩端用亮光漆封起後放入 250ml 的 1M HCl 中。
2. 仔細觀察紀錄反應狀況，並將每 5 秒紀錄一次總質量與 pH 值的變化。
3. 將數據輸入電腦，做出總質量與時間的關係圖
4. 再利用 excel 進行計算及分析，將實驗數據轉成反應速率對時間的關係圖。

二、實驗操作模式

(一) 定性觀察：紀錄實驗數據同時觀察紀錄是否有任何特殊現象。

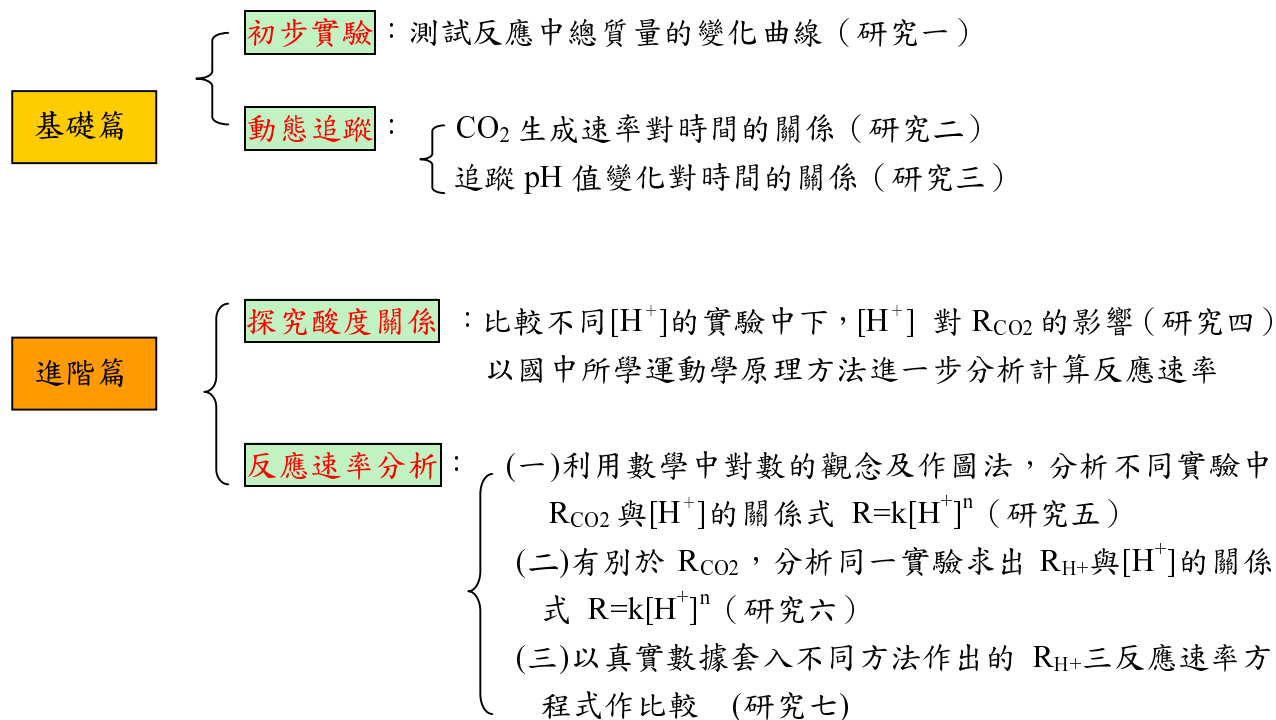
(二) 定量測量：

1. 利用 **電子天秤** 利用天平由 CO_2 逸散造成的重量損失，紀錄反應過程中 CO_2 的生成量，取代傳統體積的測量不便。
2. 用 **pH 計** 追蹤反應過程中 $[\text{H}^+]$ 變化。



使用 pH 計追蹤 pH 值

三、研究的架構：



實驗偵測工具的不同

偵測 CO_2 的動態變化(使用電子天平) **vs** 偵測 $[\text{H}^+]$ 的動態變化 (使用 pH 計)

分析速率處理模式的不同

利用 運動學原理 分析反應速率 **vs** 利用 對數 計算作圖分析

實驗分析中 $[\text{H}^+]$ 來源不同

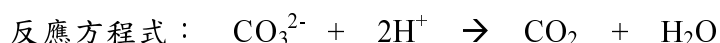
不同溶液 起始反應速率(使用電子天平) **vs** 同一溶液 各段平均速率(使用 pH 計)

陸、研究過程(步驟、結果、分析、發現與討論)：

基礎篇 CO₂ 實驗與關係圖探討

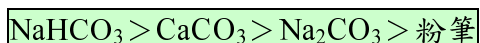
一產生對 CO₂ 速率的研究興趣，我便迫不及待的作實驗、找資料、問老師，而愈是向裡探，好奇心愈是濃厚。於是，為了釐清整個反應的觀念，針對 CO₂ 實驗條件進行一步步的剖析。

實驗基本條件的確立



(一) 用粉筆代替碳酸鈣

1. 在由藥品罐直接取出的不同種類的碳酸鹽類中，速率的比較為：



2. 粉狀碳酸鈣反應時有些粉團浮出水面，有部分沉澱在底部，這樣粉團內層因無法接觸外部溶液暫時沒反應到，反應的面積不易控制。
3. 相較於粉狀碳酸鹽，條狀粉筆的表面積短期內是比較固定的，而且便宜容易取得，做出來的曲線較連續圓滑，非常適合作定量實驗數據探討，便於動態追蹤，適合作為研究 CaCO₃ 反應速率的材料。



未逸出的 CO₂ 氣泡



太激烈的反應

條狀粉筆優勢

- ◎ 表面積容易控制，較不會有氣泡圍繞粉筆本體隔絕反應
- ◎ 反應持續且穩定，動態反應速率有較佳的呈現，適合定量實驗、數據探討

(二) 使用鹽酸

1. 硫酸與粉筆反應出來的硫酸鈣部分沉積在底部，部分仍在粉筆身上，少部分的硫酸鈣在溶液中流動，推測粉筆表面生成的硫酸鈣覆蓋粉筆表面，影響反應的速率，使反應變慢。
2. 醋酸與粉筆反應剛開始時即會有一部份的粉筆碎屑掉落，約五、六分鐘時，整支粉筆已全部碎裂，但反應仍持續進行，生成物醋酸鈣與未反應完的粉筆在溶液中繼續上下流動。
3. 各種酸性溶液中，以鹽酸最為穩定，且較無危險性，因此在往後的實驗中一律用鹽酸為酸性溶液反應物

(三) 使用電子天平測量 CO₂ 之反應速率

使用電子天平，數據之取得極為方便，且數值較準確、穩定，大大增加操作之便利性。美中不足是電子天平最小刻度為 0.02g，最大秤量為 600g，使用亦有其限制(如散失 CO₂ 量太少、總質量過大之操作皆須改善)。實驗一開始曾使用玻璃燒杯來做實驗，但是卻超過電子天

秤的極限 600g，於是改用透明塑膠杯大大減輕重量，便得以解決此問題。

操作方法	優點	缺點
測 CO ₂ 生成質量	以電子天秤即可讀取質量變化，操作非常方便，所得數據作成圖表變化加以探討	電子天秤有上限 200g/600g，我使用儀器最小刻度 0.01g/0.02g 更精密的變動無法讀取
測 CO ₂ 生成體積	不需儀器，簡單便宜。	操作不便，測量氣體體積誤差大

研究一：測試反應中總質量的變化曲線

動機

由於這是系列探討的第一個實驗，因此我決定做一個「長時間」的觀察以了解粉筆的詳細反應狀況，確定必要的反應時間。

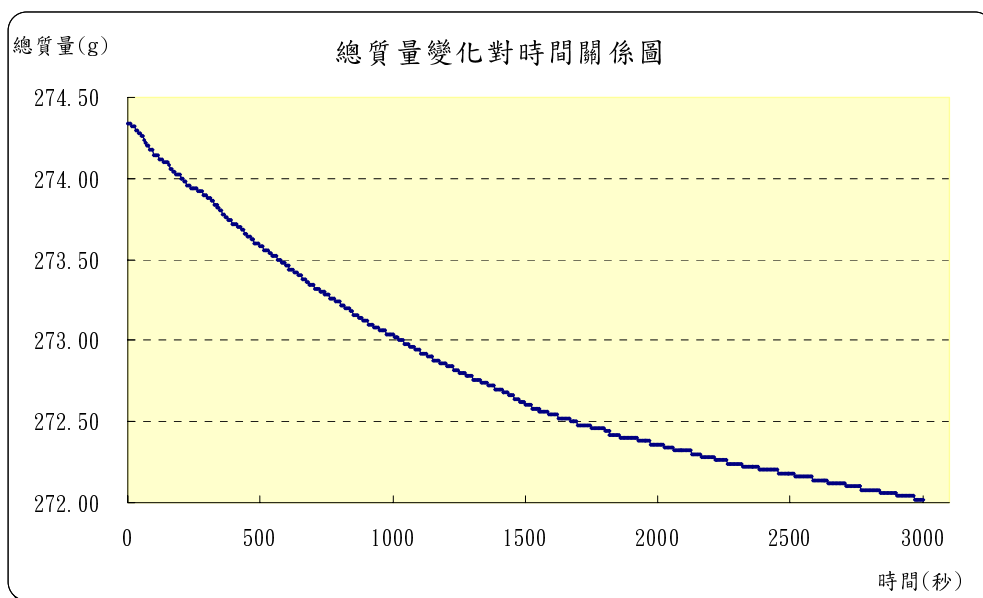
步驟

1. 將 9g 的粉筆分成兩段，兩端用亮光漆封起後放入 250ml 的 1M HCl 中。
2. 仔細觀察紀錄反應狀況並將每 5 秒紀錄一次總質量變化，反應後再以 excel 製作圖表加以分析。



實驗裝置

初步結果



發現

反應 1 個小時後，減少 2.32 克，由總質量與時間的關係圖，可明顯看出其趨勢並非是一直線，而是曲線，且一開始總質量減少很快，為縮短實驗時間，我決定以後的反應只取反應較快的前 10 分鐘數據做分析。

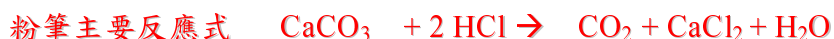
觀察

1. 本實驗剛開始是直接將粉筆丟入鹽酸中，因粉筆觸杯底面積無法控制，改良成用線吊在竹筷上。
2. 粉筆剛開始反應時會極速冒泡，過不久後即於液面出現土黃色之膠狀物體，推測是黏合粉筆的物質，但其仍會對反應有些許之影響，容易阻擋二氧化碳溢出水面，影響反應結果。



粉筆的黏膠

研究二 追蹤 CO₂ 生成量對時間的關係

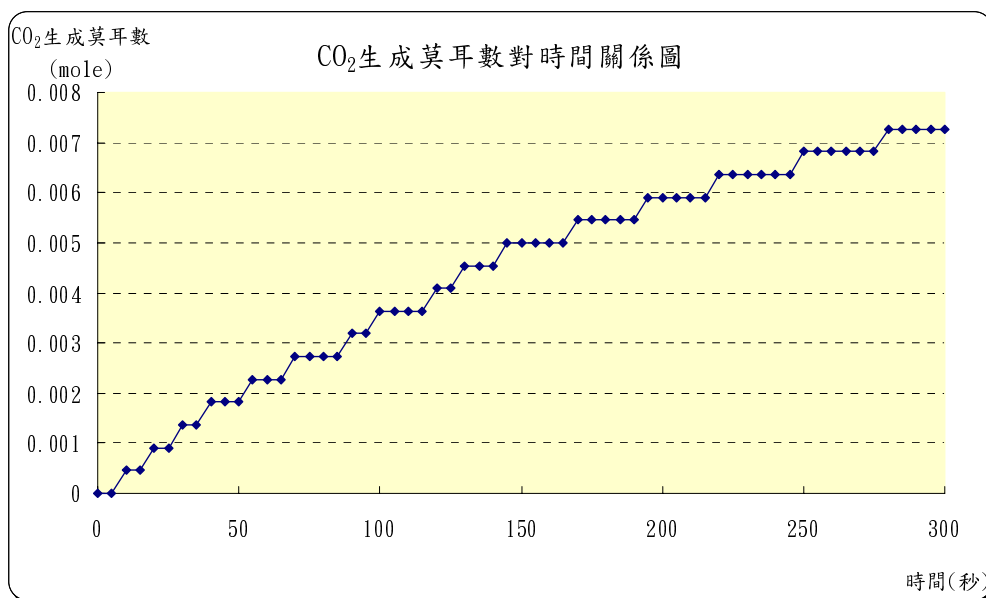


總質量的減少是因為 CO₂ 的逸散，所以我改利用 excel 計算出生成的 CO₂ 莫耳數，即為

$$\text{生成的 CO}_2 \text{ 莫耳數} = (M_0 - M_t) / 44$$

(M₀ 反應前總質量 M_t 反應在 t 秒時質量 CO₂ 分子量 44)

進一步換算後結果



發現

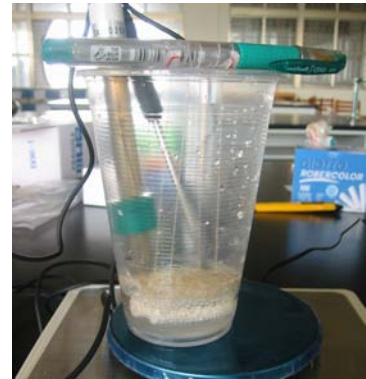
圖形並非是穩定上升，而是呈現梯度變化，一開始停滯時間較短，而後其需要較久的時間才會有氣體逸散，是因為我的時間間隔太短，還是由於氣泡的釋放須要達到一定量才有足夠的浮力脫離反應表面的吸附？以反應速率而言，顯然是越來越慢，這是和酸濃度降低有關嗎？而反應過程中[H⁺]變化究竟為何？如果藉由類似方法進行動態追蹤，是否會有跟上圖類似的梯度變化呢？

研究三 追蹤 pH 值變化對時間的關係

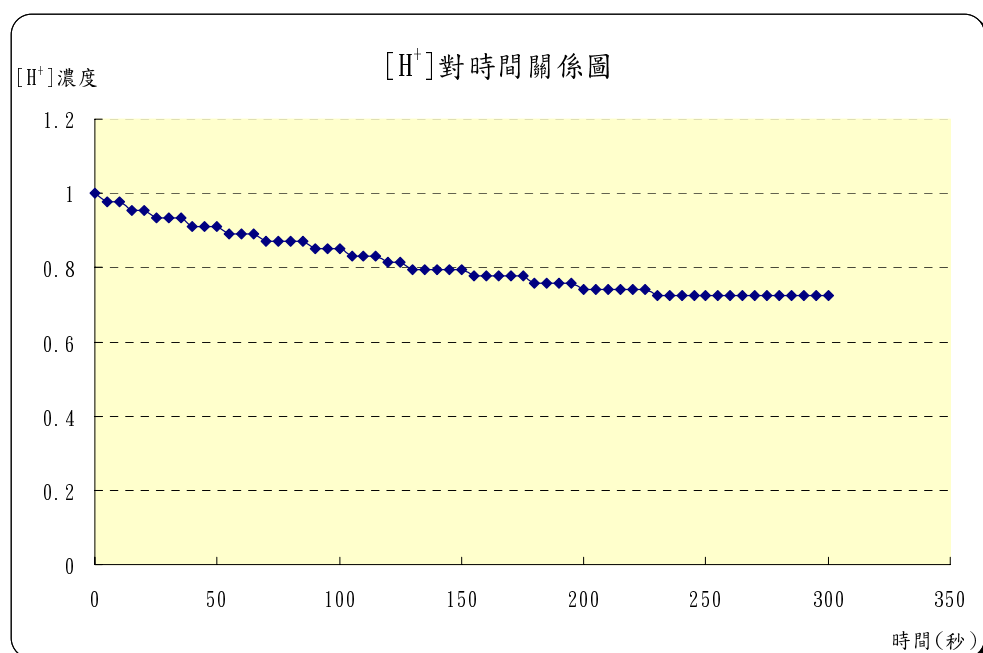
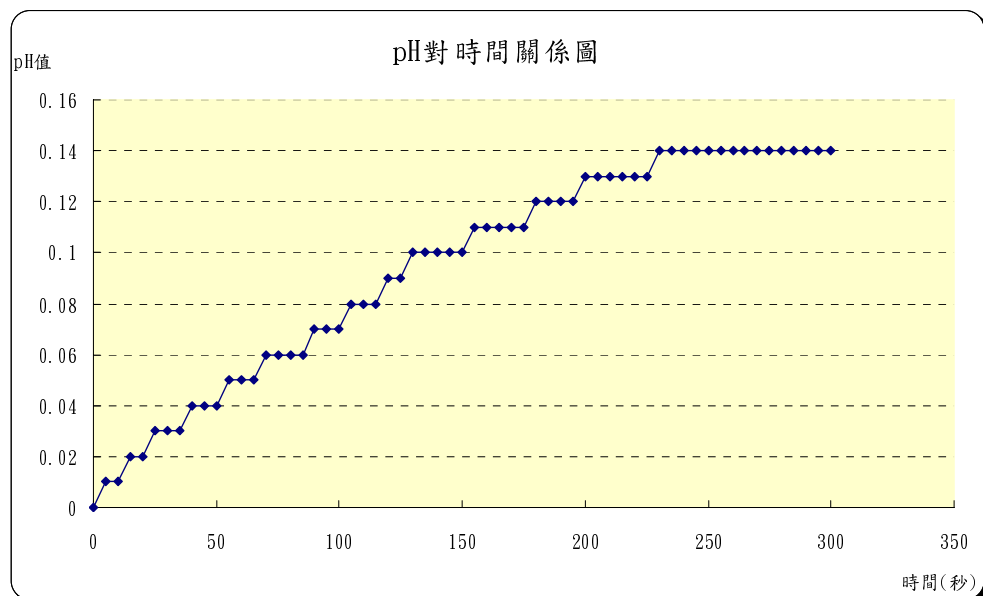
在前面的實驗，只使用電子天平測量 CO_2 質量變化，但我也想藉由 pH 值變化來反推 $[\text{H}^+]$ 變化量，了解實驗過程中的動態變化。

步驟

1. 將 9g 的粉筆分成兩段，兩端用亮光漆封起後放入 250ml 的 1M HCl 中。
2. 仔細觀察紀錄反應狀況並將每 5 秒紀錄一次 pH 值變化，反應後再以 excel 製作圖表加以分析。



結果



發現

酸濃度的確隨時間降低，我認為反應速率與 $[H^+]$ 有非常大的關係，但不一定是簡單正比關係。於是我大膽假設：

關係式之假設：

$$\text{反應速率與}[H^+]\text{的關係式} \quad R = K[H^+]^n$$

由研究三可知，我發現後段的反應可能是因為濃度減低而使反應速率隨之降低，若採用酸的濃度當作變因，來研究濃度與速率之關係，就可以算出 n 值了！

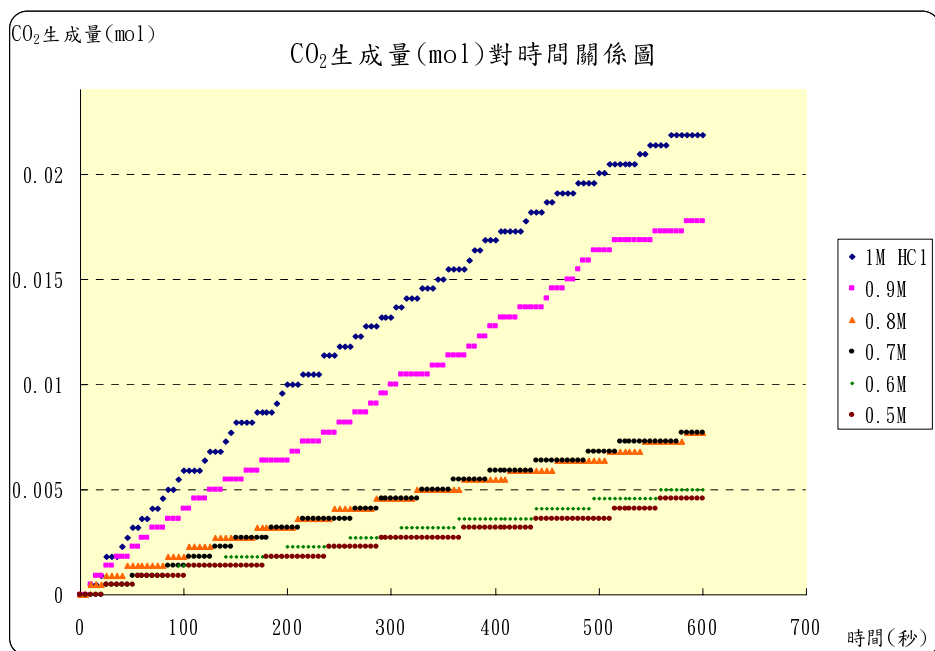
進階篇 反應速率與 $[H^+]$ 變化的探討

研究四 比較不同 $[H^+]$ 的實驗中下， $[H^+]$ 對 R_{CO_2} 的影響

方法

1. 將 9g 的粉筆分成兩段後兩端用亮光漆封起，放入 250ml 不同濃度的 HCl 中。
2. 仔細觀察紀錄反應狀況並將每 5 秒紀錄一次總質量的變化，反應後再以 excel 製作圖表加以分析。

結果



國中理化曾經學過，物體的平均運動速率可以表示成單位時間位置的改變量：

$$\text{運動速率}(v) = \frac{\text{位置的改變量}(\Delta m)}{\text{時間的改變量}(\Delta s)}$$

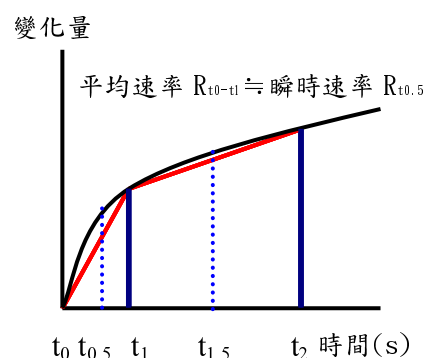
相同的，一個化學反應進行的快慢，也可以由單位時間內反應物或生成物濃度的改變量加以定義平均反應速率：

$$\text{反應速率}(r) = \frac{\text{濃度的改變量}(\Delta M)}{\text{時間的改變量}(\Delta t)}$$

受限於我的研究結果是呈現梯度變化，於是將曲線分割成數小段，分別製成對應圖表。

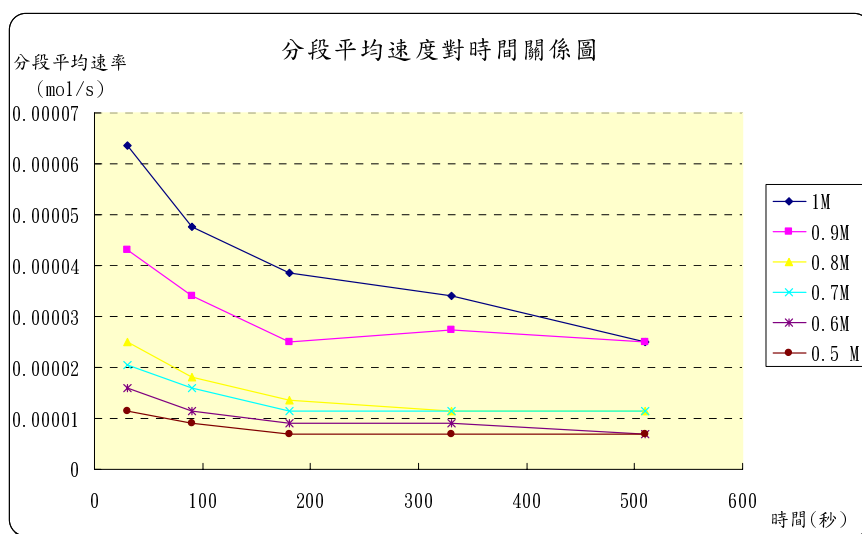
分段平均速率示意圖

- 1.使用 excel 圖表中之功能加上趨勢線找出每一小段的斜率(斜率代表每小段平均反應速率 R_{CO_2} mol/s，亦代表該時段中點的瞬間速率)。
- 2.再將分段速率輸入對應時間，製成 CO₂ 反應速率-時間 關係圖
- 3.總結比較：將呈現的曲線與反應狀況比對，進行深入分析比對與探討。



HCl 濃度	1M	0.9M	0.8M	0.7M	0.6M	0.5 M
0-1 分斜率 (0.5 分)	6.36364E-05	4.31818E-05	0.000025	2.04545E-05	1.59091E-05	1.13636E-05
1-2 分斜率 (1.5 分)	4.77273E-05	3.40909E-05	1.81818E-05	1.59091E-05	1.13636E-05	9.09091E-06
2-4 分斜率 (3.0 分)	3.86364E-05	0.000025	1.36364E-05	1.13636E-05	9.09091E-06	6.81818E-06
4-7 分斜	3.40909E-05	2.72727E-05	1.13636E-05	1.13636E-05	9.09091E-06	6.81818E-06

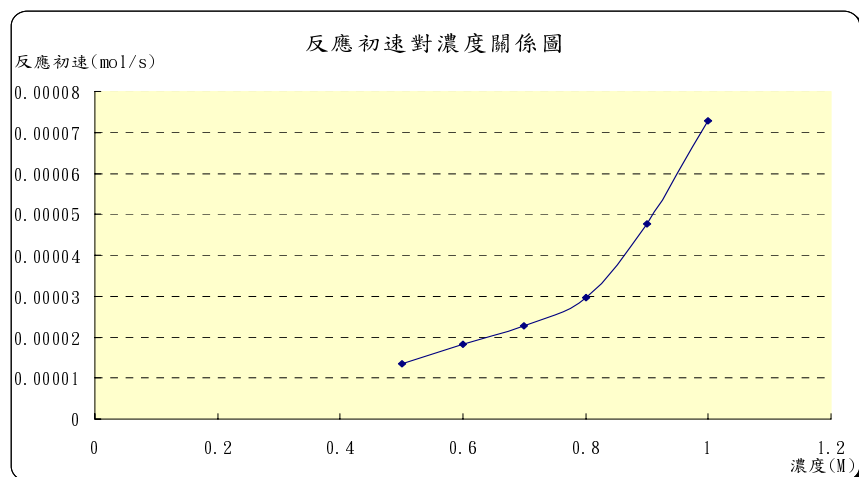
率 (5.5 分)						
7-10 分 斜 率 (8.5 分)	0.000025	0.000025	1.13636E-05	1.13636E-05	6.81818E-06	6.81818E-06



後處理 找初速:

由前一實驗及本實驗前段反應速率皆有等速遞減趨勢，我發現以 **小段平均速率** 代表 **中點瞬間速率** 的處理方法 **基本上** 是量不到初速率的。但是經數據圖發現 **前段很接近等減速**，於是將反應最初三分鐘內之實驗數據，作出反應速率 $R_{CO_2} - t$ 圖，運用外插法可得到 **反應初速**。故將 $R_{CO_2} - t$ 圖前兩點相連求方程式，結果如下表，並作出反應初速與時間關係圖：

項目	反應速率方程式	減速度(mol/s ²)	R ₀ 反應初速(mol/s)
1M HCl	$y = -1.59091E-05x + 7.27273E-05$	-1.59091E-05	7.27273E-05
0.9M HCl	$y = -9.09091E-06x + 4.77273E-05$	-9.09091E-06	4.77273E-05
0.8M HCl	$y = -6.81818E-06x + 2.95455E-05$	-6.81818E-06	2.95455E-05
0.7M HCl	$y = -4.54545E-06x + 2.27273E-05$	-4.54545E-06	2.27273E-05
0.6M HCl	$y = -4.54545E-06x + 1.81818E-05$	-4.54545E-06	1.81818E-05
0.5M HCl	$y = -2.27273E-06x + 1.36364E-05$	-2.27273E-06	1.36364E-05



發現

1. 所得外插截距即為反應初速，在做初速與初濃度之對應，發現兩者有正相關性，並非如國中觀念成正比，可能起初反應極快，由後面數據外插回初速已有一定誤差。儘管如此，但這已是我找初速最能聯想的方法了。
2. 方程式斜率即為該反應之減速度，以 1M 為例，該反應為前三分 CO_2 每秒減少 $1.59091\text{E-}05\text{mol/s}$ 的速率，由上表作出的方程式斜率，明白顯示 HCl 濃度越高，反應速率減速越快。
3. 濃度較低之溶液由於反應速度慢，質量久久才變化一次，因此用小段斜率代替速率就會出現一定的誤差。

結論

濃度越大，起始速率越大。反應速率都是隨著溶液的濃度遞減，且濃度較高者遞減速度較快。濃度低的溶液不適合進行數據分析

研究五：求出反應速率與 $[H^+]$ 的關係式 $R = K[H^+]^n$

請教老師後，我發現利用數學中對數的觀念及作圖法，比研究四的方式更能準確探討反應速率與 $[H^+]$ 的關係，求出關係式 $R = K[H^+]^n$ 中 n 、 K 值。

推導過程計算方法如下：

$$R = K[H^+]^n \quad (1)$$

同時將等號 2 邊取 $\log$ 值

$$\log R = \log K [H^+]^n \quad (2)$$

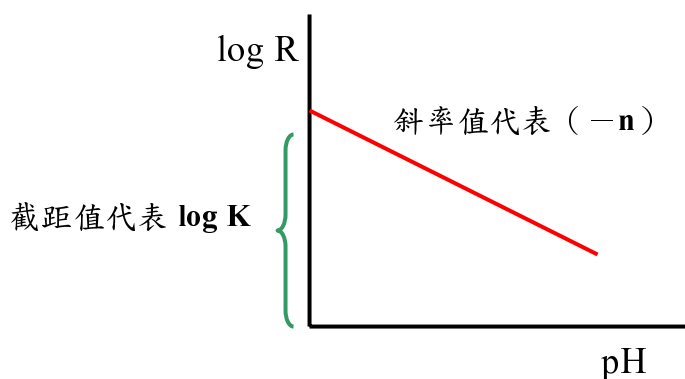
又利用 $\log(a \times b) = \log a + \log b$ ， $\log a^b = b \log a$ 的關係，可將 (2) 式化成

$$\log R = \log K + n \log [H^+] \quad (3)$$

其中 $pH = -\log [H^+]$ ，則 (3) 式化成

$$\log R = \log K - n \times pH$$

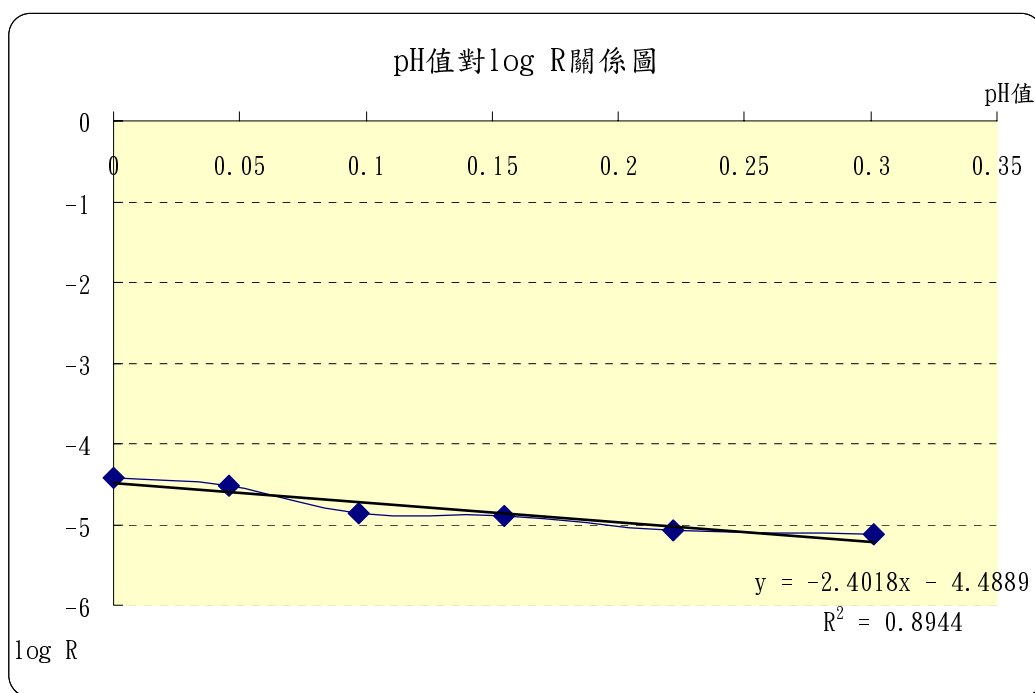
其中 R 、 pH 是可由實驗直接測得的數據，我們只需作 $\log R$ 對 pH 的關係圖便成，其中以橫軸代表 pH ，縱軸代表 $\log R$ ，進行線性回歸數值分析，截距值代表 $\log K$ ，經換算便可求出 K 值。斜率值代表 $(-n)$ ，而可知此反應的級數。



計算（一）以平均速率 R_{CO_2} 代入計算

平均速率 R_{CO_2} 值的計算是利用 CO_2 總生成量/總反應時間而得

鹽酸起始濃度	平均反應速率 R_{CO_2}	pH	$\log R$
1M	3.71212E-05	0	-4.430377993
0.9 M	3.03030E-05	0.045757491	-4.518514374
0.8 M	1.36364E-05	0.096910013	-4.865300268
0.7 M	1.28788E-05	0.15490196	-4.890124601
0.6 M	8.33333E-06	0.22184875	-5.07918142
0.5 M	7.57576E-06	0.301029996	-5.120573792



經線性分析 $y = -2.4018x - 4.4889$ ($R^2 = 0.8944$)

也就是 $\log R = \log K - n \times \text{pH}$ n 值為 2.4018 ; $\log K = -4.4889 \rightarrow K = 3.245 \times 10^{-5}$

$$R_{\text{CO}_2} = 3.245 \times 10^{-5} [\text{H}^+]^{2.4018}$$

輾轉推出 $R_{\text{H}^+} = 6.49 \times 10^{-5} [\text{H}^+]^{2.4018}$ 第一式

計算（二） 以反應初始速率 R_{CO_2} 代入計算

研究四中，我採用分段速率分析方法得到反應初始速率，我比照與上面相同方法進行分析：

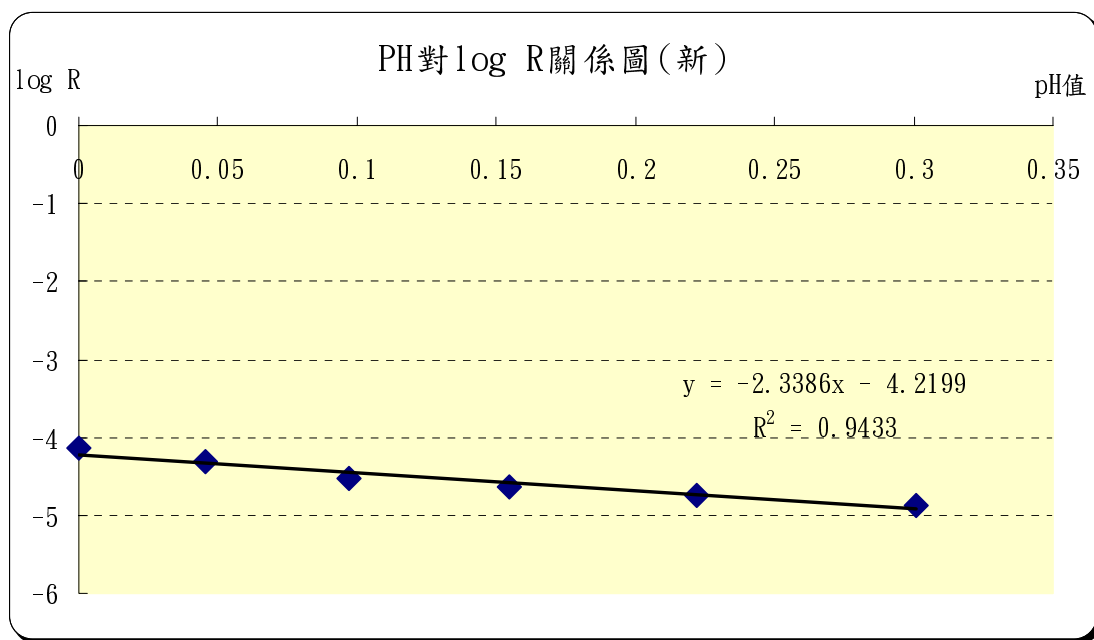
鹽酸起始濃度	反應初始速率 R_{CO_2} (mol/s)	PH	log R
1M	7.27273E-05	0	-4.138302698
0.9 M	4.77273E-05	0.045757491	-4.321233382
0.8 M	2.95455E-05	0.096910013	-4.529509324
0.7 M	2.27273E-05	0.15490196	-4.643452676
0.6 M	1.81818E-05	0.22184875	-4.740362689
0.5 M	1.36364E-05	0.301029996	-4.865301426

經線性分析 $y = -2.3386x - 4.2199$ ($R^2 = 0.9433$)

也就是 $\log R = \log K - n \times \text{pH}$ n 值為 2.3386 ; $\log K = -4.2199 \rightarrow K = 6.027 \times 10^{-5}$

$$R_{\text{CO}_2} = 6.027 \times 10^{-5} [\text{H}^+]^{2.3386}$$

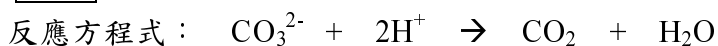
輾轉推出 $R_{\text{H}^+} = 1.2054 \times 10^{-4} [\text{H}^+]^{2.3386}$ 第二式



- 檢討**
- (1) R_{H^+} 第一式，是以 **全段平均速率** 套入對應求得，這是最簡易的作法。優點是以一般生成量對時間做圖即可得到基本數據，缺點是對應的 pH 值是反應起始值，有瑕疵。
 - (2) R_{H^+} 第二式，是以研究四再分析出數點瞬間反應速率，而外插出 **起始速率** 去作圖，可能較符合數據 **時間點一致** 的前提，但是外插法間接求得的起始反應速率 R_{H^+} 就有一段誤差在內，不夠準！
 - (3) R_{H^+} 第一式與 R_{H^+} 第二式，k 值差距大，n 值卻相近，由以上二點可知各有缺陷，哪一個較準，在研究七有進一步驗證。1

研究六：以 pH 計偵測同一溶液反應速率與 $[H^+]$ 的動態變化

研究五利用 不同濃度溶液 與碳酸鈣粉筆進行實驗，將數據進行一系列的分析，且是以 R_{CO_2} 作為計算依據，我由 $R = K[H^+]^n \rightarrow \log R = \log K - n \times pH$ 的式子中發現到，如果我直接用測得的 **pH 值** 作為橫座標數據，且



$$R_{CO_2} = \frac{\Delta CO_2 \text{ 生成量 (mol)}}{\Delta \text{ 時間(s)}}$$

$$R_{H^+} = \frac{\Delta H^+ \text{ 減少量 (mol)}}{\Delta \text{ 時間(s)}}$$

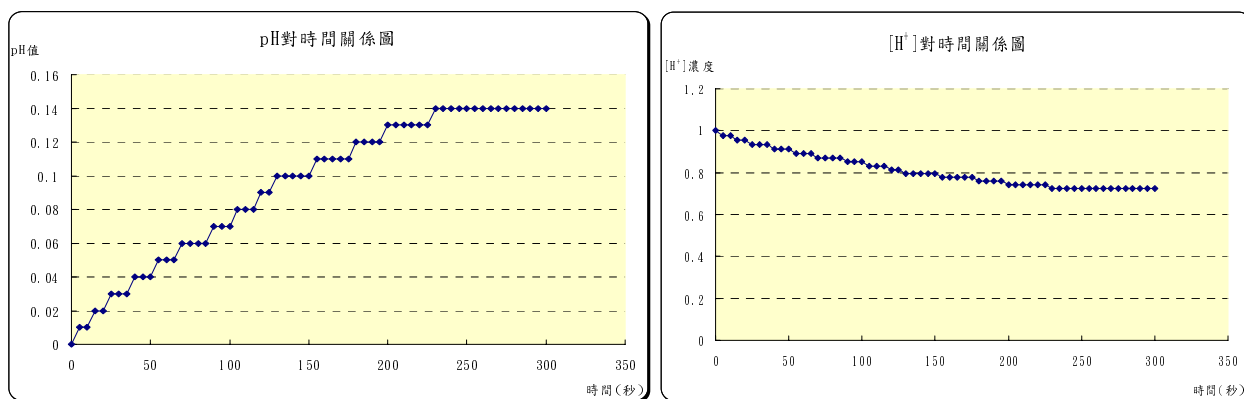
$$R_{H^+} = 2 R_{CO_2} \quad (\text{僅考慮大小})$$

所以 研究五代入 **平均速率** 之反應速率方程式為 $R_{H^+} = 6.49 \times 10^{-5} [H^+]^{2.4018}$

代入 **起始速率** 之反應速率方程式為 $R_{H^+} = 1.2054 \times 10^{-4} [H^+]^{2.3386}$

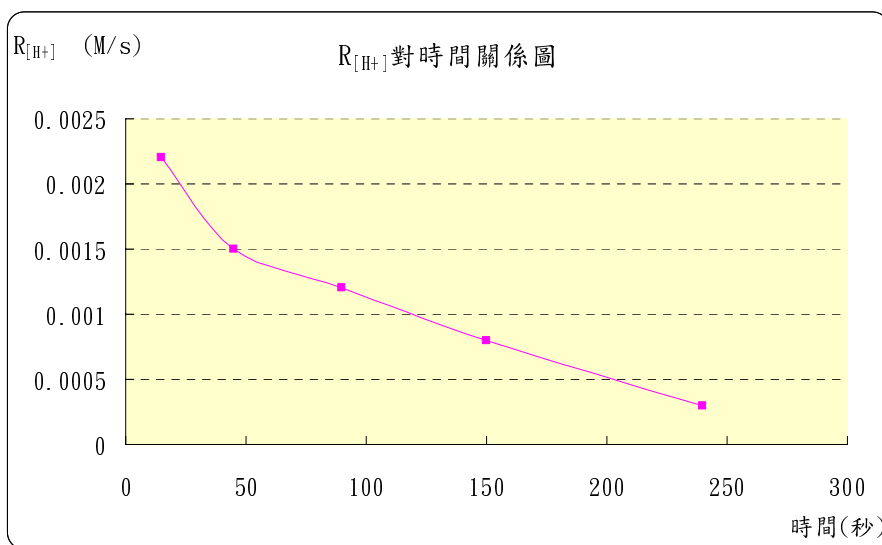
R_{H^+} 也可由反應中 pH 計所偵測到的變化去計算，也就是說，若使用電子天平紀錄時間變化，需搭配不同起始濃度的溶液，才能比較反應速率與 $[H^+]$ 的動態變化；而使用 pH 計所得到的數據，不僅提供反應過程 pH 的動態變化，亦可推算出 R_{H^+} ！重要的是，只要做一種起始濃度就可以了！

於是我將研究三的資料再用 excel 協助計算分析：

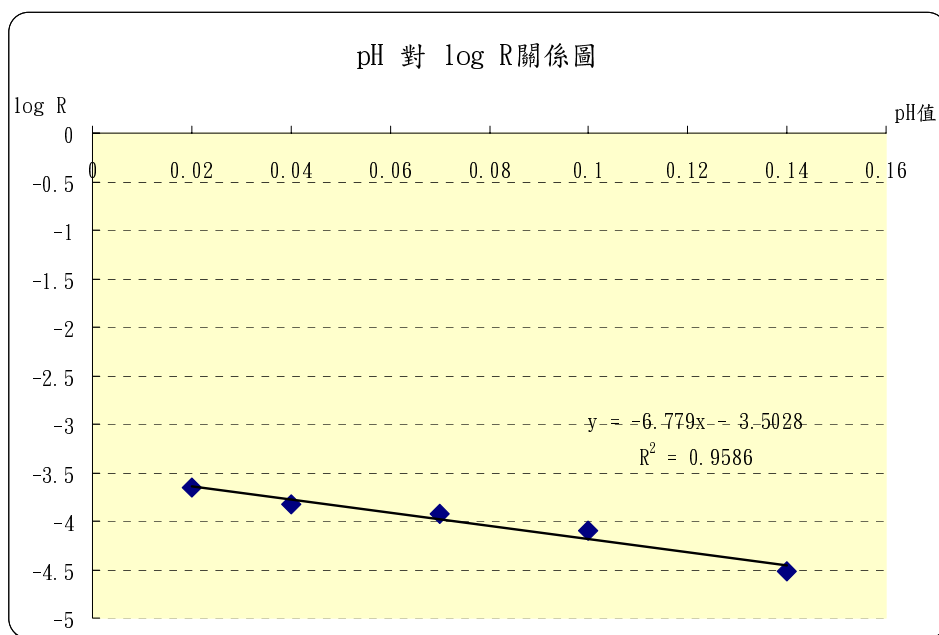


由於 $[H^+]$ 呈現梯度變化，無法直接計算各個時間點的瞬時速率，因此我採用研究四中所用的分段平均速率進行分析，如法炮製，得結果如下表：

時間(秒)	代表時刻(秒)	R_{H^+} (mol/s)	pH	$[H^+]$
0-30	15	0.00022	0.02	0.954992586
30-60	45	0.00015	0.04	0.912010839
60-120	90	0.00012	0.07	0.851138038
120-180	150	0.00008	0.1	0.794328235
180-300	240	0.00003	0.14	0.72443596



鹽酸濃度 M	反應分段平均速率 R_{CO_2} (mol/s)	pH	log R
0.954992586	0.00022	0.02	-3.65757732
0.912010839	0.00015	0.04	-3.82390874
0.851138038	0.00012	0.07	-3.92081875
0.794328235	0.00008	0.1	-4.09691001
0.72443596	0.00003	0.14	-4.52287875



經線性分析 $y = -6.779x - 3.5028$ ($R^2 = 0.9586$)

也就是 $\log R = \log K - n \times \text{pH}$ n 值為 6.779 ; $\log K = -3.5028 \rightarrow K = 3.142 \times 10^{-4}$

$$R_{H^+} = 3.142 \times 10^{-4} [H^+]^{6.779} \dots \text{第三式}$$

以 pH 值直接運算 R_{H^+} 方程式 (第三式) 與之前, 以 CO_2 輾轉求得的 R_{H^+} 方程式 (第一式、第二式) 相比, 這個方法所取得的 n 值實在差距太大了!!

研究七：以實際速率套入 R_{H+} 三方程式找出理想式

第一套

以電子天平設備作分析之研究四 p.7 表格取出一個數據：

1M HCl 反應第三分鐘瞬間速率之 $R_{CO_2}=3.86 \times 10^{-5} \text{ mol/s} \rightarrow R_{H+}=7.72 \times 10^{-5} \text{ mol/s}$

再由當時 CO_2 減少量為 0.38g 反推當時 $[H^+]=0.9309 \text{ M}$

套入本實驗作出的三反應方程式中如下表

反應速率方程式	$[H^+]$ 代入值	理論速率 R_{H+} (mol/s)	真實速率 R_{H+} (mol/s)	誤差(%)	準確名次
第一式 $R_{H+}=6.49 \times 10^{-5} [H^+]^{2.4018}$	0.9309M	5.46457E-05	0.0000772	41.27%	Num-2
第二式 $R_{H+}=1.2054 \times 10^{-4} [H^+]^{2.3386}$	0.9309M	0.000101955	0.0000772	-24.28%	Num-1
第三式 $R_{H+}=3.142 \times 10^{-4} [H^+]^{6.779}$	0.9309M	0.000193375	0.0000772	-60.08%	Num-3

討論：雖然都不很準，但仍看得出來，以第二式較準。

第二套

以 pH 計設備作分析之研究六實驗任取一數據：

由 1.5 分得瞬間 $R_{H+}=0.00012 \text{ mol/s}$ 對應 pH=0.07 $[H^+]=0.8511 \text{ M}$ 套入三式得下表

反應速率方程式	$[H^+]$ 代入值	理論速率 (mol/s)	真實速率 R_{H+} (mol/s)	誤差(%)	準確名次
第一式 $R_{H+}=6.49 \times 10^{-5} [H^+]^{2.4018}$	0.8511M	4.40628E-05	0.00012	172.34%	Num-3
第二式 $R_{H+}=1.2054 \times 10^{-4} [H^+]^{2.3386}$	0.8511M	8.26768E-05	0.00012	45.14%	Num-2
第三式 $R_{H+}=3.142 \times 10^{-4} [H^+]^{6.779}$	0.8511M	0.000105328	0.00012	13.92%	Num-1

討論：雖然有的誤差很大，但仍看得出來，以第三式較準。

綜合發現

1. 我發現同一儀器系統分析出來的反應速率方程式，配合同儀器系統數據，準確度較高
2. 其中電子天平中的起始反應速率作出的第二式 $R_{H+}=1.2054 \times 10^{-4} [H^+]^{2.3386}$ 優於平均反應速率作出的第一式 $R_{H+}=6.49 \times 10^{-5} [H^+]^{2.4018}$ ，
3. 承 2. 代表實驗，依數據分段取瞬時速率並外插初速的作法，較為可行。

柒、整體討論：

一、實驗由 CO_2 散失量、pH 值實際觀測，一路到各反應速率式的求出，整個實驗的思考過程在此整理成下列關係圖，作出更明確的思路流程說明，我的研究中有下面三種不同的比較：

實驗偵測工具的不同

偵測 CO_2 的動態變化(使用電子天平) v.s 偵測 $[\text{H}^+]$ 的動態變化 (使用 pH 計)

分析速率處理模式的不同

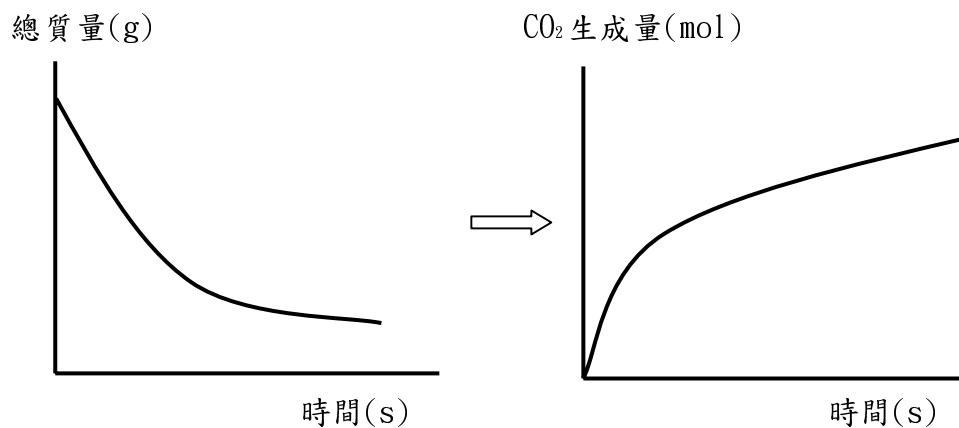
利用運動學原理分析反應速率 v.s 利用對數計算作圖分析

實驗分析中 $[\text{H}^+]$ 來源不同

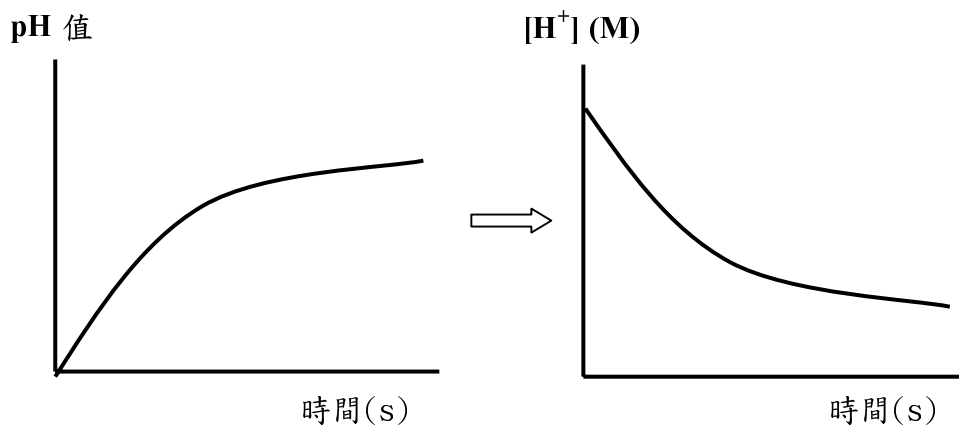
不同溶液起始反應速率(使用電子天平) v.s 偵測同一溶液各段平均速率(使用 pH 計)

基礎篇 實驗因子隨時間變化的關係圖

偵測 CO_2 的動態變化 (使用電子天平)

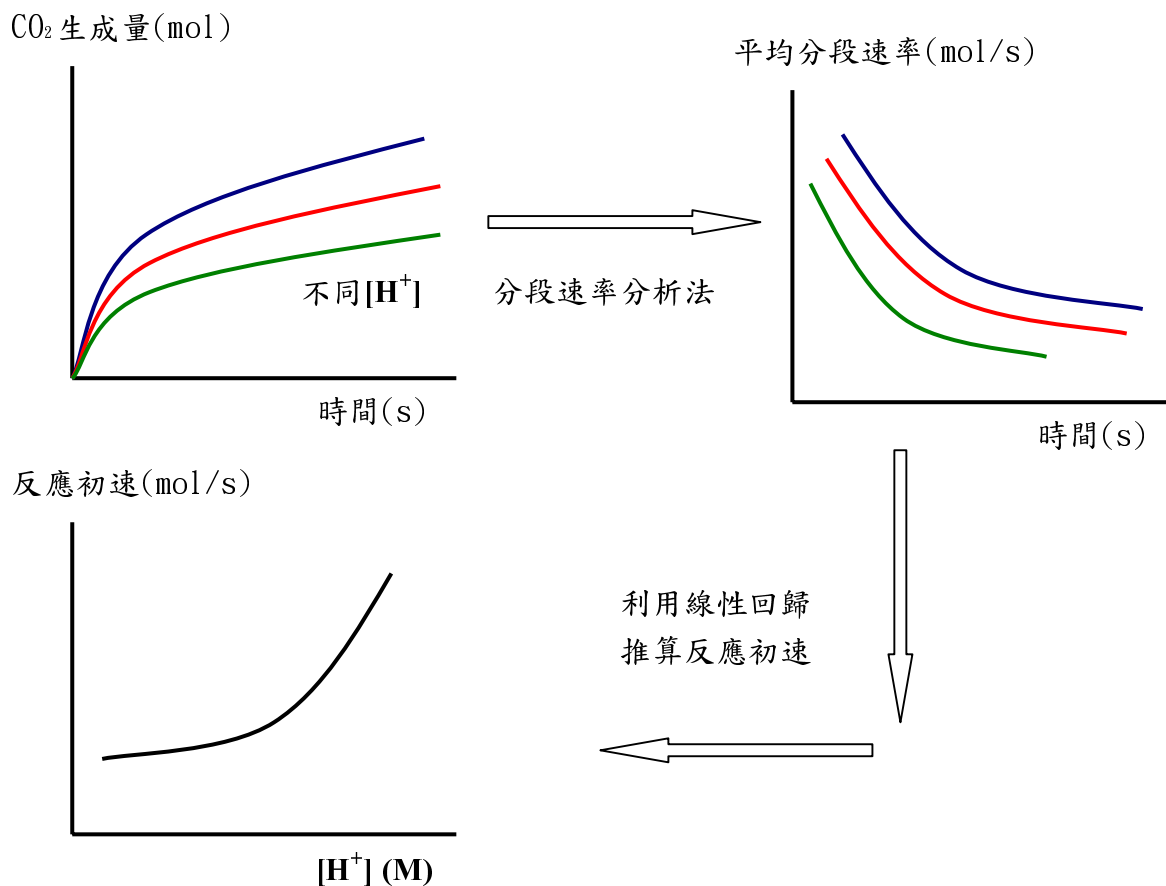


偵測 $[\text{H}^+]$ 的動態變化 (使用 pH 計)

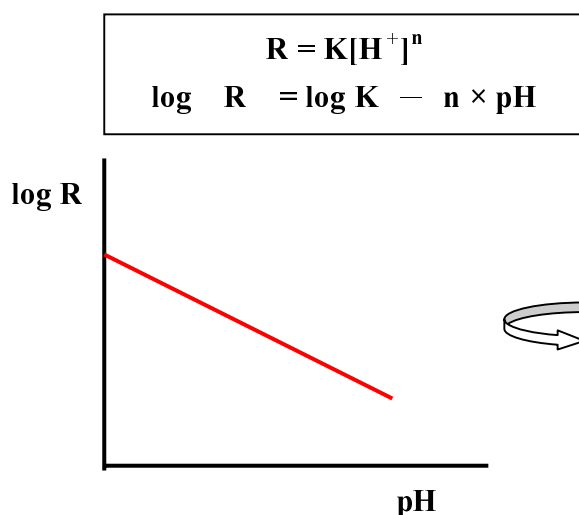


進階篇 反應速率與 $[H^+]$ 變化的探討

利用運動學原理分析反應速率 R_{CO_2}



利用對數計算作圖分析關係式 $R = K[H^+]^n$



偵測不同溶液(使用電子天平)

計算(一) 以平均速率 R_{CO_2} 代入
 $\rightarrow n=2.4 \quad K=3.245 \times 10^{-5}$

計算(二) 以反應初始速率 R_{CO_2} 代入
 $\rightarrow n=2.3 \quad K=6.027 \times 10^{-5}$

偵測同一溶液(使用 pH 計)

計算(三) 以各分段平均速率 R_{H^+} 代入
 $\rightarrow n=6.779 \quad K=3.142 \times 10^{-4}$

二、由於反應速率不大，CO₂散失量在測量時有些停頓，直接取瞬時斜率代表反應速率有困難，於是不得不採取平均斜率代表該時段中點的瞬時反應速率。

三、總檢討：原本我以為定溫下，不論何種溶液與粉筆反應作出的 R_{H^+} 方程式應相似，可互相呼應，萬萬沒想到大膽採用不同方法，比較出的 R_{H^+} 竟大大不同，可能原因推測如下：

- (1) 由天平測出 CO_2 散失量，事實上仍有一部分 CO_2 含在水中(略溶及附著於粉筆的部分)，以我的數據分析此部分是無法避免的誤差。它將導致測出 CO_2 散失量比真實值小，對應的 $[H^+]$ 實驗值比真實值大。
- (2) 以 pH 計測瞬間 $[H^+]$ ，由於反應中溶液並非澄清溶液，有時會有粉狀物出現，因此會不會因此干擾 pH 計的精準度，不可得知。

捌、結論：

一、在酸對碳酸根反應中，以國中理化課本常見的製備 CO_2 為起點，用電子天平、pH 計量化反應過程，追蹤反應過程中 CO_2 生成速率、 $[H^+]$ 濃度變化與時間的對應關係，確定可得 CO_2 實際產生量及 $[H^+]$ 遞減量。

二、比照運動學設計簡易數據分析的方法，動態追蹤 CO_2 生成速率對時間的關係，分析 CO_2 生成速率 R_{CO_2} 的快慢與 $[H^+]$ 的關係，並利用數學中對數的觀念及作圖法，求出 $R = K[H^+]^n$ 關係式的 K、n 值。

第一式 平均速率法之 $R_{H^+} = 6.49 \times 10^{-5} [H^+]^{2.4018}$

第二式 起始速率法之 $R_{H^+} = 1.2054 \times 10^{-4} [H^+]^{2.3386}$ (操作下最接近事實！)

第三式 平均瞬時速率 $R_{H^+} = 3.142 \times 10^{-4} [H^+]^{6.779}$

→由電子天平追蹤實驗，依數據分段取瞬時速率並外插初速的作法，較為可行。

三、我的粉筆實驗能確立研究方法、分析方法，及找到本實驗條件下的反應速率方程式；但是，不同儀器找到的反應速率方程式無法互相吻合(如第二式與第三式)，由於誤差不小，不能進一步明確指出正確反應式，實在好遺憾！

玖、參考資料：

- 一.高雄市 44 屆科學展覽會 國中組 化學科---那堂課粉筆出頭天 作品說明書
- 二.南一版國中理化課本第四冊 p16-17、p20-23、p40-44、p48-59
- 三.康熙圖書版物質科學化學篇下冊 p1-30
- 四.楊介信，張大同，中學物理實驗大全，凡異出版社，民 86， p645~p648

科展外一章

原本只是想單純作出粉筆在酸中 CO_2 散失量與時間的對應關係，找出粉筆取代大理石的各項優點……；結果數據出現停頓，突發奇想用國中運動學處理速率的簡易原理，試著分析粉筆的化學速率作出 R_{CO_2} -t 圖就好；沒想到做到此，竟自動開啟另一扇門---可以用原數據陸續作出天平與 pH 計就能分析出來的反應速率式。

國三的我誤入化學反應速率的大門，胡闖之餘，發現竟也可用現有國中數學與物理基礎，作出化學速率的深入研究，實在大出意料之外啊！@@

中華民國第四十五屆中小學科學展覽會
評 語

國中組 理化科

031617

運動學直搗化學速率~從鹽酸與碳酸鈣粉筆的反應中，追縱〔H⁺〕與CO₂的動態變化

高雄市立國昌國民中學

評語：

1. 見解頗深，探究有方
2. 解說清楚，與所學密切相關。
3. PH 測量值有效位數有待探討。